

**Forschungsvorhaben 37010000:**

**Anwendungsorientierte Prognose-  
verfahren zur Einstellung und Erhaltung  
von Dichteschichtungen in gefluteten  
Grubenräumen**

**- Kurztitel: Schichtungsmodellierung 2 -  
Abschlussbericht**

Auftraggeber: RAG Aktiengesellschaft  
Shamrockring 1  
44623 Herne

Bestellung: 3616741/B54/DE v. 07.11.06 (AP 1+2)  
4300208/B54/DE v. 02.09.09 (AP 3-5)

Sachverständige: Dipl.-Ing. Dr. M. Eckart  
Dipl.-Math. H. Kories  
Dipl.-Geol. P. Rüterkamp

Tel.-Durchwahl: 0201/172-1824  
Fax: 0201/172-1891

DMT-Bearbeitungs-Nr.: 3450-2006-176 (20609102)

Essen, den 08.11.2012

DMT GmbH & Co. KG

(Kories)

(Eckart)

Dieser Bericht besteht aus 230 Seiten

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
--	-------

1	Allgemeines .....	13
1.1	Ausgangssituation .....	13
1.2	Zielsetzung .....	13
1.3	Arbeitsschritte .....	14
1.4	Berichtsaufbau .....	16
2	Stand der bisherigen Untersuchungen .....	18
3	Grundlagen .....	20
3.1	Die Prozessgleichung .....	20
3.2	Analytische Lösungen .....	23
3.3	Hochauflösende CFD-Modellierung .....	28
3.4	Physikalische Grundlagen .....	29
3.5	Doppeldiffusion .....	32
3.5.1	Stand der Forschung .....	32
3.5.2	Erläuterung Theorie der Doppeldiffusion .....	32
3.5.3	Auftreten doppeldiffusiver Prozesse .....	36
3.5.4	Salzfinger .....	38
3.5.5	Diffusive Konvektion .....	40
3.5.6	Berechnungsansatz zur Einbindung doppeldiffusiver Prozesse .....	41
3.6	Boxmodell .....	43
3.6.1	Formelmäßige Darstellung der dichteabhängigen Strömung .....	43
3.6.2	Abhängigkeit der Dichte von Temperatur und Konzentration .....	45
4	Physikalisches Modell .....	50
4.1	Alter Technikumsversuch .....	50
4.2	Neuer Technikumsversuch .....	52
4.2.1	Überlegungen zum geeigneten Labormaßstab .....	53
4.2.2	CFD-Voruntersuchungen .....	56
4.2.3	Aufbau Technikumsversuch .....	60
4.2.4	Übersicht der Versuche .....	73
4.2.4.1	Schichtungsversuch V1 .....	77
4.2.4.2	Schichtungsversuch V2 .....	82
4.2.4.3	Schichtungsversuch V3 .....	88
4.2.4.4	Schichtungsversuch V4 .....	93
4.2.4.5	Schichtungsversuch V5 .....	96

4.2.4.6	Schichtungsversuch V6.....	100
4.2.4.7	Schichtungsversuch V7.....	104
4.2.4.8	Schichtungsversuch V8.....	111
4.3	FEFLOW-Berechnungen .....	117
4.3.1	Grundlagen und Ausgangsdaten.....	117
4.3.2	Simulationen zu Schichtungsversuch V2.....	120
4.3.3	Simulationen zu Schichtungsversuch V4.....	125
4.4	CFD-Modellrechnungen.....	134
4.4.1	Grundlagen und Ausgangsdaten.....	134
4.4.2	Modellrechnungen zu Schichtungsversuch V2.....	137
4.4.3	Modellrechnungen zu Schichtungsversuch V5.....	150
4.5	Umsetzung ins Boxmodell .....	155
4.5.1	Ausgangsdaten und Modellaufbau .....	155
4.5.2	Voruntersuchungen.....	158
4.5.2.1	Strömungsmodell – stationärer Zustand .....	158
4.5.2.2	Testen der Durchbruchskurve.....	162
4.5.2.3	Dichteströmung .....	163
4.5.2.3.1	Variante 0	164
4.5.2.3.2	Variante 1	166
4.5.2.3.3	Variante 2	168
4.5.2.3.4	Variante 3	170
4.5.2.3.5	Variante 4	172
4.5.2.4	Modellanpassungen zur temperaturabhängigen Dichteströmung.....	173
4.5.3	Modellerweiterung Wärmetransport .....	175
4.5.3.1	Berücksichtigung der Gebirgstemperatur im Boxmodell.....	175
4.5.3.2	Kalibrierung am Beispiel BW-Ost (Gneisenau-Haus Aden)..	177
4.5.4	Box-Simulationen.....	179
4.6	Fazit physikalisches Modell.....	181
5	Beispiel mit realem Maßstab .....	184
5.1	CFD-Berechnungen.....	184
5.2	Umsetzung ins Boxmodell .....	189
5.2.1	Modellaufbau - Modellvergrößerung um Faktor 500 .....	189
5.2.2	Strömungsmodell realer Maßstab- stationärer Zustand.....	191
5.2.3	Testen der Durchbruchskurve - Modell realer Maßstab.....	191
5.2.4	Dichteströmung - Modell realer Maßstab.....	193
5.2.4.1	Variante 0.....	194
5.2.4.2	Variante 1 .....	196
5.2.4.3	Variante 2.....	198

5.2.4.4	Variante 3 .....	200
5.2.4.5	Variante 4 .....	202
5.3	Fazit realer Maßstab .....	203
6	Einfaches Feldbeispiel (Schacht Hermann) .....	205
6.1	Allgemeines .....	205
6.2	CFD-Berechnungen .....	208
6.2.1	Modellaufbau und Randbedingungen .....	208
6.2.2	Ergebnisse .....	209
6.3	Umsetzung ins Boxmodell .....	212
6.3.1	Ausgangsdaten und Modellaufbau .....	212
6.3.2	Ergebnisse .....	215
6.4	Fazit einfaches Feldbeispiel .....	216
7	Modellanwendungen im Feldbeispiel Bergwerk Ost ..	217
8	Zusammenfassung .....	223
9	Literaturauswahl .....	229

## Abbildungen

Abbildung 1:	Abhängigkeit des an der Ausspülung teilnehmenden Hohlraumvolumens vom Verhältnis „Volumenstrom : Gesamtvolumen“; roter Kreis entspricht den Verhältnissen Ronneburg .....	26
Abbildung 2:	Analytische Lösung der Massenbilanzgleichung; der Zeitpunkt $t = 0$ entspricht dem Beginn des Überlaufes der Flutungswässer im Gessental .....	27
Abbildung 3:	Geschwindigkeitsfeld, berechnet mit dem CFX-Simulator /4/ .....	29
Abbildung 4:	Lake Nyos: Temperatur- und Salinitätsprofile über die Tiefe /16/ .....	34
Abbildung 5:	Dichtekombinationen .....	35
Abbildung 6:	Thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha(T,p)$ .....	37
Abbildung 7:	Beispiel für thermohaline Treppenstufen durch Salzfinger /18/ .....	39
Abbildung 8:	Salzfinger, verändert nach /14/ .....	39
Abbildung 9:	Diffusive Konvektion, verändert nach /14/ .....	41
Abbildung 10:	Verhältnis der Diffusivitäten bei unterschiedlichen T/S-Kombinationen (ausgedrückt durch $R_p$ ) .....	43

Abbildung 11:	Dichteveergleich mit variabler Konzentration bei konstanter Temperatur .....	49
Abbildung 12:	Dichteveergleich mit variabler Temperatur bei konstanter Konzentration .....	49
Abbildung 13:	Prinzipieller Aufbau alter Technikumsversuch 1997/98.....	51
Abbildung 14:	Ergebnisse alter Technikumsversuch (Messrohr).....	52
Abbildung 15:	Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (Seitenansicht) .....	55
Abbildung 16:	Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (Aufsicht).....	55
Abbildung 17:	Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (3D-Ansicht).....	56
Abbildung 18:	Temperaturprofil Voruntersuchung (stationär) .....	57
Abbildung 19:	Ausschnitt Temperaturprofil Voruntersuchung (stationär).....	58
Abbildung 20:	Temperaturprofil an der Außenwand des Schacht- und Streckensystems (Voruntersuchung, stationär) ....	59
Abbildung 21:	Aufbau Technikumsversuch (Seitenansicht, Maße in cm).....	62
Abbildung 22:	Aufbau Technikumsversuch (Aufsicht, Maße in cm)....	62
Abbildung 23:	Schema Messsensorik in den Schächten.....	63
Abbildung 24:	Versuchsstand (1).....	65
Abbildung 25:	Versuchsstand (2).....	65
Abbildung 26:	Rohrsystem (Grubengebäude).....	66
Abbildung 27:	Heizplatte.....	67
Abbildung 28:	Reglereinheiten für Heizplatten .....	68
Abbildung 29:	Messsystem im Rohbau (vorne = „oben“) .....	69
Abbildung 30:	fertiges Messsystem (vorne = „unten“) .....	70
Abbildung 31:	Messaufnehmer im Detail (Links: Leitfähigkeitsmessung; Mitte: Abstandshalter, Stabilisatoren; Rechts: Temperaturfühler) .....	70
Abbildung 32:	Messsystem im Schachtrohr .....	71
Abbildung 33:	Messsystem in den Schachtröhren und sandgefüllter Kasten .....	71
Abbildung 34:	Positionierung Umgebungsmonitoring (Schema) .....	72
Abbildung 35:	Druckregler (hellgrau, links), Durchflussmessgerät (schwarz, Mitte) und Absperrhahn (rot, rechts).....	73

Abbildung 36:	Leitfähigkeits- und Temperaturprofile in den beiden Schächten (Ausgangszustand mit Schichtung) .....	75
Abbildung 37:	V1: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	78
Abbildung 38:	V1: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B .....	79
Abbildung 39:	V1: Temperatur in Schacht A .....	80
Abbildung 40:	V1: Temperatur in Schacht B .....	81
Abbildung 41:	V1: Dichte in Schacht A .....	82
Abbildung 42:	V2: Temperatur in Schacht A .....	83
Abbildung 43:	V2: Temperatur in Schacht B .....	84
Abbildung 44:	V2: Temperatur-Durchbruch in Schacht A.....	84
Abbildung 45:	V2: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	85
Abbildung 46:	V2: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B .....	86
Abbildung 47:	V2: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A10-A13) .....	87
Abbildung 48:	V2: Schema der schrittweisen Leitfähigkeits- und Temperaturerhöhungen .....	87
Abbildung 49:	V3: Umgebungsmonitoring.....	89
Abbildung 50:	V3: Temperatur in Schacht A .....	90
Abbildung 51:	V3: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	91
Abbildung 52:	V3: Dichte in Schacht A .....	91
Abbildung 53:	V3: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A10-A13) .....	92
Abbildung 54:	V4: Umgebungsmonitoring.....	93
Abbildung 55:	V4: Temperatur in Schacht A .....	94
Abbildung 56:	V4: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	95
Abbildung 57:	V4: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A09-A13) .....	95
Abbildung 58:	V5: Umgebungsmonitoring.....	97
Abbildung 59:	V5: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	98
Abbildung 60:	V5: Temperatur in Schacht A .....	98
Abbildung 61:	V5: elektr. Leitf. und Temp. in Schacht A (A09, A13: Durchbruch) .....	99
Abbildung 62:	V5: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A09-A13) .....	100
Abbildung 63:	V6: Umgebungsmonitoring.....	101
Abbildung 64:	V6: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	102
Abbildung 65:	V6: Temperatur in Schacht A .....	102

Abbildung 66:	V6: elektr. Leitf. u.Temp. in Schacht A (A08-A15: Annäherung) .....	103
Abbildung 67:	Dosierapparat für Salzzufuhr.....	105
Abbildung 68:	Technik der Salzzufuhr .....	105
Abbildung 69:	V7: Umgebungsmonitoring.....	106
Abbildung 70:	V7: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B.....	108
Abbildung 71:	V7: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	108
Abbildung 72:	V7: elektr. Leitfähigkeit (Pos. 15, 14) in Schacht A u. B .....	109
Abbildung 73:	V7: Temperatur in Schacht B .....	110
Abbildung 74:	V7: Temperatur in Schacht A .....	110
Abbildung 75:	V8: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A.....	112
Abbildung 76:	V8: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B .....	112
Abbildung 77:	V8: Umgebungsmonitoring.....	114
Abbildung 78:	V8: Temperatur in Schacht A .....	114
Abbildung 79:	V8: Temperatur in Schacht B .....	115
Abbildung 80:	V8: Temperatur in Schacht A (Ausschnitt).....	115
Abbildung 81:	V8: Umgebungsmonitoring (Ausschnitt) .....	116
Abbildung 82:	V2 – Variante0: Temperaturverteilung nach 20 Tagen.....	121
Abbildung 83:	V2 – Variante0: Wärmestrom (Heat budget) nach 20 Tagen.....	121
Abbildung 84:	V2 – Variante3: Temperaturverteilung nach 20 Tagen.....	124
Abbildung 85:	V2 – Variante3: Wärmestrom (Heat budget) nach 20 Tagen.....	124
Abbildung 86:	V4 – Variante4: Temperaturverteilung nach 10 Tagen und Position „Umgebungsmonitoring“ .....	126
Abbildung 87:	V4 – Variante4: Wärmestrom (Heat budget) nach 10 Tagen.....	126
Abbildung 88:	V4 – Variante4: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d) .....	127
Abbildung 89:	V4: reales Umgebungsmonitoring Temperatur (°C)...	127
Abbildung 90:	V4 – Variante9: Temperaturverteilung nach 10 Tagen.....	129
Abbildung 91:	V4 – Variante9: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d) .....	130

Abbildung 92: V4 – Variante10.2: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d) .....	131
Abbildung 93: V4 – Variante10.4: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d) .....	133
Abbildung 94: Modellgeometrie „Versuchsstand“ im CFD-Modell .....	135
Abbildung 95: Messwerte aus Umgebungsmonitoring - Temperaturen (°C) über die Zeit für Versuch V5 .....	136
Abbildung 96: Salzkonzentrations-Anfangsbedingungen – Versuch V2	137
Abbildung 97: V2 Variante 1.1 - links: Salzkonzentration Schacht A; rechts: Diskretisierung 1,0 cm .....	138
Abbildung 98: V2 Variante 1.1 - links: Salzkonzentration Schacht A; rechts: Diskretisierung 3,3 cm .....	138
Abbildung 99: V2 Variante 1.1 – Salzkonzentration über die Zeit in Schacht A .....	139
Abbildung 100: V2 Variante 1.2 – Salzkonzentration über die Zeit in Schacht A .....	139
Abbildung 101: Messwerte zu V2 – elektr. Leitfähigkeit in Schacht A ...	140
Abbildung 102: V2 Variante 1.1 – Temperatur über die Zeit in Schacht A .....	141
Abbildung 103: V2 Variante 1.2 – Temperatur über die Zeit in Schacht A .....	141
Abbildung 104: Messwerte zu V2 – Temperatur in Schacht A .....	142
Abbildung 105: Veranschaulichung Versuchsstand .....	143
Abbildung 106: Versuchsstand – Gitterauflösung .....	144
Abbildung 107: Variante 1 – Temperatur über die Zeit in Schacht A....	145
Abbildung 108: Messwerte zu V2 – Temperatur in Schacht A .....	145
Abbildung 109: Variante 1 – Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 24 h	146
Abbildung 110: Variante 1 – Geschwindigkeitsverteilung zum Zeitpunkt 120 h .....	147
Abbildung 111: Variante 1 – Salinität zum Zeitpunkt 348 h.....	148
Abbildung 112: Variante 1 – Strömungsvektoren zum Zeitpunkt 348 h.	149
Abbildung 113: Randbedingungen – Versuch V5 .....	151
Abbildung 114: V5 Variante 2.1 – Salzkonzentration über die Zeit in Schacht A .....	152
Abbildung 115: V5 Variante 2.2 – Salzkonzentration über die Zeit in Schacht A .....	152
Abbildung 116: Messwerte zu V5 – elektr. Leitfähigkeit in Schacht A ...	153
Abbildung 117: V5 Variante 2.1 – Temperatur über die Zeit in Schacht A .....	154

Abbildung 118: V5 Variante 2.2 – Temperatur über die Zeit in Schacht A .....	154
Abbildung 119: Messwerte zu V5 – Temperatur in Schacht A .....	155
Abbildung 120: Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (Seitenansicht) .....	156
Abbildung 121: Seitenansicht Boxmodell - 16 Scheiben (Höhenangaben in m) .....	157
Abbildung 122: Perspektivische Ansicht Boxmodell - 16 Scheiben ....	158
Abbildung 123: Beispiel Koeffizientenberechnung - horizontale Verbindungen .....	159
Abbildung 124: Durchbruchskurven (analytische Lösung: gestrichelte schwarze Linie) .....	163
Abbildung 125: Variante 0: Lage freier Wasserspiegel im hydrostatischen Gleichgewicht .....	165
Abbildung 126: Variante 0: Wasserspiegelentwicklung .....	165
Abbildung 127: Variante 1: Wasserspiegelentwicklung .....	166
Abbildung 128: Variante 1: Volumenstromentwicklung .....	167
Abbildung 129: Variante 1: Chloridentwicklung .....	167
Abbildung 130: Variante 2: Wasserspiegelentwicklung .....	168
Abbildung 131: Variante 2: Volumenstromentwicklung .....	169
Abbildung 132: Variante 2: Chloridentwicklung .....	169
Abbildung 133: Variante 3: Wasserspiegelentwicklung .....	170
Abbildung 134: Variante 3: Volumenstromentwicklung .....	171
Abbildung 135: Variante 3: Chloridentwicklung .....	171
Abbildung 136: Variante 4a: Dichteabhängige Volumenstromentwicklung .....	172
Abbildung 137: Variante 4b: Dichteabhängige Volumenstromentwicklung .....	173
Abbildung 138: Schalenmodell zur Wärmeanströmung um Strecke...	176
Abbildung 139: Vergleich gemessene Temperaturrentwicklung BW-Ost mit Boxmodellsimulation .....	178
Abbildung 140: Schichtungsversuch V6 – Leitfähigkeits- (oben) und Temperaturrentwicklung (unten) .....	179
Abbildung 141: Modellierte Konzentrations- (oben) und Temperaturrentwicklung (unten) bei T-Gradient 5,2 K und konstanter (gemittelter) Einlauftemperatur .....	180
Abbildung 142: Modellierte Konzentrations- (oben) und Temperaturrentwicklung (unten) bei T-Gradient 5,2 K und variabler Einlauftemperatur .....	181

Abbildung 143: Veranschaulichung der Geometrieverhältnisse realer Grubenbaue für CFD-Modell .....	185
Abbildung 144: Variante 2 bis 4 – Randbedingungen .....	185
Abbildung 145: Variante 2 bis 4 – Temperaturverteilung .....	186
Abbildung 146: Variante 3 – Salzkonzentration in Schacht A .....	187
Abbildung 147: Variante 3 – Temperatur in Schacht A .....	187
Abbildung 148: Seitenansicht Boxmodell realer Maßstab (Höhe in mNN) .....	190
Abbildung 149: Durchbruchskurven – Modell realer Maßstab .....	193
Abbildung 150: Variante 0 - Modell realer Maßstab: Lage freier Wasserspiegel im hydrostatischen Gleichgewicht .....	195
Abbildung 151: Variante 0 - Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung .....	196
Abbildung 152: Variante 1 – Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung .....	197
Abbildung 153: Variante 1 – Modell realer Maßstab: Volumenstromentwicklung .....	197
Abbildung 154: Variante 1 – Modell realer Maßstab: Chloridentwicklung .....	198
Abbildung 155: Variante 2 – Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung .....	199
Abbildung 156: Variante 2 – Modell realer Maßstab: Volumenstromentwicklung .....	199
Abbildung 157: Variante 2 – Modell realer Maßstab: Chloridentwicklung .....	200
Abbildung 158: Variante 3 - Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung .....	201
Abbildung 159: Variante 3 - Modell realer Maßstab: Volumenstromentwicklung .....	201
Abbildung 160: Variante 3 - Modell realer Maßstab: Chloridentwicklung .....	202
Abbildung 161: Variante 4 - Modell realer Maßstab: Dichteabhängige Entwicklung der Volumenströme ...	203
Abbildung 162: Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen im Schacht Hermann 1 .....	207
Abbildung 163: Schacht Hermann 1: Abmessungen und Materialdaten .....	209
Abbildung 164: Schacht Hermann 1: Randbedingungen .....	209
Abbildung 165: Schacht Hermann 1: Salzkonzentration nach ca. 3 Std. ....	210

Abbildung 166:	Schacht Hermann 1: Wassertemperatur nach ca. 3 Std. ....	211
Abbildung 167:	Schacht Hermann 1: Wassertemperatur in Schachtmitte nach ca. 3 Std. ....	211
Abbildung 168:	Seitenansicht Boxmodell Hermann Scht. 1 u. 2: 15 Scheiben (Höhenangaben in mNN).....	214
Abbildung 169:	Chlorid-Konzentrationen in den Hermann- Schächten nach 1.000 Tagen .....	215
Abbildung 170:	BW Ost: Boxen und Verbindungen.....	218
Abbildung 171:	BW Ost: Vertikaler Modellaufbau (Unterkanten in mNN) .....	219
Abbildung 172:	BW Ost: Chloridentwicklung ohne und mit Dichteschichtung.....	221

## Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht Schichtungsversuche .....	76
Tabelle 2:	Eingangsparameter.....	120
Tabelle 3:	Eingangsparameter PE-Stützen.....	122
Tabelle 4:	Veränderung einiger Eingangsparameter von Variante0 zu Variante3.....	123
Tabelle 5:	V4 – Variante4: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten .....	128
Tabelle 6:	V4 – Variante9: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten .....	130
Tabelle 7:	V4 – Variante10.2: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten .....	132
Tabelle 8:	V4 – Variante10.4: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten .....	133
Tabelle 9:	V4 – Variantenvergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten .....	134
Tabelle 10:	Übersicht über die Modellrandbedingungen .....	136
Tabelle 11:	Übersicht über die Modellrandbedingungen .....	143
Tabelle 12:	Wasserspiegel und Differenzen im stationären Zustand (Einspeisungsmenge 1 L/min) .....	160

Tabelle 13:	Wasserspiegel und Differenzen im stationären Zustand (Einspeisungsmenge 10 L/min) .....	161
Tabelle 14:	Variante 0: Vergleich Dichte, Wasserspiegel und Differenzen .....	164
Tabelle 15:	Endtemperaturen .....	174
Tabelle 16:	Übersicht über die Modellrandbedingungen (reales Bsp.) .....	184
Tabelle 17:	Wasserspiegel und Differenzen im stationären Zustand - Einspeisungsmenge 500 L/min – Modell realer Maßstab.....	191
Tabelle 18:	Variante 0 - Modell realer Maßstab: Dichtevergleich .	194
Tabelle 19:	Variante 0 - Modell realer Maßstab: Wasserspiegel und Differenzen.....	194
Tabelle 20:	Mineralisation (mg/L) und Wassertemperatur (°C) im Schacht Hermann 2 .....	206
Tabelle 21:	Boxnamen und Flächen BW Ost .....	217
Tabelle 22:	Übersicht Randzuläufe BW Ost.....	220

## 1 Allgemeines

### 1.1 Ausgangssituation

Im Ruhrrevier werden auf lange Sicht die bisher künstlich tief gehaltenen Salzwässer wieder aufsteigen und das bergmännisch gestörte hydraulische System wird sich in etwa dem Zustand vor Beginn des Bergbaus annähern. Dies kann zu einer Beeinträchtigung der derzeitigen Grundwassernutzung (Wasserwerke, Mineralwasserbrunnen, Thermalquellennutzung) führen. So zeigte z. B. die Studie „Untersuchung der Qualitätsentwicklung von Grubenwässern im Einzugsbereich der Emscher“ /1/, dass sehr hohe Chloridkonzentrationen zu erwarten sind, deren direkte Einleitung in die Vorflut problematisch sein wird. Zu dieser Studie wurde eingehend bemerkt, dass die prognostizierten hohen Werte nur gelten, wenn keine Schichtungsphänomene wirksam sind.

### 1.2 Zielsetzung

Da die bisher ohne Beachtung der Dichteeffekte durchgeführten Qualitätsprognosen Grubenwässer ergeben, die in vielen Fällen aufgrund ihrer geochemischen Qualität nicht direkt in Vorfluter einleitbar wären, ist es Ziel des Vorhabens, die RAG/DSK methodisch in die Lage zu versetzen, die positiven Auswirkungen der Dichteschichtungen auf die Qualität der künftig austretenden Grubenwässer besser zu prognostizieren. So können die Überdimensionierung von vorgesehenen Wasserbehandlungsanlagen vermieden bzw. die Wässer durch gezielte Gestaltung der untertägigen Hauptströmungswege überhaupt erst einleitbar gemacht werden. Auch lange übertägige Umleitungen könnten oftmals vermieden werden. Die erreichbaren finanziellen Vorteile können damit die Dimension von mehreren Zehn-Millionen Euro deutlich übersteigen.

Die bereits gewonnenen Kenntnisse zur Schichtungsbildung und die entscheidenden Einflussgrößen werden genutzt, um vereinfachte, robuste Modellwerkzeuge zur Prognose und Abbildung der Schichtung zu schaffen. Diese können dann an das bestehende Boxmodell Ruhr angekoppelt bzw. in dieses integriert werden. Damit sind unter Berücksichtigung des Flutungsgeschehens in Grubenfeldern „flächendeckend“ Aussagen zu Schichtungsphänomenen, evtl. auch zu deren positiven Beeinflussung,

---

<sup>1</sup> Die Ziffern verweisen auf die Quellenangaben im Literaturverzeichnis (Kap. 9).

möglich. Die Prognosen lassen sich unmittelbar als Entscheidungshilfe für künftige Konzepte zu Stilllegungen bzw. Flutungen nutzen.

### 1.3 Arbeitsschritte

Das gesamte Vorhaben wurde bei der Antragstellung 2006 in fünf Arbeitspakete (AP) untergliedert, die zu drei Leistungsabschnitten (LA) zusammengefasst waren:

#### 1. Leistungsabschnitt

##### Arbeitspaket 1 „Parameterstudien und Technikumsversuche“

Zur Absicherung der bereits erlangten Erkenntnisse werden weitere Parameterstudien im Hinblick auf Vermischung/Schichtungsstabilität mit deutlich längeren Simulationszeiträumen bei den instationären Modellrechnungen durchgeführt. Die Parameter Dichte- und Temperaturunterschiede der Wässer sowie benötigte Zuflussraten werden dabei untersucht.

Zur Vertiefung des Verständnisses werden Technikumsversuche im Labormaßstab durchgeführt. Eine künstlich erzeugte Dichteschichtung wird bei unterschiedlichen Zuflussraten wechselnden Temperaturbedingungen ausgesetzt. Die Reaktionen in der Versuchsstrecke werden beobachtet und beschrieben und im AP 2 nachmodelliert.

##### Arbeitspaket 2 „Parameter- und Geometriereduzierung“

Aufgrund der weiterhin sehr hohen Anforderungen an die Hardware wird unter Ausnutzung der bisherigen Erfahrungen und der im AP 1 erzielten Erkenntnisse geprüft, inwieweit der Modellkörper sinnvoll in kleine Teilkörper zerlegt (diskretisiert) werden muss, um einerseits noch realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten (keine zu grobe Diskretisierung) und andererseits praktikable Rechenzeiten zu gewährleisten (keine zu feine Auflösung). Darüber hinaus findet eine Reduzierung auf die strömungstechnisch wesentlichen Bestandteile des Grubengebäudes statt.

#### 2. Leistungsabschnitt

##### Arbeitspaket 3 „Simulation größerer Modelle“

Auf Basis der Ergebnisse aus dem Leistungsabschnitt 1 lassen sich Simulationen mit größeren Modellen (Abbildung einer realen Grube mit wesentlichen Teilen des Streckensystems und der Schächte) durchführen. Diese Schichtungssimulationen sollten an einer gut bekannten (Zu- und Abflüsse

etc.) und dokumentierten (Streckennetz, Schächte, Ausbau etc.), möglichst bereits gefluteten oder wenigstens in fortgeschrittener Flutung begriffenen Grube mit entsprechenden Messmöglichkeiten (Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen in gefluteten Schächten) vorgenommen werden. Unter der Voraussetzung, dass eine planmäßige Fertigstellung des laufenden DSK FuE-Vorhabens Nr. 3414 „Flutungseinflussfaktoren“ /2/ erfolgt, könnten Modellrechnungen für das Grubenfeld „Zollverein“ bereits als konkrete Anwendung genutzt werden.<sup>2</sup> Im Zuge der erfolgreichen Entwicklung von AP 3 wird versucht, das Simulationsmodell in Teile des bestehenden Boxmodells zu integrieren (AP 4).

#### Arbeitspaket 4 „Ankoppelung an bzw. Einbindung in das Boxmodell“

Verlaufen die Simulationen größerer Modelle (AP 3) zufriedenstellend, wird ein gekoppeltes Modell, bestehend aus dem vereinfachten numerischen Simulationsmodell und dem Boxmodell, erstellt. Die Einbindung geschieht zunächst in ein Boxmodell überschaubarer Ausdehnung und Komplexität. Es wird auch die Berechnung der Grubenbaudurchströmung mit Dichteschichtung durch Algorithmen des Boxmodells untersucht, was zu einem einheitlichen Modellansatz führen würde. Es wird mit Fortschreiten des AP 4 ein Werkzeug geschaffen, das es erlaubt, unter Berücksichtigung des Flutungsgeschehens „flächendeckend“ Schichtungsphänomene in Grubenfeldern (Boxen) zu prognostizieren bzw. nachzubilden. Zur Kalibrierung werden gut bekannte, bereits geflutete Stillstandsbereiche numerisch abgebildet und nachgerechnet.

An einem realen Demonstrationsbeispiel werden die Auswirkungen der Flutungsberechnung mit und ohne Beachtung der Dichteefekte ausführlich dokumentiert.

### **3. Leistungsabschnitt**

#### Arbeitspaket 5 „Abschlussbericht“

In dem hier vorliegenden Abschlussbericht werden die durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse dargestellt und dokumentiert.

---

<sup>2</sup> Da sich die Fertigstellung bis Ende 2011 verzögerte, konnte zum gegebenen Zeitpunkt von der Option kein Gebrauch gemacht werden. Deshalb wurden als Alternativen der Hermannschacht der Gewerkschaft Hermann V GmbH (Selm) und das Bergwerk Ost gewählt.

Das gesamte FuE-Vorhaben wurde von DSK/RAG in zwei Schritten beauftragt: der LA 1 (AP 1+2) mit der Bestellung 3616741/B54/DE vom 07.11.2006 und die LA 2+3 (AP 3-5) mit der Bestellung 4300208/B54/DE vom 02.09.2009.

## 1.4 Berichtsaufbau

Der vorliegende Abschlussbericht baut sich folgendermaßen auf:

Kapitel 2 und 3 sind den Grundlagen gewidmet, die aus eigenen Untersuchungen und aus Literaturrecherchen gewonnen wurden. Dargestellt werden die wesentlichen physikalischen Prozesse sowie das Boxmodell.

Den nächsten Bearbeitungsetappen liegt kurz gefasst folgende Philosophie zugrunde: Es soll gezeigt werden, dass das Boxmodell in der Lage ist, Schichtungsphänomene auch großräumig korrekt abzubilden. Dabei übernahm Software aus dem Bereich der Computational Fluid Dynamics (CFD) als international angesehene und eingeführte Simulationsprogramme eine Vermittlerrolle, um die Modellansätze des Boxmodells abzustützen. Sie ist ohne Frage in der Lage, kleinräumige Schichtungseffekte korrekt nachzubilden, stößt bei großräumigen Schichtungseffekten aber an Kapazitätsgrenzen (Diskretisierungsgrad, Hardware, Rechenzeiten). Wenn aber das Boxmodell bei diesen kleineren Maßstäben zu ähnlichen Ergebnissen wie das CFD-Modell kommt, sollte davon ausgegangen werden, dass es auch bei größeren realen Maßstäben, die das CFD-Modell aus Kapazitätsgründen nicht mehr abbilden kann, Schichtungsphänomene richtig nachbildet. Dieser Nachweis wurde geführt.

Kapitel 4 befasst sich mit den im Technikum durchgeführten Schichtungsversuchen an einem vereinfachten Grubenmodell aus zwei „Schächten“ und zwei „Strecken“ sowie die Nachbildung/Kalibrierung mit den FEFLOW-, CFD- und Boxmodell-Simulationen und den dafür notwendigen Anpassungen.

In Kapitel 5 wird der Technikumsversuch in der Dimension auf reale Größe erweitert und die Ergebnisse beider Modelle miteinander verglichen. Im Zuge der Projektbearbeitung zeigte sich, dass CFD-Modelle für großräumige Probleme aus Kapazitätsgründen im Rahmen unserer Fragestellungen nicht mehr eingesetzt werden können. Deshalb fehlte eine Absicherung der Modellergebnisse des Boxmodells in diesem Bereich. Um nicht sofort zum realen Feldbeispiel mit vielen Boxen und Strecken übergehen zu müssen, wo Detailbilanzbetrachtungen sehr schwierig sind, wurde ein

zusätzliches Kapitel eingefügt, in dem das CFD- und das Boxmodell mit einem realen, aber einfach strukturierten Feldbeispiel verglichen werden. Hierzu bot sich die Zeche Hermann in Selm an: In Kapitel 6 erfolgt deshalb der Übergang zu einem bereits gefluteten und gut dokumentierten Feldbeispiel, das in Bezug auf die Schichtungsstruktur und das Grubengebäude (Umfang, Ausrichtung) relativ einfach aufgebaut ist.

Schließlich erfolgt in Kapitel 7 die Boxmodellanwendung für ein reales komplexes Feldbeispiel. Dazu wurde das Bergwerk Ost ausgewählt.

Kapitel 8 fasst die Arbeiten und Erkenntnisse zusammen, in Kapitel 9 werden wichtige Beiträge aus der Literatur oder anderen Quellen zitiert.

## 2 Stand der bisherigen Untersuchungen

Die für diesen Bericht durchgeführten Arbeiten basieren u. a. auf den beiden seitens der DMT bisher durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Thema Dichteschichtung, die in folgenden Berichten dokumentiert sind:

In dem 1998 abgeschlossenen, finanziell mit Mitteln des Landes Nordrhein-Westfalen aus dem Technologieprogramm Bergbau geförderten FuE-Vorhaben „Mittelfristige Entwicklung des Chemismus und der Dichteschichtungen von Grubenwässern in Bergwerken und ihre Auswirkungen auf nutzbares Grund- und Oberflächenwasser“ /3/ konnte anhand von zahlreichen Fallbeispielen nachgewiesen werden, dass in den Wassersäulen gefluteter Schächte Dichteschichtungen vorhanden sind mit scharfen, sprunghaften Grenzen zwischen einzelnen, in sich homogenen Wasserkörpern mit konstanten Mineralisations- und Temperaturverhältnissen. Im Allgemeinen kommt es an den Grenzen zu einer Konzentrations- und Temperaturzunahme mit der Tiefe.

In dem 2003 abgeschlossenen und ebenfalls vom Land NRW finanzierten FuE-Vorhaben „Erstellung numerischer Modelle zur Berechnung von Dichteschichtungen bei einem Grubenwasseranstieg“ (numerische Schichtungsmodellierung) /4/ konnten das generelle Verständnis für Schichtungssphänomene vertieft und die entscheidenden Einflussgrößen identifiziert werden. Die Schichtung in gefluteten Schächten ließ sich mit Simulationsprogrammen aus dem Bereich der Computational Fluid Dynamics (CFD) - wie z. B. CFX-5 der Firma ANSYS, Inc. - modellieren, d. h. nachrechnen und erklären (vgl. Kap. 6.2). Es konnten folgende generelle Aussagen herausgearbeitet werden:

- Innerhalb eines homogenen Schichtungsabschnittes herrscht nicht, wie bisher angenommen wurde, eine gleichmäßige und gleichgerichtete Strömung vor. Vielmehr scheinen einzelne, um sich selbst drehende „Strömungsballen“ chaotisch durch den Wasserkörper zu wabern, die eine Vermischung innerhalb einer Konvektionswalze bewirken und so für homogene Verhältnisse sorgen.
- Die Zu- und Abflüsse sind die sensitivsten Randbedingungen.
- In einem Schachtabschnitt ohne Sohlenanschlüsse und damit ohne Zu- und Abflüsse ist eine sehr langsam verlaufende Vermischung anfänglich evtl. unterschiedlicher Wässer zu erwarten.
- Für einen Schacht mit Sohlenanschlüssen aber ohne Zu-/Abflüsse (z. B. durch abgedämmte Anschlüsse) ist mit einer gewissen

Wahrscheinlichkeit eine Stabilität einer vorhandenen Schichtung zu erwarten; die Sprungschicht liegt im Bereich des Sohlenanschlusses, der einen Bruch der geothermischen Randbedingung darstellt, und sie ist deutlich aufgeweitet.

- Eine kontinuierliche Überschichtung von tiefen hoch mineralisierten Wässern durch Süßwasser kann durch einen kontinuierlichen Zufluss von Süßwasser aus tagesnahen Schachtbereichen erzeugt und auf Dauer stabilisiert werden, wobei das zugeströmte Wasser den Schacht über die Sohlenanschlüsse verlässt.
- Die Mächtigkeit von Sprungschichten wird durch die Anteile der zu- und abfließenden Wässer und durch die Lage zu Sohlenanschlüssen beeinflusst; liegt die Sprungschicht im Niveau eines Sohlenanschlusses und wird sie durch einen Abfluss stabilisiert, hat sie eine geringe Mächtigkeit, d. h. dort ist eine scharfe Ausbildung einer Schichtung zu erwarten.

Es zeigte sich aber auch, dass diese Art der numerischen Modellierung einzelner Schächte äußerst anspruchsvoll im Hinblick auf die Hardwareausstattung ist und jeder Schacht einzeln untersucht und detailliert abgebildet werden müsste. Flächendeckende Aussagen bezüglich Schichtungsphänomene konnten mit dem Werkzeug nicht getroffen werden. Begrenzt durch nicht mehr praktikable Rechenzeiten bei den instationären Simulationen konnten auch nicht alle Fragestellungen hinreichend genau untersucht werden.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Die Prozessgleichung

Die Prozessgleichung zur Beschreibung der dichteabhängigen Strömung und des Stofftransports geht vom Gesetz der Masseerhaltung und einer Beziehung aus, welche die Abhängigkeit des Volumenstromes von Potenzial- oder Spiegeldifferenzen beschreibt (lineare oder turbulente Strömung). Bezuglich der Masseerhaltung bestehen in allen Modellansätzen einheitliche Auffassungen, mit der Besonderheit, dass wegen der Dichte-veränderlichkeit tatsächlich die Masse und nicht das Volumen bilanziert werden muss.

GFI (Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden) schlägt in /5/ vor, das hydraulische Potenzial des UIT-Modells (Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden) durch eine Separierung in einen Druck- und einen Gravitationsterm zu ersetzen und damit auch vertikal in verschiedene Drücke je Teufenniveau zu unterscheiden (Gl. 3-1). Wir möchten hierzu bemerken, dass es zahlreiche (und an Referenzfällen verifizierte, z. B. Hydrocoin) Modelle gibt (z. B. SEAWAT–Aufsatz auf MODFLOW vom U.S. Geological Survey (USGS), Darstellung ebenfalls in der FEFLOW-White-Papers-Dokumentation, S. 154 /6/), welche Dichteefekte auch in der Potenzialdarstellung lösen. Wir schlagen vor, die Potenzialdarstellung nach dem Konzept des „äquivalenten Frischwasserspiegels“ im Boxmodell zu verwenden, dies aber im Gegensatz zum UIT-Modell dreidimensional zu entwickeln (Gl. 3-2). Das Boxmodell verwendet die Spiegeldarstellung von Beginn an, so dass es sehr unzweckmäßig wäre, die langjährige Entwicklung komplett umzuschreiben, ohne dass es hierfür zwingende Gründe gibt.

Darcygesetz (nur vertikal):

Vorschlag /5/, Druckdarstellung:

$$\text{Gl. 3-1: } v_f = (k / \eta) \cdot (\Delta p / \Delta s + g \cdot p)$$

Potenzialdarstellung,  $h$  entsprechend äquivalentem Frischwasserspiegel:

$$\text{Gl. 3-2: } v_f = (k \cdot \rho_f \cdot g / \eta) \cdot (\Delta h / \Delta s + (p - \rho_f) / \rho_f)$$

mit

$$v_f \quad = \text{Filtergeschwindigkeit (nach Darcy) [m/s]}$$

- $\rho$  = Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\rho_f$  = Dichte von nicht mineralisiertem Wasser [g/cm<sup>3</sup>]  
 $k$  = spezifische Permeabilität [m<sup>2</sup>]  
 $\eta$  = dynamische Viskosität [Pa · s]  
 $g$  = Schwerkraftbeschleunigung [9,81 m/s<sup>2</sup>]  
 $\Delta s$  = Gradientenstrecke [m]

Im Boxmodell wird der Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert), die Gradientenstrecke  $\Delta s$  und die rechtwinklig zur Strömungsrichtung stehende durchströmte Fläche zum Komplexparameter Leitwert  $L$  zusammengefasst. Damit kann man die Durchlässigkeit von Streckenverbindungen unter Tage sehr effektiv beschreiben oder auch andere Strömungsgesetze (z.B. turbulente Strömung) alternativ zum Einsatz bringen, indem der Leitwert durch beliebige andere Funktionen ersetzt wird.

Die gesamte diskrete Bilanzgleichung der Masseerhaltung, welche den Stromterm und den Speicherterm zusammenfasst, zeigt die folgende Gleichung. Dabei fällt besonders auf, dass sich der Speicherterm (1. Zeile) im Gegensatz zur einfachen Grundwasserströmung durch das Hinzumultiplizieren der Dichte, welche temperatur- und konzentrationsabhängig ist, in 3 Teilterme aufspaltet:

Gl. 3-3:

$$\begin{aligned} & Sp_g (\Delta h / \Delta t) \Delta V \rho + \phi (\Delta \rho / \Delta c * \Delta c / \Delta t) \Delta V + \phi (\Delta \rho / \Delta T * \Delta T / \Delta t) \Delta V \\ & = \sum \rho [L (\Delta h + \Delta \rho / \rho_f \Delta z)]_n + \rho Q \end{aligned}$$

mit

- $\Delta \rho$  -  $(\rho - \rho_f)$  Dichtedifferenz bezogen auf Frischwasserdichte  
 $\Delta z$  - Gradientenstrecke vertikal [m]  
 $L$  - Leitwert [m<sup>2</sup>/s]  
 $Sp_g$  - Speicherterm [1/m], für gespannte Strömung

$\sum$  bedeutet, dass hier alle möglichen Ströme über die Boxränder summiert werden. Zur Berechnung der Dichte werden die Wirkung der Temperatur und der Konzentration berücksichtigt. Hierzu können die Bestimmungsgleichungen von /1 genutzt werden.

Temperatureinfluss auf die Dichte:

$$\text{Gl. 3-4: } \rho_T = \rho_0 + (65,4891 \cdot T - 8,56272 \cdot T^2 + 0,0593855 \cdot T^3) \cdot 10^{-3}$$

Konzentrationseinfluss auf die Dichte:

$$\text{Gl. 3-5: } \rho = \rho_T + (8,221E-4 - 3,87E-6 \cdot T + 4,99E-8 \cdot T^2) \cdot c$$

mit

T = Temperatur [°C]

c = Konzentration Gesamtmineralisation [mg/L]

Unsere Erfahrungen mit Grubenwässern verschiedener Lagerstätten zeigen jedoch auch, dass die „individuelle“ Zusammensetzung der Wässer Auswirkungen auf ihre Dichte hat, die in der Berechnung mit einem pauschalen Summenparameter nicht berücksichtigt werden. So unterscheiden sich - bei recht ähnlicher Gesamtkonzentration - Wässer mit deutlicher Chlorid-Vormacht in ihrer Dichte durchaus messbar von Wässern mit z. B. deutlicher Sulfat-Vormacht.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass das ursprüngliche Boxmodell nur laminare Strömungsgesetze verwendete. Dies ist eine Konvention, welche bereits vor ca. 20 Jahren beim Erstentwurf des Boxmodells durch C&E Consulting und Engineering GmbH (C&E), Chemnitz, und Geocontrol [CE96] zu Fragen des Auffüllprozesses der Ronneburger Uranlagerstätte vereinbart wurde. Grundlage dieser Konvention war, dass sich die Strömungsrichtung beim Auffüllprozess grundsätzlich nicht ändert, unabhängig davon, ob die Spiegeldifferenz zwischen zwei Boxen 1 mm oder 100 mm beträgt. Damit konnte ein laminares Strömungsgesetz gewählt werden, welches aus praktischer Sicht einen „hydraulischen Kurzschluss“ gewährleistet.

Nunmehr bestehen verfeinerte Fragestellungen des Stofftransportes im nahezu aufgefüllten und damit ausgeglichenen Röhrensystem. Das bereits erwähnte System CFX verwendet beispielsweise turbulente Strömungsgesetze. Auch in den Boxmodellen Ruhr, Saar und Lothringen sind von DMT an wesentlichen Übertrittsstellen turbulente Strömungsgesetze implementiert, die aus den einschlägigen Formeln von „Prandtl“ und „Coolebrook“ abgeleitet sind. Die Umstellung des gesamten Boxmodells ist nicht Aufgabenstellung dieses Projektes und möglicherweise zur prinzipiellen Ein-

schätzung der Verhältnisse auch nicht unbedingt notwendig, wie im Folgenden dargelegt:

Bei der Auswertung des heutigen hydraulischen Regimes fallen Spiegeldifferenzen auf, die in einem offenen Röhrensystem in dieser Größe nicht zu erwarten sind. Die Vermutung, dass dies mit dichteabhängigen Einflüssen zusammenhängen könnte, hat sich nicht bestätigt, da trotz aller Unsicherheiten bei der Umrechnung der dichteabhängigen Potenziale sich die Tendenz der relativ großen Potenzialdifferenzen sogar noch verfestigte.

Wir empfehlen deshalb, auf Basis der vorliegenden Messwerte (noch instationärer Auffüllprozess in der Endphase!) vorerst bei laminaren Strömungsgesetzen zu verbleiben, dafür aber zu prüfen, ob eine Veränderung der Leitwerte eine völlig andere Beurteilung der Situation bewirken würde und beim 3-dimensionalen Röhrensystem die vertikalen und horizontalen Strömungsanteile wegen der unterschiedlichen Gleichungsansätze gleichwertig erfasst werden.

### 3.2 Analytische Lösungen

DMT hat unter Anwendung des Boxmodells für die Flutungsprognosen im Saarländischen und Lothringischen Steinkohlerevier einen pragmatischen Weg eingeschlagen, um die bei den Schichtungsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse für die Prognose in komplexen Bergwerken zu verwerten. Hierbei wurden gemeinsam mit den französischen Firmen Charbonnages de France (CdF), Cesame und ANTEA zahlreiche Referenzbeispiele aus beiden Ländern ausgewertet (u.a. wurde auch das Projekt Freital/Gittersee von WISMUT zur Verfügung gestellt). Es wurde im Rahmen dieser Arbeiten die analytische Lösung des „First Flush“ von YOUNGER (2003) an variable Volumenströme angepasst und in Nachrechnung des tatsächlichen Verlaufes ein Volumenkorrekturfaktor eingeführt. Die Theorie hierzu wird im Folgenden kurz vorgestellt:

Die Methode stellt eine einfache statistische Auswertung von zahlreichen Flutungsbeispielen mit Hilfe der Anpassung einer e-Funktion für Anwendungsbeispiele dar, bei welchen die Grubengeometrien und hydraulischen Bedingungen nicht sehr komplex sind. Nach einer einfachen Abschätzung werden 50 % der maximalen Konzentration an einem Grubenwasseraustrittspunkt nach einer Zeit nach Überlauf des Grubenwassers erreicht, welche der Flutungszeit entspricht (Gl. 3-6).

$$\text{Gl. 3-6: } C(t) = C_0 \cdot e^{-\ln 2 / t \text{ Flutung} \cdot (t - t_0)}$$

mit

$$\begin{aligned} C &= \text{Konzentration [mg/L]} \\ t &= \text{Zeit [s]} \end{aligned}$$

Die oben gemachte Annahme (Gl. 3-6) ist solange gültig, wie der flutende Volumenstrom dem nach der Flutung überlaufenden Volumenstrom entspricht. Unter diesen Bedingungen kann die Zeit für die komplette Ausspülung leicht bestimmt werden. Für davon abweichende Bedingungen wurde eine allgemeinere Methode entwickelt. Das Konzept nutzt die allgemeine Massebilanzgleichung (Gl. 3-7), angepasst an einen beliebigen überströmenden Volumenstrom. Dieses Konzept wurde auch in die Boxmodell-Berechnungen integriert. Die Gleichung der Massebilanz ist:

$$\text{Gl. 3-7: } dC / dt \cdot V = -Q \cdot C$$

mit

$$\begin{aligned} Q &= \text{Volumenstrom [m}^3/\text{s}] \\ V &= \text{Volumen [m}^3] \end{aligned}$$

Die zugehörige analytische Lösung beschreibt die austretende Konzentration als Funktion der Zeit wie folgt:

$$\text{Gl. 3-8: } C(t) = C_0 \cdot e^{-Q/V \cdot (t-t_0)}$$

Wenn man diese Lösung mit der empirischen Gl. 3-6 vergleicht, wird deutlich, dass man die identische mathematische Lösung erhält für die Bedingung „Übertretender Volumenstrom = Flutungsrate“ und somit die Prozesszeit ersetzt durch die Flutungszeit.

Gl. 3-7 repräsentiert damit die allgemeinere Lösung der Massebilanzgleichung und berücksichtigt die tatsächliche Überströmrate nach der Flutung.

Bei der Bewertung von aktuellen Flutungsergebnissen können sehr unterschiedliche Konzentrationsentwicklungen beobachtet werden. Neben weiteren Einflussgrößen wie dem Pyritgehalt ist vor allem entscheidend, welcher Anteil des Resthohlraumvolumens durch den Volumenstrom erfasst wird.

Unsere statistischen Untersuchungen zeigen eine sehr eindeutige Korrelation des Auswaschungsgrades der Grube mit der Intensität der Durchspülung, welche ausgedrückt werden kann durch das Verhältnis „Austrittsvolumenstrom / Hohlraumvolumen“ (Q/V). Erfahrungen aus Deutschland und Südfrankreich waren Anlass, die exponentielle Funktion (Gl. 3-8) anzupassen mittels eines Korrekturfaktors (F) im Exponent, um die speziellen Strömungsbedingungen zu erfassen (Gl. 3-9):

$$\text{Gl. 3-9: } C(t) = C_0 \cdot e^{-Q/(V^*F) \cdot (t-t_0)}$$

Unsere Bewertungen von Flutungssereignissen in großen Kohlegruben deuten an, dass der Korrekturfaktor F reale Ursachen hat. Es scheint eine strenge Abhängigkeit zu geben zur Intensität der Durchströmung, dem Verhältnis „Q/V“. Um die Auswertungen für Prognoserechnungen verfügbar zu machen, musste der Faktor F durch eine Funktion  $F = f(Q/V)$  ersetzt werden. Der Faktor F stellt ein Maß für den Volumenanteil dar, der in Realität gespült wird. Nutzt man diese Näherung, so erhält man eine verbesserte Prognose bei komplexeren Verhältnissen. Der standortspezifische Faktor repräsentiert den Einfluss des Resthohlraumvolumens, welches tatsächlich an der Durchströmung teilnimmt.

Das wesentliche Ergebnis ist hierbei, dass in Abhängigkeit von der „Durchströmungsrate zum Gesamthohlraumvolumen“ sich das tatsächlich an der Spülung teilnehmende Volumen deutlich verändert. Konkret bezogen auf die Aufgabenstellung im Lothringisch-Saarländischen Kohlerevier heißt das, dass große Teile der untersuchten Grubengebäude nicht am Ausspülungsprozess teilnehmen, die Schichtung also intakt bleibt. Neben den Durchströmungsverhältnissen hat die Schwefelkonzentration in Kohle und Nebengestein einen bedeutenden Einfluss auf den Stoffaustausch. Die Grube Victoria aus dem Ruhrgebiet, welche in der folgenden Abbildung mit integriert ist, hebt sich u. a. deshalb so stark von den anderen ab, da der Schwefelgehalt der Ruhr-Kohlen (1,4 M-%) wesentlich höher ist als der in der Lothringischen Kohle. Die anderen Beispielgruben liegen im Schwefelgehalt zwischen 0,5 und 1 M-%.

Streng genommen müssten in der folgenden Abbildung 1 mehrere Kurvenscharen je Schwefelgehalt-Klasse generiert werden, wofür momentan zu wenige ausgewertete Praxisbeispiele mit differierendem Schwefelgehalt zur Verfügung stehen. Versucht man, die Ronneburger Lagerstätte in das Diagramm einzupassen, so steht natürlich die Frage der gegenüber Steinkohlengruben unterschiedlichen mobilisierbaren Stoffvorräte im Vordergrund. Unabhängig von einer solchen Bewertung soll vorab das Verhältnis des entlastenden Volumenstromes (ca.  $105 \text{ m}^3/\text{h} = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ) zum flutbaren bergmännischen Volumen (ca. 30 Mio.  $\text{m}^3$ ) gebildet werden. Damit wird die Grube Ronneburg ebenso wie die Victoriagrube in das folgende Diagramm eingetragen. Der entsprechende Koeffizient für die Grube Ronneburg beträgt ca.  $1 \times 10^{-9} \text{ L/s}$ . Daraus würde sich ein Abminderungsfaktor für das tatsächlich durchströmte Volumen von ca.  $F = 0,25-0,30$  ergeben, der Anteil des durchströmten Grubengebäudes also sehr niedrig liegen.

"Volume-Correction-Factor" to analytical solution  $c = co * \exp(-Q/V/F*T)$

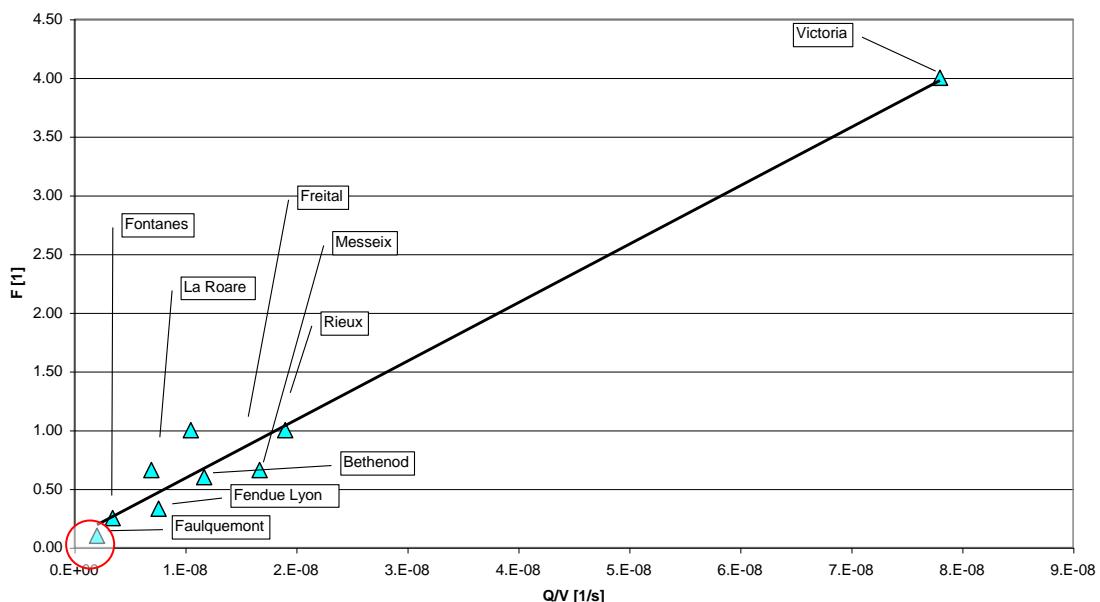


Abbildung 1: Abhängigkeit des an der Ausspülung teilnehmenden Hohlraumvolumens vom Verhältnis „Volumenstrom : Gesamtvolumen“; roter Kreis entspricht den Verhältnissen Ronneburg

Der rote Kreis in Abbildung 1 deutet den Bereich an, in welchem die Grube Ronneburg beim hohen Wasserstand liegen würde. Obwohl die Bewertung des Einflusses des mobilisierbaren Stoffvorrates vor allem in Hinsicht auf die zum Teil durchströmte Innenkippe auferst unsicher ist, lässt sich bei Veränderung der Strömungsverhältnisse anhand der im Diagramm dargestellten Abhängigkeit prüfen, wie sich das von der Durchspülung erfasste Hohlraumvolumen verändert. Damit können unterschiedliche zeitliche Austragskurven generiert werden. Als Beispiel werden im Folgenden die Faktoren „0,3“ und „1“ beachtet (Abbildung 2). Der Faktor „1“ soll hierbei berücksichtigen, dass zwar ein entsprechend geringeres Volumen an der Durchströmung teilnimmt, aber ein dreifach höherer Vorrat als in den Normbeispielen verwendet, vorliegt. Weiterhin wird die Sulfat-Startkonzentration auf 3.000 mg/L gelegt.

**Flutung Ronneburg**  
Sulfatentwicklung bei unterschiedlichen Spülungsverhältnissen der Grube

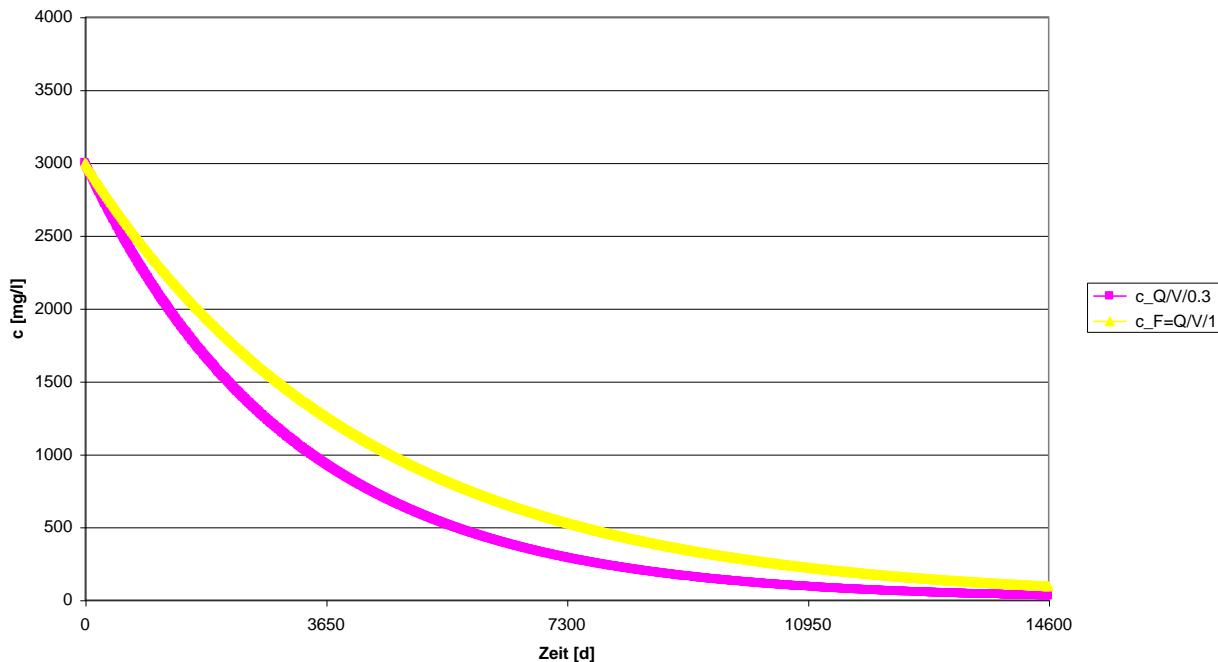


Abbildung 2: Analytische Lösung der Massenbilanzgleichung; der Zeitpunkt  $t = 0$  entspricht dem Beginn des Überlaufes der Flutungswässer im Gessental

Unter diesen Voraussetzungen würde sich die Startkonzentration beim Faktor „0,3“ nach ca. 11 Jahren und beim Faktor „1“ nach ca. 15 Jahren von einem Startwert von 3.000 mg/L Sulfat auf ca. 800 mg/L (langfristiger Zielwert für Einleitung aus der WBA in die Wippe) verringern. Die Unterschiede zwischen Varianten mit differierenden Volumenströmen (z. B. Wiedereinleitung) können so vereinfacht abgeschätzt werden. Als Vorgriff auf alle unten durchgeführten Berechnungen sei hier darauf verwiesen, dass mit diesem Verfahren eine deutlich schnellere Abnahme berechnet würde als mit den numerisch diskreten Modellen. So läge nach Boxmodell-Berechnungen nach 10 Jahren die Austrittskonzentration zwischen 1.500 und 2.000 mg/L Sulfat im Gegensatz zu Konzentrationen von kleiner 1.250 mg/L nach der beschriebenen analytischen Lösung.

Wir gehen zurzeit davon aus, dass die analytische Lösung als erste Orientierung sinnvoll, aber bei Kenntnis der realen Geometrie und Strömungsverhältnisse ein numerisch-diskretes Modell vorzuziehen ist. Hierbei muss aber auf die Unsicherheiten bei den vertikalen Leitwerten verwiesen werden. Unten wird gezeigt, dass, wenn tatsächlich relativ große Strömungs-

widerstände in vertikaler Richtung bestehen, ein sehr schneller Konzentrationsabfall zu erwarten ist, da tiefe Bereiche des Strömungsraumes nach vollständiger Flutung nicht mehr an der Durchströmung teilhaben. Dies ist der Hintergrund, warum bei vielen praktischen Beispielen ein schneller Konzentrationsabfall konstatiert wird und dies ist so auch in der analytischen Lösung enthalten. Dennoch ist diese generalisierende Methode nicht belastbar genug und es ist wegen der Bedeutung der Flutung der Grube Ronneburg geboten, eine individuelle Untersuchung zu führen. Dies bedeutet, dass für eine fallspezifische Modellierung die vertikalen Leitwerte realitätsnah anhand der Spiegeldifferenzen bestimmt werden müssen. Im Falle des Nachweises relativ schlechter vertikaler Wasserwegigkeiten sind aus den numerisch-diskreten Modellberechnungen ebenfalls schnelle Konzentrationsabnahmen zu erwarten.

### 3.3 Hochauflösende CFD-Modellierung

DMT hat in einem speziellen vom Land NRW geförderten Forschungsprojekt zur Dichteschichtung bei Grubenflutungen /4/ Messungen in Schächten der DSK und weiterer Bergbauunternehmen durchgeführt, analysiert und modelltechnisch bearbeitet. Zur Anwendung kamen die heute beide von der Firma ANSYS, Inc. vertriebene Software Fluent 5 und CFX-5, die speziell in Bereichen der Simulation technischer Strömungs- und Verbrennungsprozesse für die verfahrenstechnische Industrie entwickelt wurden. Die erstellten Modelle haben extrem hochauflösend die turbulenten Strömungsverhältnisse im Schacht ebenso wie Dichteeinflüsse und Wärmebewegung im Fluid bzw. zwischen Fluid und Gebirge berechnet. Wegen der Spezifik dieser Prozessanforderungen und der damit verbundenen hohen Auflösung (z. B. Knotenabstände kleiner als 1 cm im Bereich der Schachtwand) ist eine Übertragung dieses Diskretisierungsgrades auf ein gesamtes Bergwerk jedoch nicht möglich. Eine wichtige Erkenntnis dieser Arbeiten war, dass sich eher eine Durchmischung in Form der Konvektionszellen anstelle einer Entmischung in der Schachtröhre einstellt, solange die Situation von keinem Fließfeld überprägt wird, obwohl die anfänglichen Konzentrationsunterschiede größer als 100 g/l waren. Eine langzeitstabile Grubenwasserschichtung konnte nur als Folge spezifischer Strömungsverhältnisse (Zulauf von Wässern mit verschiedenen Wasserqualitäten in verschiedenen Niveaus) nachgewiesen werden.

Die Abbildung 3 gibt eine Vorstellung von der Modellkonzeption:

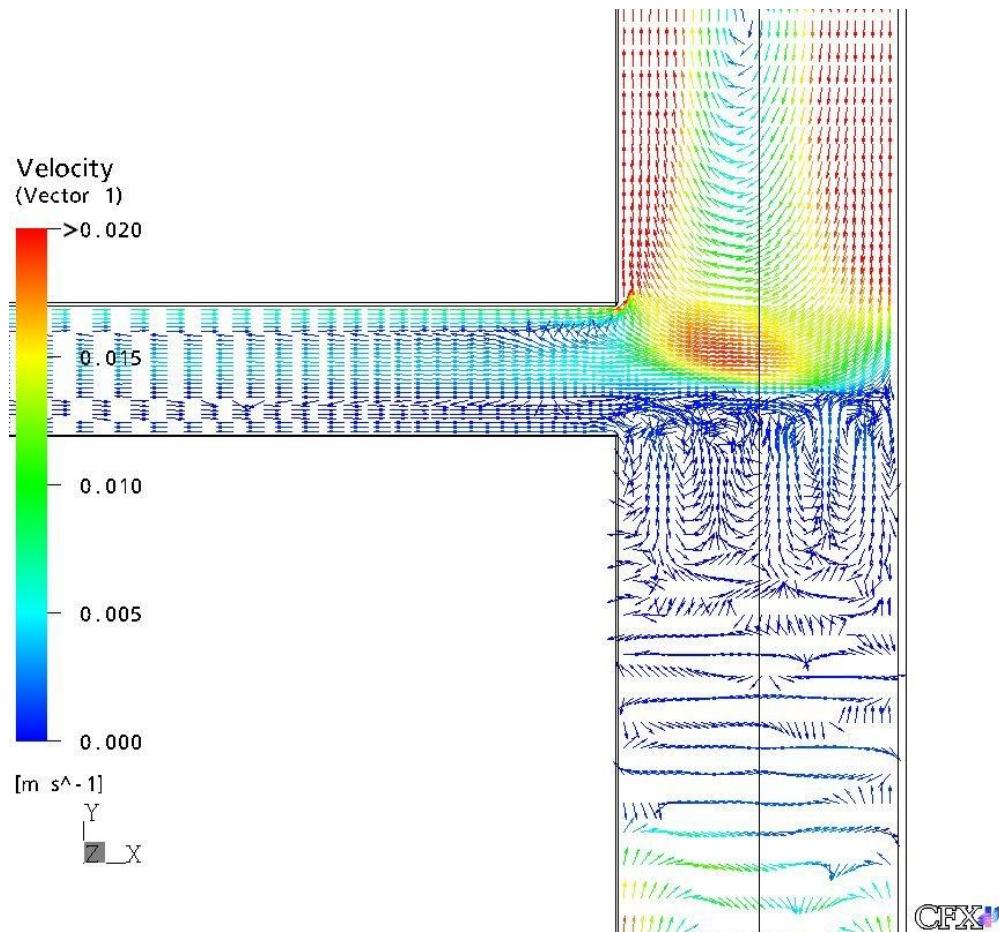


Abbildung 3: Geschwindigkeitsfeld, berechnet mit dem CFX-Simulator /4/

Wir haben das Rechenmodell CFX-5 eingesetzt, um die Modellansätze des Boxmodells zur Berechnung der vertikalen Zirkulation innerhalb einer Box (Absinken von höher mineralisierten Wässern im oberen Bereich der Schachtröhre nach unten und Konzentrationsausgleich) abzustützen.

Nach den bisherigen Erfahrungen ist festzuhalten, dass der Aufwand zur Berechnung einer Fluidströmung unter Berücksichtigung der Dichte- und Wärmeeffekte in einem hoch aufgelösten numerischen Modell für ein gesamtes Bergwerk zurzeit viel zu hoch bzw. nicht zielführend ist. Dies gilt vor allem unter Beachtung der Forderung, dass einige Vergleichsrechnungen in einem akzeptablen Zeitraum vorzunehmen sind.

### 3.4 Physikalische Grundlagen

In /4/ waren für die Modellrechnungen mit CFX die Eigenschaften des Fluids,

- die dynamische Viskosität,
- die spezifische Wärmekapazität,
- die Wärmeleitfähigkeit und
- die Dichte

geeignet zu beschreiben. Diese Eigenschaften bestimmen zum einen das Verhalten der Konvektionsströmung, zum anderen hängen sie von

- der Salzkonzentration (hier i. W. Natriumchlorid (NaCl)),
- der Temperatur und
- dem Druck

des Fluids ab, so dass insgesamt zwölf Zusammenhänge zu untersuchen waren. Im Einzelnen zeigten sich folgende sensitive Abhängigkeiten:

- die dynamische Viskosität von der Salzkonzentration und der Temperatur,
- die spezifische Wärmekapazität von der Salzkonzentration,
- die Wärmeleitfähigkeit von der Salzkonzentration, der Temperatur und dem Druck,
- die Dichte von der Salzkonzentration und der Temperatur.

Eine Veränderung des Drucks führt zu keiner nennenswerten Veränderung der dynamischen Viskosität und ist deshalb vernachlässigbar.

Diese sensitiven Abhängigkeiten der Fluideigenschaften (dynamische Viskosität, Wärmekapazität, spezifische Wärmeleitfähigkeit und Dichte) von Salzkonzentration, Temperatur und Druck mussten im Anschluss quantifiziert werden. Wegen der Verwendung in dem Simulationsprogramm CFX wurde eine geschlossene funktionale Beschreibung dieser Abhängigkeiten angestrebt. Damit wird CFX in die Lage versetzt, mit jedem Rechenschritt die Fluideigenschaften in Abhängigkeit der dann jeweils anzutreffenden Salzkonzentration, Temperatur und Druck zu aktualisieren.

Mit der Unterstützung der Ruhr-Universität Bochum (Lehrstuhl für Numerik), die über spezielle Programmwerkzeuge zur Analyse funktionaler Zusammenhänge bei mehreren Variablen verfügt, wurden die Funktionen zur mathematischen Beschreibung der o. g. Abhängigkeiten bestimmt. Kriterium für die Güte der Anpassungen waren die Abweichungen zwischen den Messwerten (aus den Tabellenwerken) und den zugehörigen berechneten Werten. Diese Abweichungen (Residuen) sind im Zuge der verschiedenen iterativen Anpassungsschritte weiter verkleinert worden. Es wurden die folgenden funktionalen Zusammenhänge ermittelt, die für einen Tempera-

turbereich von 10-50 °C und einer Salzkonzentration zwischen 0 mg/L und 228.000 mg/L anwendbar sind:

#### **Dynamische Viskosität $\eta$ :**

$$\text{Gl. 3-10: } \eta = 1350 + 13x - 250y + 16y^2 + (180 + 0,62x^2)/y$$

#### **Spezifische Wärmekapazität $Cp$ :**

$$\text{Gl. 3-11: } Cp = 4,22 \cdot 10^{-12}s^2 - 5,30 \cdot 10^{-6}s + 4,19$$

#### **Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ :**

$$\text{Gl. 3-12: } \lambda = 0,563 + 0,0019 \cdot (T - 274,65) - 0,0009x + 7,0 \cdot 10^{-10} \cdot (p - 101.325)$$

#### **Dichte $\rho$ :**

$$\text{Gl. 3-13: } \rho = 1,005 + 0,0065x - 0,0030y - 0,00006xy$$

mit

- $\eta$  = dynamische Viskosität [ $10^{-6}$  Pa·s]  
 $Cp$  = spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]  
 $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]  
 $\rho$  = Dichte [g/cm<sup>3</sup>]  
 $p$  = Druck [Pa]  
 $x$  = s/10000  
 $y$  = (T - 273,15)/10  
 $s$  = Salzkonzentration [mg/L]  
 $T$  = Temperatur [K]

In den Technikumsversuchen (Kap. 4.2) werden keine Salzkonzentrationen gemessen, sondern - neben der Temperatur - die elektr. Leitfähigkeit registriert. Die Berechnung der Dichte erfolgt nach STUYFZAND /20/, der folgende Beziehung zwischen gemessener Leitfähigkeit in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und der Dichte  $\rho$  des Wassers benutzt (Gl. 3-14):

$$\text{Gl. 3-14: } \rho = 1000 \cdot (1 + 0,805 \cdot (0,69778E-6 \cdot c) - 6,5E-6 \cdot (T - 4 + 220 \cdot (0,69778E-6 \cdot c))^2)$$

mit

- $\rho$  = Dichte [kg/m<sup>3</sup>]  
 $T$  = Temperatur [°C]  
 $c$  = elektr. Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]

## 3.5 Doppeldiffusion

### 3.5.1 Stand der Forschung

In der Literatur sind zahlreiche Beispiele für das Auftreten der Doppeldiffusion in natürlichen aquatischen Systemen benannt. Der Prozess der Doppeldiffusion ist jedoch nicht nur auf aquatische Systeme beschränkt, sondern ein grundlegender physikalischer Prozess, der in allen Systemen mit Stoffen, die unterschiedliche Diffusivitäten aufweisen, auftritt. So listet etwa die Dalhousie University (Faculty of Science, Dep. of Oceanography) in Halifax, Can., in ihrer „Bibliography of Work Relating to Double-Diffusion“ eine unübersehbare Vielzahl von Arbeiten auf, die sich mit dem Phänomen der Doppeldiffusion in irgendeiner Form auseinandersetzen ([www.phys.ocean.dal.ca/programs/doubdiff/DD-bibliog.html](http://www.phys.ocean.dal.ca/programs/doubdiff/DD-bibliog.html)).

Anfänglich wurden die Auswirkungen der Doppeldiffusion in der Ozeanographie eingeführt. Anhand von Laborexperimenten hat z. B. TURNER (1973) die grundsätzlichen Prozesse der Doppeldiffusion beschrieben und einen Ansatz zur Berechnung des Wärme- und Massenflusses über die doppeldiffusiven Grenzflächen aufgestellt /8/. Im deutschsprachigen Raum beschäftigt sich die EAWAG in Zürich unter der Leitung von WÜEST intensiv mit der Untersuchung doppeldiffusiver Prozesse in Seen /11/, /16/. Im Umfeld der Forschung zur Fluid-Dynamik werden die ablaufenden Prozesse kleinmaßstäblich modelliert.

In Zusammenhang mit den Prozessen und Quantifizierungsansätzen für den Wärme- und Massentransport sind jedoch noch einige Fragen offen. Die überregionale Bedeutung der Doppeldiffusion ist für die Beschreibung von Stoffflüssen im Ozean noch nicht sicher erkennbar /13/, da die den Berechnungsansätzen zu Grunde liegenden Formeln auf konstanten Randbedingungen basieren, die im Ozean nicht existieren.

### 3.5.2 Erläuterung Theorie der Doppeldiffusion

Die Vermischung eines Wasserkörpers ohne Einsatz von äußerer Energie erfolgt makroskopisch durch den Ausgleich von Dichteunterschieden. Es wird angestrebt, den Zustand einer stabilen Wassersäule zu erreichen. Existieren Dichteunterschiede innerhalb einer Wassersäule wird sich das Wasser so sortieren, dass die Dichte von oben nach unten zunimmt. Ohne weitere Einflüsse von außen wird sich auf Dauer jedoch eine einheitliche Dichte im Wasserkörper einstellen.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wird die Dichte des Wassers durch Temperatur und Salzgehalt bestimmt, während der Einfluss des Drucks zu vernachlässigen ist (Gl. 3-13). Wasser wird mit zunehmender Temperatur oder bei abnehmendem Salzgehalt leichter. Kaltes, salziges Wasser hat somit eine höhere Dichte als warmes, gering mineralisiertes Wasser. Je nach Verhältnis von Temperatur und Salinität kann es vorkommen, dass kälteres Wasser über wärmerem Wasser verharrt (wenn der wärmere Wasserkörper sehr salzhaltig ist), als auch salzreiches Wasser über salzarmen stabil ist (wenn das salzreiche Wasser sehr warm ist). Bezogen auf das jeweilige salz- oder temperaturabhängige Verhalten der beiden Parameter liegt dann eine inverse Schichtung vor. Diesem Zustand wird durch die molekulare Diffusion von Wärme und Salz stetig entgegengewirkt, so dass ohne stabilisierende Randbedingungen die inversen Schichtungen aufgehoben werden und sich mit der Zeit eine Wassermasse mit räumlich gleichen Eigenschaften einstellt.

Existieren an der Ober- und Unterseite der Wassersäule jedoch konstante Bedingungen für Wärme oder Salzgehalt, so wird sich für diese Parameter dauerhaft ein Gradient innerhalb der Wassersäule ausbilden. Diese Situation ist zum Beispiel in Seen anzutreffen, die in Bodennähe durch biogene oder geogene Prozesse eine hohe Salinität bei geringen Temperaturen aufweisen (Monimolimnion). Hingegen wird an der Gewässeroberfläche durch Sonneneinstrahlung und niedrig mineralisierte Wasserzutritte (Flüsse/Niederschlag) sehr leichtes Wasser aufschwimmen. Die Schichtung kann dann so stabil sein, dass auch Stürme nicht ausreichend Energie eintragen können, um die Schichtungsverhältnisse aufzubrechen.

Auch sind natürliche Systeme bekannt, in denen am Boden des Sees, z. B. durch den stetigen Eintrag von Thermalquellen, warmes, salziges Wasser unterhalb von kaltem, frischem oberflächennahem Seewasser liegt. Ein Beispiel dafür ist der Lake Nyos in Kamerun, dessen Temperatur- und Salinitätsprofile in Abbildung 4 dargestellt sind /16/. Während bis in 50 m Tiefe eine Durchmischung des Wassers stattfindet, wird unterhalb eine weitestgehend stabile Schichtung von Einzellagen im dm-Bereich beobachtet.

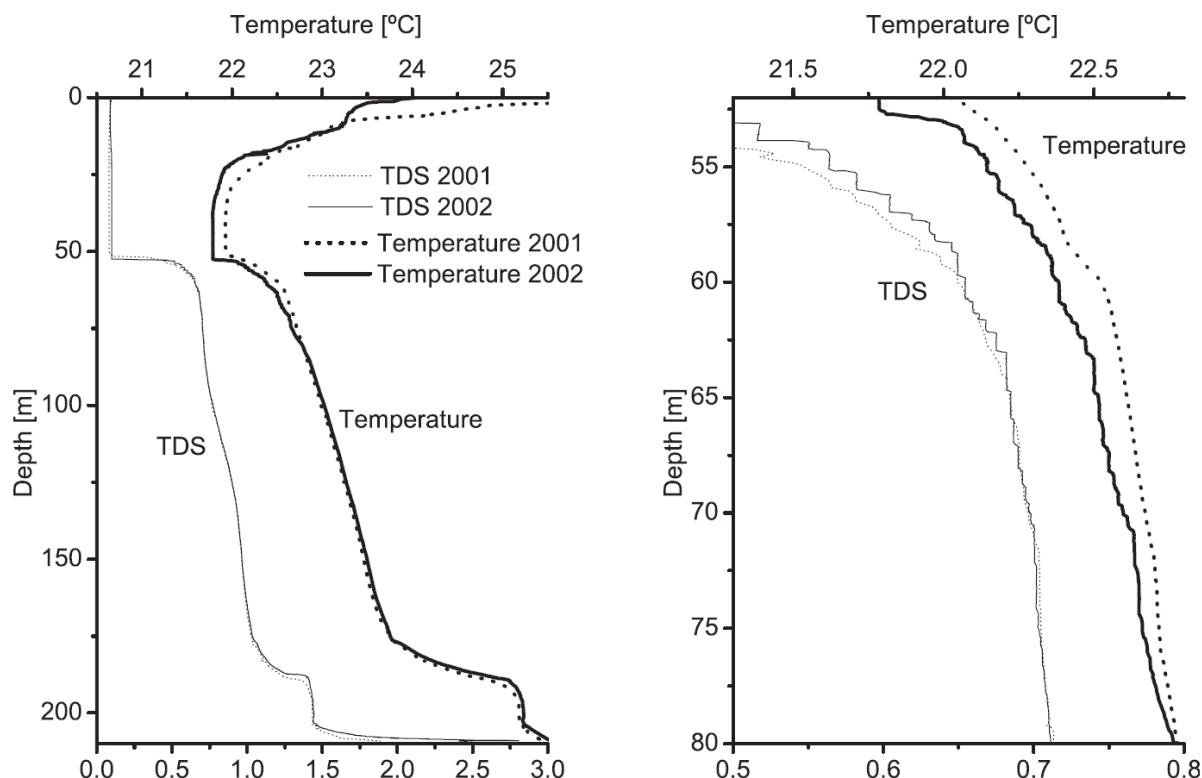


Abbildung 4: Lake Nyos: Temperatur- und Salinitätsprofile über die Tiefe /16/

Verschiedene Dichtekombinationen innerhalb einer Wassersäule sind in Abbildung 5 dargestellt. Die Pfeile zeigen die Richtung des Gradienten bzw. des Flusses an. Liegt schweres (= kalt u. salzig) Wasser über leichterem (= warm u. frisch), kommt es aufgrund der Gravitation zur Vermischung (Fall **a**). Dagegen wird im umgekehrten Fall **b**, bei Überlagerung von gering mineralisiertem, warmem Wasser über kaltem, salzigem Wasser eine sehr stabile Wassersäule erzeugt. Aufgrund der Diffusion wird sich zwischen oberer und unterer fester Randbedingung ein gleichmäßiger gegensinniger Gradient von Temperatur (T) und Salinität (S) ergeben, der zu einem großen  $\Delta\rho$  führt.

Im Fall **c**, warmes salziges Wasser wird überlagert von kaltem frischem Wasser, wirken Salz- und Temperaturfluss nach oben (s. Kap. 3.5.5). Die Wassersäule bleibt stabil, solange die resultierende Dichte des warmen Salzwassers größer ist als die der auflagernden Wasserschicht. Ebenfalls kann der inverse Fall **d** stabil sein, wenn warmes salziges Wasser kaltes frisches Wasser überströmt. Alle Gradienten sind nach unten gerichtet (s. Kap. 3.5.4).

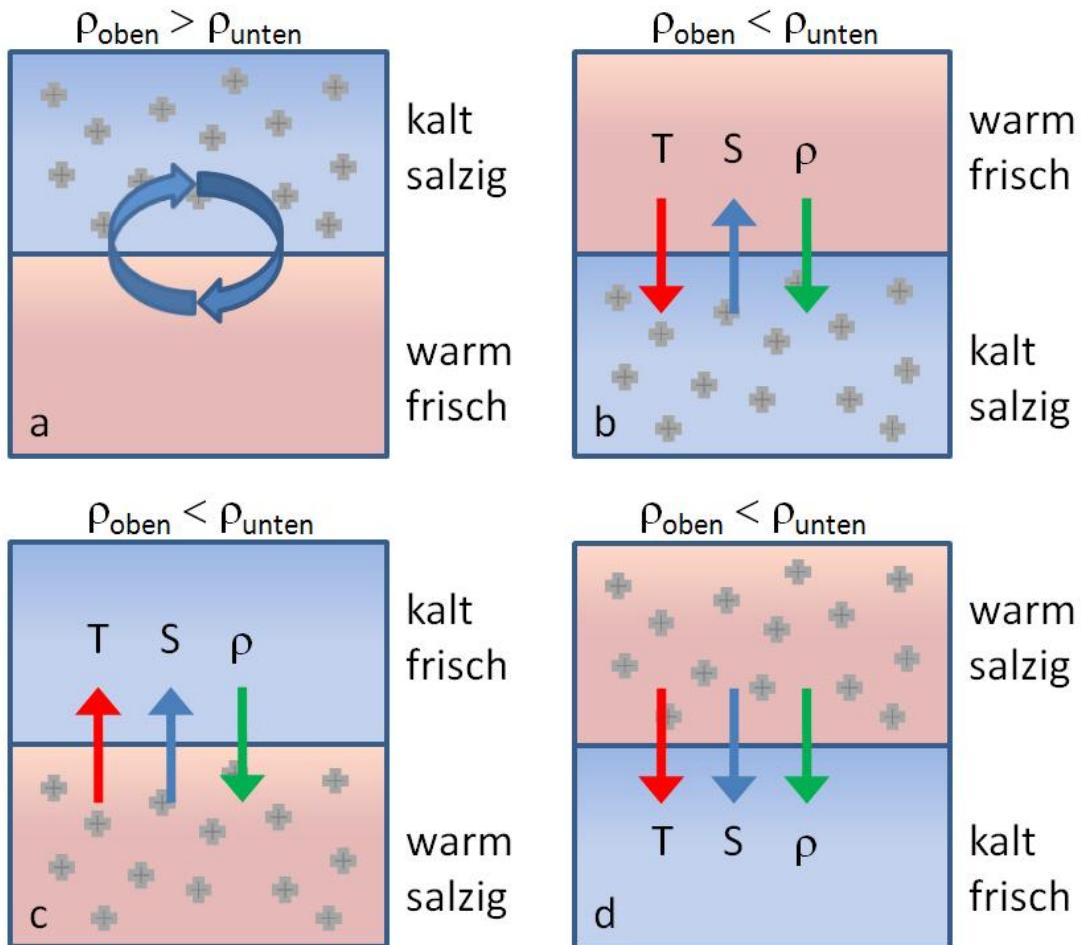


Abbildung 5: Dichtekombinationen

Entscheidend für die Ausbildung eines stabilen Schichtungssystems ist, dass ein stetiger Nachschub (Fluss) an Salz und/oder Wärme erfolgt, und die resultierende Dichte unten höher ist als oben.

Bei den Fällen **c** und **d** wirken die molekulare Diffusion von Wärme und Salz in die gleiche Richtung. Bezogen auf die stabile Dichteschichtung des Wassers wirken die beiden Diffusionen jedoch gegensätzlich. Die daran gekoppelten Prozesse werden allgemein als Doppeldiffusion bezeichnet. Tritt diese Gegebenheit in einer Wassersäule ein, wird der Transport von Salz und Wärme nicht nur durch die jeweiligen Diffusionskoeffizienten bestimmt, da der Austauschprozess an den Grenzflächen zwischen den Schichtpaketen sehr intensiv ist.

Die dargestellten Situationen sind stark vereinfacht und bilden nur die Bedingungen entlang einer Grenzfläche ab. In einer größeren Wassersäule werden sich zwischen den Einspeisepunkten (Randbedingungen mit einer Flussrate von S und/oder T) viele Grenzflächen entwickeln.

### 3.5.3 Auftreten doppeldiffusiver Prozesse

In der Grenzfläche zwischen zwei Schichtpaketen entsteht durch den steigen Ausgleich der Auftriebskräfte eine Schwingung, die durch den Parameter  $N^2$  (**Stabilitätsfrequenz**, auch Brunt-Väisälä- oder Buoyancy-Frequency genannt) beschrieben wird /11/.

$$\text{Gl. 3-15: } N^2 = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = g \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial z} - \beta \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad [\text{s}^{-2}]$$

mit

$T$ [°C]	Temperatur
$c$ [mg/L]	Konzentration
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$l_f$ [μS]-> $k_{20}$	Leitfähigkeit
$Z$ [m]	Lagepotenzial
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Thermischer Expansionskoeffizient
$\beta$ (S/cm) <sup>-1</sup>	spezifische Ausdehnungskoeffizient

Die Stabilitätsfrequenz setzt sich aus zwei Termen zusammen. Der **Temperaturterm** steuert den temperaturbedingten Einfluss auf den Dichtegradienten, die salinitätsbedingte Veränderung der Gesamtdichte wird durch den **Salinitätsterm** bestimmt. Der thermische Expansionskoeffizient  $\alpha$  sowie der spezifische Ausdehnungskoeffizient  $\beta$  bestimmen das wärme- bzw. salinitätsbedingte Verhalten der beiden Terme.

Die Energie für die Bewegungen an den Grenzflächen wird durch die Teilkomponente erzeugt, die oben schwerer ist, auch wenn die Gesamtdichte oben geringer ist /9/.

Der thermische Expansionskoeffizient  $\alpha$  beschreibt die relative Dichteänderung des Wassers pro Temperaturänderung (Gl. 3-16). Da eine Dichtezunahme mit Kompaktion einhergeht, wird ein negatives Vorzeichen zur Beschreibung der Expansion genutzt.

$$\text{Gl. 3-16: } \alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

Oberhalb der Temperatur bei Dichtemaximum  $T_{\rho_{\max}}$  ist  $\alpha$  daher positiv (Abbildung 6).

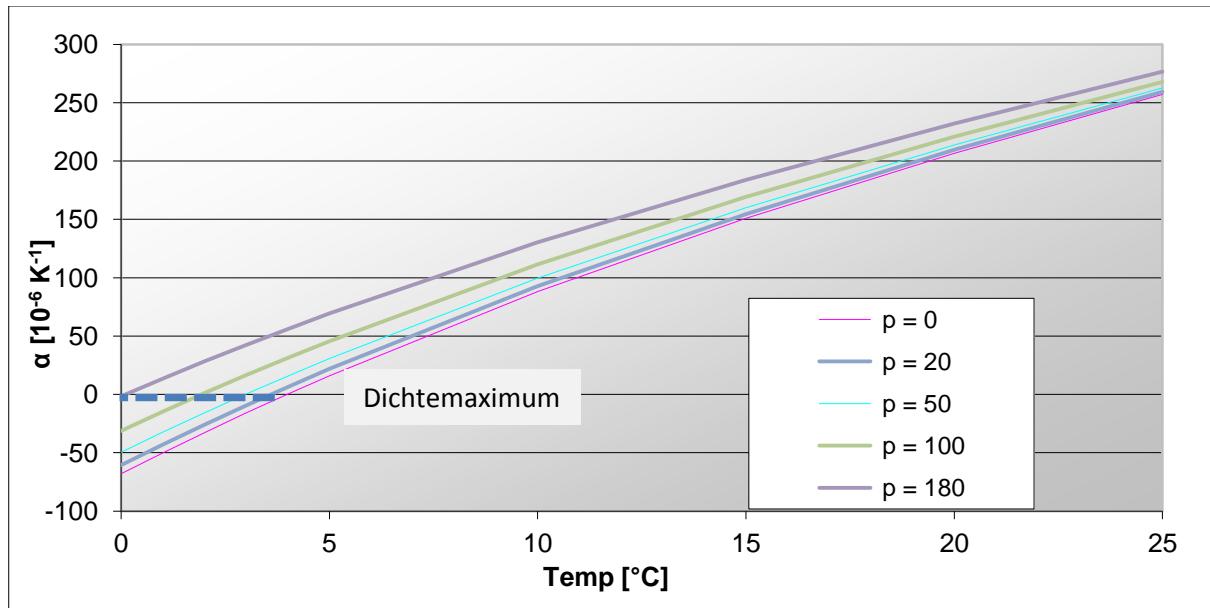


Abbildung 6: Thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha(T,p)$

Der spezifische Ausdehnungskoeffizient  $\beta$  wird durch den Dichtegradient und dem Maß an Mineralisierung bestimmt (Gl. 3-17). Die Mineralisation ist hier als Leitfähigkeit berücksichtigt. Genauso wäre die Verwendung von Konzentrationen möglich, da bei Bildung des Salinitätsgradienten diese Größe aufgelöst wird.

$$\text{Gl. 3-17: } \beta_{\kappa} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{dp}{dk_{20}} \right)$$

Zur Differenzierung, welcher Term entscheidend für die Stabilisierung der Wassersäule ist, hilft das **Stabilitätsverhältnis  $R_p$**  (auch als „Turner number“ bezeichnet /15/). Bei Zahlen über 1 ist der obere Term stabilisierend. Bei Zahlen zwischen 0 und 1 ist der Nenner des Quotienten stabilisierend. In der Literatur wird dann oft der Quotient invertiert, um eine vergleichbare Größe zu erhalten. Wir sehen es hingegen als Vorteil, den Quotienten unabhängig von der Stabilität der einzelnen Komponenten zu betrachten. Daher wird in allen weiteren Betrachtungen  $R_p$  eindeutig wie folgt definiert (Gl. 3-18):

$$\text{Gl. 3-18: } R_p = \left( \frac{\alpha \frac{\delta T}{\delta z}}{\beta \frac{\delta S}{\delta z}} \right)^{\pm 1} \rightarrow R_p = \left( \frac{\alpha \frac{\delta T}{\delta z}}{\beta \frac{\delta S}{\delta z}} \right)$$

Liegt  $R_p$  zwischen 0,01 und 1 ist von Doppeldiffusion auszugehen. Unterhalb von  $R_p = 0,01$  ist das System sehr stabil. Ein Transport erfolgt entlang der jeweiligen Gradienten auf Basis von rein molekularen Prozessen. Gerät das Stabilitätsverhältnis  $R_p$  in den Bereich größer 0,5 wird das System zunehmend labil, wobei die Stabilität der Wassersäule aber noch beibehalten wird.

Ein wichtiger Punkt ist die Auswirkung der Doppeldiffusion. Trotz einer stabilen Schichtung wird durch Kopplung von diffusiven und konvektiven Prozessen ein hohes Maß an Wärme- und Massentransport erreicht.

Die mikroskopische Situation entlang der Grenzfläche für die beiden Phänomene „salt finger“ und „Diffusive convection“ wird nachfolgend erläutert.

### 3.5.4 Salzfinger

Liegt, wie in Abbildung 7 dargestellt, eine warme salzige Schicht (WS) über einer kalten frischen Schicht (KF), kommt es zur Bildung sogenannter Salzfinger. Warme salzige Wassertropfen tauchen in die unterlagernde Schicht ein (Abbildung 8). Durch die im Vergleich zur Salinität höhere Diffusivität von Wärme gibt dieser Tropfen die Wärme schnell nach außen ab. Der salzige Tropfen wird durch den zunehmenden Wärmeverlust immer schwerer und sinkt beschleunigt ab. Parallel wird ein Wassertropfen Wärme aufnehmen, somit zunehmend leichter und nach oben ausgelenkt. Es resultiert ein nach unten gerichteter Salinitätsfluss und im geringerem Maße ein ebenso ausgerichteter Wärmefluss. Dieser Prozess hält die Stabilität aufrecht, d. h. er stabilisiert den Dichtekontrast zwischen der oberen und der unteren Schicht.

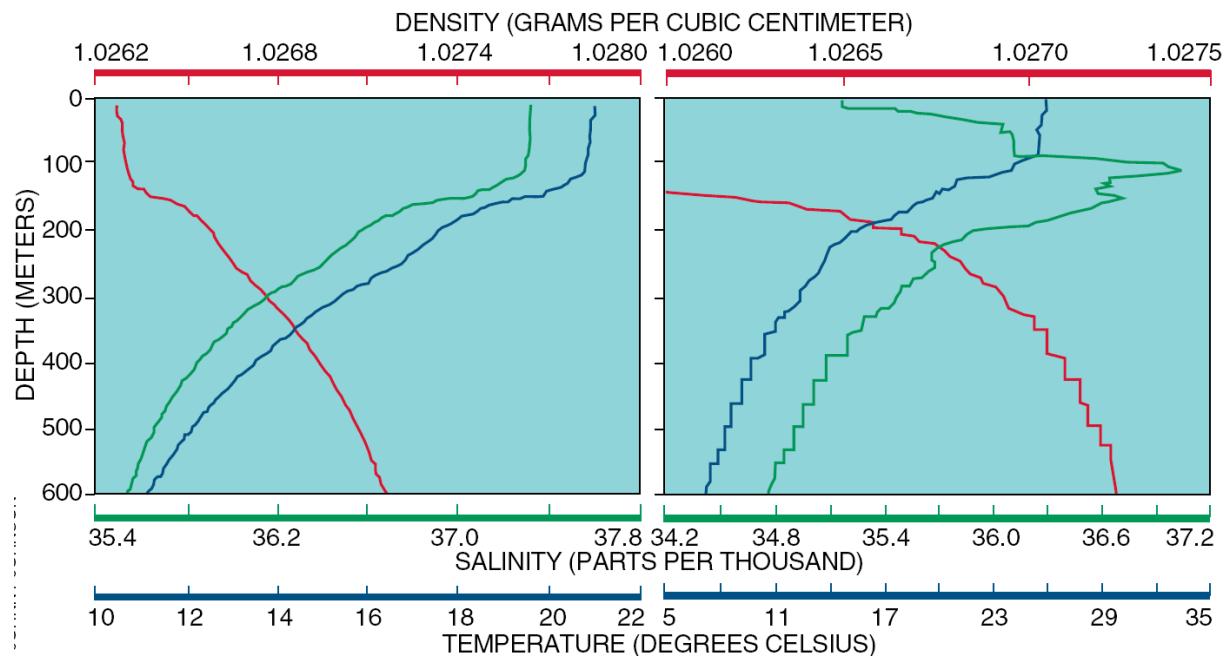


Abbildung 7: Beispiel für thermohaline Treppenstufen durch Salzfinger /18/

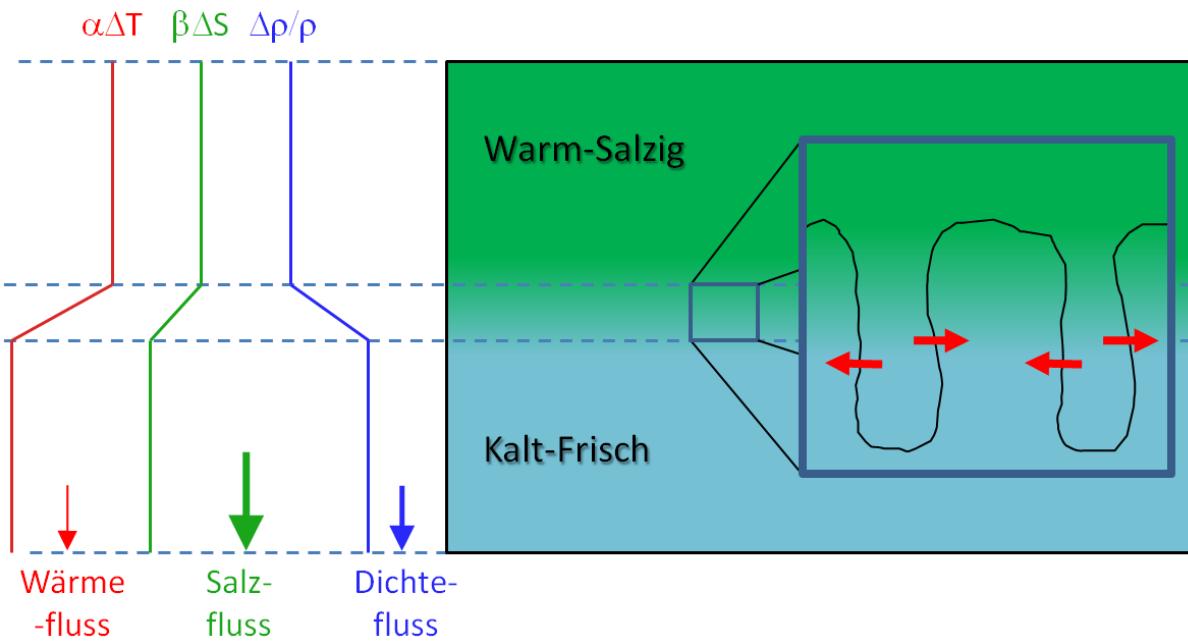


Abbildung 8: Salzfinger, verändert nach /14/

### 3.5.5 Diffusive Konvektion

Liegt eine WS-Schicht unterhalb einer KF-Schicht kann sich ebenfalls ein stabile Schichtung ergeben.

Im Übergang zwischen den Schichten werden Temperatur- und Salinitäts-sprünge oder Treppen beobachtet, sog. Staircases, die gut durchmischte Wasserschichten (Layer) voneinander abgrenzen. Die Temperatur und die Salinität nehmen innerhalb der gesamten Wassersäule nach oben hin ab. Der Übergangsbereich zwischen den Layern wird jeweils von einer Grenzschicht mit relativ hohem Gradienten gebildet, dem sog. „Diffusiven Kern“ (Abbildung 9).

Wie bei den Salzfingern entsteht in diesem Kontaktbereich eine Schwingung durch vertikale Bewegungen von Wasserpaketen. Wird ein warmes salziges Wasserpaket nach oben in die KF-Schicht ausgelenkt, gibt es Wärme schneller an die kältere Umgebung ab als es Salz verliert und wird somit wieder schwerer. Es fällt wieder in die Ausgangsposition zurück und nimmt dort wieder Wärme auf. Die bei diesem Prozess entstehende Schwingung lässt sich mit der **Stabilitätsfrequenz** (Gl. 3-15, S. 36) beschreiben.

Die Entstehung der Schichten wird nach /14/ wie folgt beschrieben: Bei konstantem Wärme- und Salzzufluss von unten (z. B. aus dem Sediment oder Thermalwasser), wird sich die überlagernde KF-Schicht zunehmend aufheizen und aufkonzentrieren. Dieser Vorgang wird beendet, sobald der Wärmefluss innerhalb der Stufe die gleiche Größe wie der Wärmefluss von unten hat. Über dieser Schicht liegt wiederum eine kalte-frische Schicht, die über einen Diffusionskern erwärmt wird. Dieser Vorgang kann sich beliebig wiederholen, so dass es zur Treppenbildung kommt.

Dieser Zustand bedeutet eine Angleichung der beiden gegensätzlichen Zustände von oben und unten, ohne dass ein dauerhaft aktiver Transport von Wärme und Salz erfolgt.

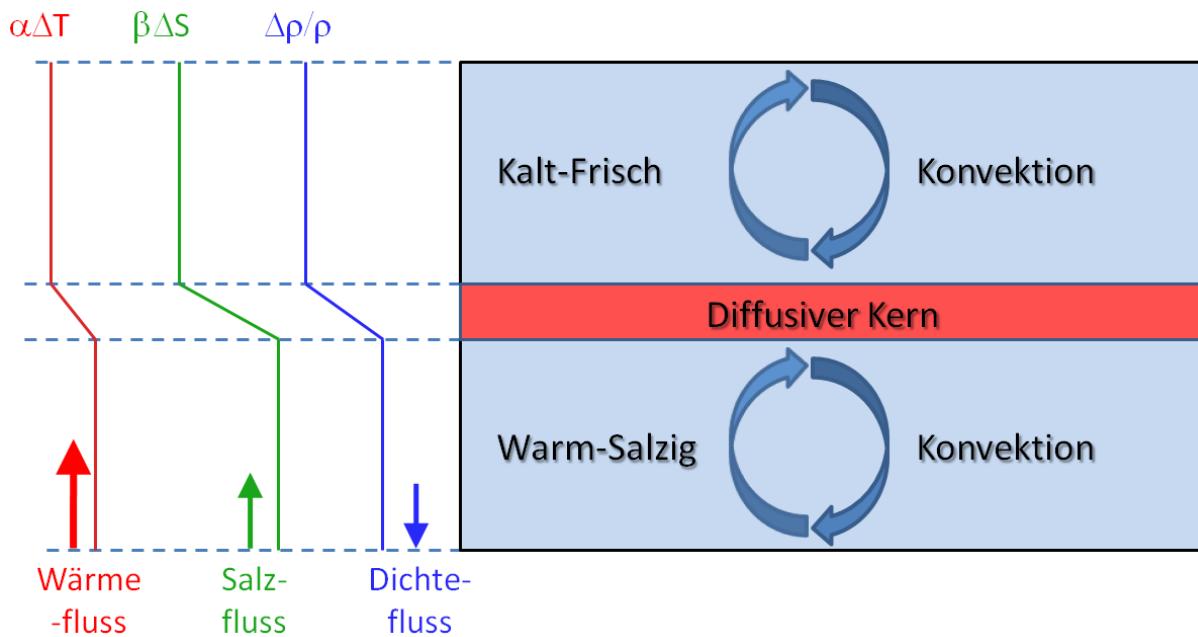


Abbildung 9: Diffusive Konvektion, verändert nach /14/

### 3.5.6 Berechnungsansatz zur Einbindung doppeldiffusiver Prozesse

Die Doppeldiffusion führt zu einer Steigerung der effektiven Stoff- und Wärmeflüsse in einer Wassersäule.

Eine allgemeingültige großskalige Parametrisierung ist für den DC-Typ gut ableitbar. Hier ist eine Abhängigkeit an den Salz- und Temperaturgradienten herstellbar, die in experimentellen Messungen und im Feldversuch bestätigt wurden. Im Gegensatz dazu ist für das Salzfingerregime ein vereinfachter Ansatz schwierig, da wahrscheinlich lokale Bedingungen großen Einfluss auf die Salzfinger haben /13/.

Im Projekt wird eine Berechnung nach /16/ genutzt, die eine Weiterentwicklung der Flussberechnungen nach /10/ darstellt. Die Grundlage für die Gleichungen bilden Messdaten aus vertikalen Messprofilen in unterschiedlichen Schichtungsbedingungen im Ozean. Die Formel stellt die effektive Diffusivität von Wärme und Salz in Abhängigkeit des Stabilitätsverhältnisses  $R_p$  und erlaubt die aus den Technikumsversuchen abgeleiteten Stabilitätsverhältnisse  $R_p$  zu verwenden.

Ermittlung der thermischen Diffusivität bei Doppeldiffusion /16/:

$$\text{Gl. 3-19: } K_T^{DD} = C \cdot R_a^{1/3} \cdot k_T$$

$$\text{Gl. 3-20: } C = 0,0032 \exp(4,8 / R_p^{-0,72})$$

$$\text{Gl. 3-21: } R_a = 0,25 \cdot 10^9 \cdot R_p^{-1,1}$$

Ermittlung der Salz-Diffusivität bei Doppeldiffusion

$$\text{Gl. 3-22: } K_S^{DD} = \gamma_{diff} * R_p * K_T^{DD}$$

$$\text{Gl. 3-23: } \gamma_{diff} = \frac{\beta F_S^{DD}}{\alpha \beta F_\Theta^{DD}} = \frac{R_p^{-1} + 1,4(R_p^{-1} - 1)^{\frac{3}{2}}}{1 + 14(R_p^{-1} - 1)^{\frac{3}{2}}}$$

In Abbildung 10 ist die Auswirkung der doppeldiffusiven Prozesse auf die effektiven Diffusionskoeffizienten dargestellt. Bei einem Stabilitätsverhältnis  $R_p$  von  $>0,01$  (hohe Stabilität wird durch hohen Salzgradienten nach oben bestimmt) unterscheidet sich der Wärme- und Massenfluss nur unwesentlich von den nicht diffusiven Zuständen. Mit Abnahme der Stabilität nehmen die effektiven Flüsse über die Grenzschicht stark zu. Der größte Anstieg erfolgt beim Salz, dessen Diffusionskoeffizient von  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  bis auf  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  zunimmt. Durch die zunehmend geringeren Gradienten reagiert das System oberhalb eines Stabilitätsverhältnisses  $R_p = 0,4$  /11/ sehr empfindlich und kann schnell in einen konvektiven System umschlagen.

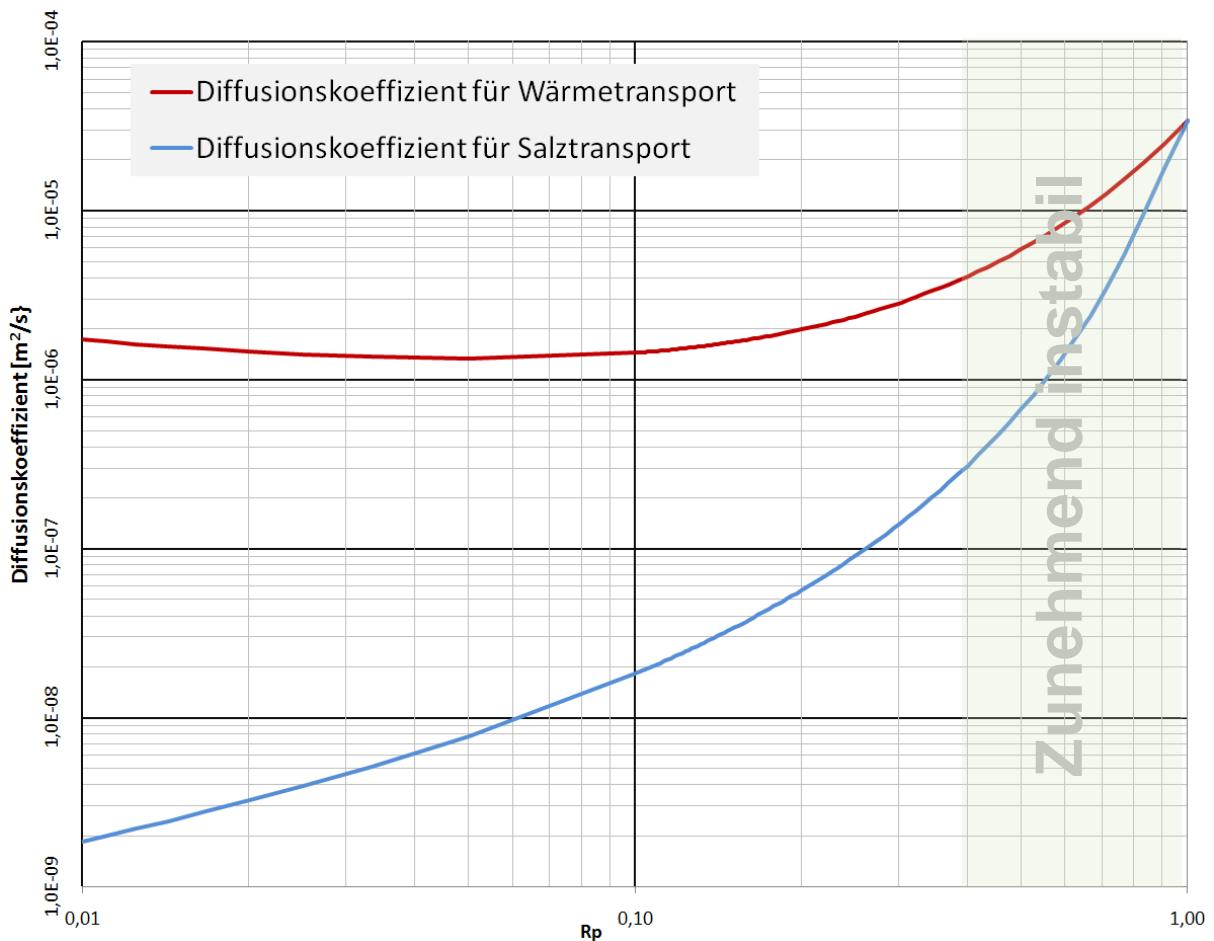


Abbildung 10: Verhältnis der Diffusivitäten bei unterschiedlichen T/S-Kombinationen (ausgedrückt durch  $R_p$ )

Für die modelltechnische Betrachtung der Konzentrationsentwicklung in gefluteten Schächten müssen diese Veränderungen der Diffusionskoeffizienten Berücksichtigung finden. Die Doppeldiffusion macht sich insofern bemerkbar, als dass trotz der höheren Dichte des tiefen Grubenwassers ein starker Salztransport in das oberflächennahe Grundwasser erwartet werden kann.

### 3.6 Boxmodell

#### 3.6.1 Formelmäßige Darstellung der dichteabhängigen Strömung

Die Prozessgleichung zur Beschreibung der dichteabhängigen Strömung und des Stofftransports geht vom Gesetz der Masseerhaltung und einer Beziehung aus, welche die Abhängigkeit des Volumenstromes von Potenzial- oder Spiegeldifferenzen beschreibt (lineare oder turbulente Strö-

mung). Bezuglich der Masseerhaltung bestehen in allen Modellansätzen einheitliche Auffassungen, mit der Besonderheit, dass wegen der Dichte- veränderlichkeit tatsächlich die Masse und nicht das Volumen bilanziert werden muss.

Ein Ansatz zur Berechnung der dichteabhängigen Strömung sieht vor, das hydraulische Potenzial durch eine Separierung in einen Druck- und einen Gravitationsterm zu ersetzen und damit auch vertikal in verschiedene Drücke je Teufenniveau zu unterscheiden. Wir möchten hierzu bemerken, dass es zahlreiche (und an Referenzfällen verifizierte, z. B. Hydrocoin) Modelle gibt (z.B. SEAWAT–Aufsatz auf MODFLOW von USGS, Darstellung ebenfalls in der FEFLOW-White-Paper-Dokumentation, S. 154 /6/), welche Dichteefekte auch in der Potenzialdarstellung lösen. Wir schlagen vor, die Potenzialdarstellung nach dem Konzept des „äquivalenten Frisch- wasserspiegels“ im Boxmodell zu verwenden. Das Boxmodell verwendet die Spiegeldarstellung von Beginn an, so dass es sehr unzweckmäßig wäre, die langjährige Entwicklung komplett umzuschreiben, ohne dass es hierfür zwingende Gründe gibt.

Darcygesetz (nur vertikal):

$$\text{Gl. 3-24: } v_f = (k/\eta) \cdot (\Delta p / \Delta s + g \cdot p) \quad \text{Druckdarstellung}$$

$$\text{Gl. 3-25: } v_f = (k \cdot \rho_o \cdot g/\eta) \cdot (\Delta h / \Delta s + (\rho - \rho_o) / \rho_o) \quad \text{Potenzialdarstellung, } h \text{ entsprechend äquivalentem Frisch- wasserspiegel}$$

mit

- $v_f$  - Filtergeschwindigkeit (nach Darcy)
- $\rho$  - Dichte [ $\text{g/cm}^3$ ]
- $\rho_o$  - Dichte von nicht mineralisiertem Wasser [ $\text{g/cm}^3$ ]
- $k$  - spezifische Permeabilität [ $\text{m}^2$ ]
- $\eta$  - dynamische Viskosität [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

Zur Berechnung der Dichte muss die Wirkung der Temperatur und der Konzentration berücksichtigt werden. Hierzu können die Bestimmungs- gleichungen von /1/ genutzt werden. Eine ausführliche Zusammenstellung von Formeln zur Berechnung der Dichte in Abhängigkeit von Temperatur und Konzentration ist im nächsten Kapitel 3.6.2 zu finden.

Temperatureinfluss:

$$\text{Gl. 3-26: } \rho_T := \rho_0 + (65,4891 \cdot T - 8,56272 \cdot T^2 + 0,0593855 \cdot T^3) \cdot 10^{-3}$$

Konzentrationseinfluss:

$$\text{Gl. 3-27: } \rho := \rho_T + (8,221E-4 - 3,87E-6 \cdot T + 4,99E-8 \cdot T^2) \cdot c$$

mit

T - Temperatur [°C]

c - Konzentration Gesamtmineralisation [mg/L]

Erfahrungen mit Grubenwässern verschiedener Lagerstätten zeigen jedoch auch, dass die „individuelle“ Zusammensetzung der Wässer Auswirkungen auf ihre Dichte hat, die in der Berechnung mit einem pauschalen Summenparameter nicht berücksichtigt werden. So unterscheiden sich - bei recht ähnlicher Gesamtkonzentration - Wässer mit deutlicher Chlorid-Vormacht in ihrer Dichte durchaus messbar von Wässern mit z. B. deutlicher Sulfat-Vormacht.

### 3.6.2 Abhängigkeit der Dichte von Temperatur und Konzentration

**[SEAWAT]** - Dichteformel nach BAXTER

$$\text{Gl. 3-28: } \rho = \rho_f + E \cdot C$$

mit

**E** = dimensionslose Konstante  $\approx 0,7143$  für Salzkonzentrationen

**C** = Salzkonzentration [ $\text{M}\text{L}^{-3}$ ]

**$\rho_f$**  = 999,84298 g/l

**Luckner - GFI** - Studie Überprüfung der bei der Flutung des Grubengebäudes Ronneburg angewendeten Verfahren zur Probenahme, Analyse und Auswertung von Wasserproben vor dem Hintergrund der beobachteten Schichtung des Flutungswassers, Prof. Dr.-Ing. habil. L. Luckner, Dresden, 3. Juli 2002 /5/

$$\Delta\rho_{c_{\text{TDS}}} = (8,221 \cdot 10^{-4} - 3,87 \cdot 10^{-6} T + 4,99 \cdot 10^{-8} T^2) \Delta c_{\text{TDS}}$$

$\Delta\rho_{\text{TDS}}$  in g/L, T in °C und  $c_{\text{TDS}}$  in mgTDS pro L

Für die Bestimmung der Dichte von Wasser in Abhängigkeit seiner Temperatur und der Wasserinhaltsstoffe wird von COLE (1995) ein vereinfachter Ansatz in folgender Form angegeben:

$$\rho = \rho_{T_w} + \Delta\rho_{c_{TDS}}$$

mit

$\rho$  Dichte in g/L

$\rho_{T_w}$  Dichte von Wasser als Funktion der Temperatur in g/L

$\Delta\rho_{c_{TDS}}$  Dichteanteil der gelösten Stoffe in g/L.

Für den temperaturabhängigen Dichteanteil wird dabei die von GILL aufgestellte Näherung genutzt:

$$\rho_{T_w} = 999,8452594 + 6,793952 \cdot 10^{-2} T_w - 9,095290 \cdot 10^{-3} T_w^2 \quad ($$
  
$$+ 1,001685 \cdot 10^{-4} T_w^3 - 1,120083 \cdot 10^{-6} T_w^4 + 6,536332 \cdot 10^{-9} T_w^5$$

Die Berechnung des Dichteanteils der gelösten Stoffe wird bei COLE (1995) mit dem Summenparameter TDS (Total Dissolved Solids – Summe aller gelösten Stoffe) vorgenommen. Dazu wird folgende Vorschrift angewendet:

$$\Delta\rho_{TDS} = (8,221 \cdot 10^{-4} - 3,87 \cdot 10^{-6} T_w + 4,99 \cdot 10^{-8} T_w^2) \Phi_{TDS}$$

mit

$\Phi_{TDS}$  TDS in mg/L.

**UIT** - Modellkalibrierung und Variantenrechnungen zur Flutung im Grubenkomplex Ronneburg, UIT GmbH Dresden, Dresden, Juli 2005 /7/

Die Dichte einer wässrigen Lösung als Funktion von Temperatur T und den gelösten Spezies mit der Konzentration  $c_k$  (für jedes Ion, Molekül, Komplex) ist gegeben durch den Produktansatz

$$\text{Gl. 3-29: } \rho(T, c_1, c_2, \dots) = \rho_0(T) [1 + \beta_1 c_1 + \beta_2 c_2 + \dots]$$

wobei der erste Faktor die Temperaturabhängigkeit beschreibt:

$$\text{Gl. 3-30: } \rho_0(T) = \rho_0 [1 - \alpha T] \quad \text{mit} \quad \rho_0 = 1 \text{ kg dm}^{-3}$$

Der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  ist selbst eine Funktion der Temperatur und des Druckes, wobei sein Vorzeichen bei  $T = 3,9839^\circ\text{C}$

wechselt: Oberhalb dieser Temperatur nimmt bei Erwärmung die Dichte bekanntlich ab, und es gilt  $\alpha > 0$ ; unterhalb dieser Temperatur kehrt sich das Ganze um, und es gilt  $\alpha < 0$  (so ist  $\alpha = 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  für  $T = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  und 10 bar). In Modellrechnungen ist es üblich, Gl. 3-30 durch einen einfachen Potenzansatz zu approximieren (siehe [LIG95], Seite 91):

Gl. 3-31:

$$\rho_0(T) = 999,84298 + [65,4891T - 8,56272T^2 + 0,059385T^3] \cdot 10^{-3} [\text{kg/m}^3]$$

Diese im Programm RON verwendete Näherungsformel besitzt für den Temperaturbereich von 1 bis 20  $^{\circ}\text{C}$  eine hohe Genauigkeit (etwa  $2 \cdot 10^{-6}$ ).

Die Abhängigkeit von der Mineralisation bzw. dem Salzgehalt der wässrigen Lösung steckt in den Koeffizienten  $\beta_k$  von Gl. 3-29. Auf Grund der großen Anzahl an gelösten Spezies vereinfacht man Gl. 3-29 auf die Form:

$$\text{Gl. 3-32: } \rho(T, C_{\text{TDS}}) = \rho_0(T) [1 + \beta C_{\text{TDS}}] = \rho_0(T) + \rho_s$$

mit dem Salzgehalt bzw. TDS („Total Dissolved Solids“) g/L:

$$\text{Gl. 3-33: } C_{\text{TDS}} = \sum_{\text{alle Spezies } k} c_k$$

als Gradmesser für die Mineralisation. Während  $\rho_0$  die Temperatur-Abhängigkeit von  $\text{H}_2\text{O}$  beschreibt, repräsentiert  $\rho_s$  die Dichte-Zunahme aufgrund der gelösten Stoffe.

Da sowohl die einzelnen Koeffizienten  $\beta_k$  als auch die Funktion von  $\beta$  nicht exakt bekannt sind, wird in erster Näherung folgender Ansatz gemacht:

$$\text{Gl. 3-34: } \beta_k = \beta \text{ für alle } k \text{ mit } \beta \leq 0,001 (\text{g/L})^{-1}$$

Der obere Grenzwert  $\beta = 0,001$  ergibt sich aus der Annahme, dass sämtliche gelöste Spezies sich exakt in die Lücken der „Molekulgitterstruktur“ des Wassers einordnen. In der Realität vergrößern aber die gelösten Stoffe die Abstände der  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle untereinander, so dass das Volumen des Lösungsmittels Wasser zunimmt und demzufolge für die meisten Spezies  $\beta_k < 0,001 \text{ L/g}$  gilt (für einige gelöste Gase ist  $\beta_k$  sogar negativ). Zur Abschätzung von  $\beta$  eignet sich der Ansatz für  $\rho_s$  nach [Co95]:

$$\text{Gl. 3-35: } \rho_s = (8,221 \cdot 10^{-4} - 3,87 \cdot 10^{-6} T + 4,99 \cdot 10^{-8} T^2) \cdot C_{\text{TDS}}$$

wobei  $\rho_s$  in g/L, der TDS-Gehalt  $C_{TDS}$  in mg/L und T in °C. Für T = 15 °C erhält man damit

$$Gl. 3-36: \beta = 0.000775 \text{ (g/L)}^{-1}$$

das heißt, dieser Wert beträgt nur 77,5 % vom oberen Grenzwert  $\beta = 0,001$ .

Man beachte: In die Berechnungsformeln für die Dichteströme gehen nicht die Absolutwerte der Dichte, sondern nur Dichtedifferenzen bzw. Dichtegradienten ein.

#### DMT /4/

Formel für den gekoppelten Einfluss von Mineralisation und Temperatur auf die Dichte (vgl. Kap. 3.4, Gl. 3-13):

$$Gl. 3-37: \rho = 1,005 + 0,0065 x - 0,0030 y - 0,00006 x y$$

mit

$\rho$  = Dichte in g/cm<sup>3</sup>

$x = s/10000$

$y = (T - 273,15) / 10$

$s$  = Mineralisation in mg/L

T = Temperatur in °K

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Ansätze sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dokumentiert.

**Dichtevergleich mit variabler Konzentration bei konstanter Temperatur von 10 °C**

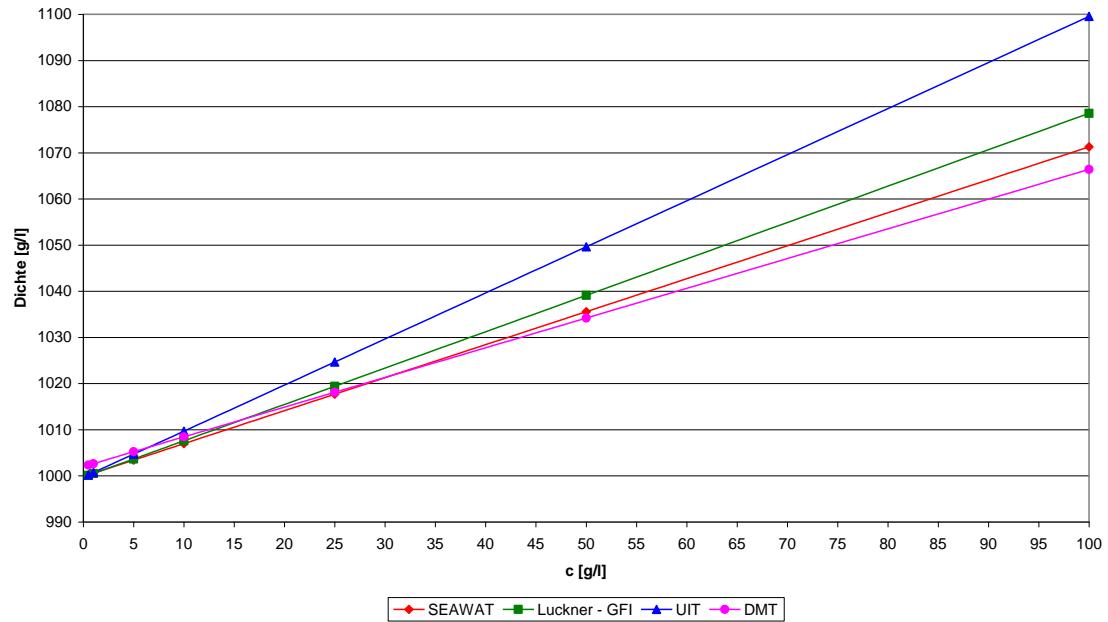


Abbildung 11: Dichtevergleich mit variabler Konzentration bei konstanter Temperatur

**Dichtevergleich mit variabler Temperatur bei konstanter Konzentration von 5 g/l**

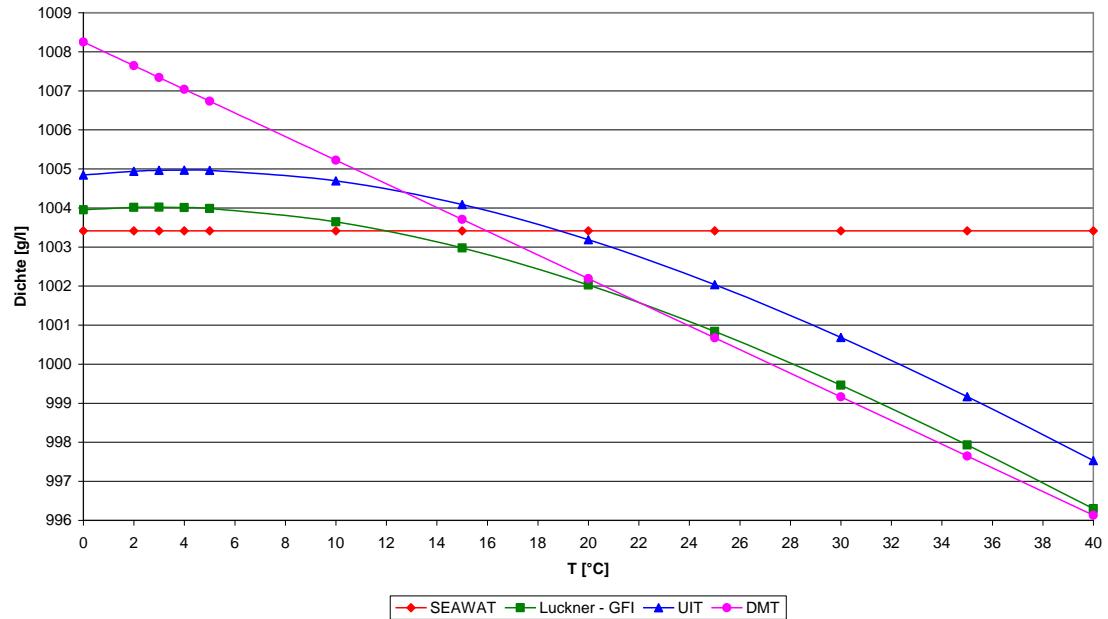


Abbildung 12: Dichtevergleich mit variabler Temperatur bei konstanter Konzentration

## 4 Physikalisches Modell

### 4.1 Alter Technikumsversuch

In dem in Kapitel 2 genannten FuE-Vorhaben „Mittelfristige Entwicklung des Chemismus und der Dichte-Schichtungen von Grubenwässern in Bergwerken und ihre Auswirkungen auf nutzbares Grund- und Oberflächenwasser“ /3/ wurde 1997/98 in einem ersten einfachen Technikumsversuch im Labormaßstab die Schichtungsausbildung in einem „Bergwerk“ untersucht. Aufbau und Ergebnisse sollen hier kurz geschildert werden.

In einem handelsüblichen PE-Fass (Durchmesser rd. 50 cm, Höhe rd. 80 cm, Volumen rd. 120 Liter) wurde in einem Sand/Kies-Bett ein „Grubengebäude“ aus PVC-Rohren nachgebildet, das aus zwei „Schächten“ bestand, die über drei „Sohlen“ miteinander verbunden waren. In dem „Gebirge“, d. h. ohne direkten Kontakt zum Grubengebäude, stand außerdem ein einzelnes Rohr („Messrohr“). Randlich im PE-Fass befand sich zudem noch ein Füllrohr, das unterhalb des Grubengebäudes in eine Kiesschicht mündete. Das Grubengebäude aus den zwei Schächten ( $\varnothing$  1,5 Zoll) und den drei Sohlen ( $\varnothing$  1,25 Zoll) sowie das Messrohr ( $\varnothing$  1,5 Zoll) bestanden aus Filterrohren, das Füllrohr war im vertikalen Teil ein Vollrohr ( $\varnothing$  1,5 Zoll), in der Kiesdrainage ein Filterrohr ( $\varnothing$  1,25 Zoll) und diente zur Beaufschlagung mit Salz- (unten) und Süßwasser (oben).

Das PE-Fass stand wiederum in einem etwas größeren wassergefüllten Gefäß, so dass etwa das untere Drittel des PE-Fasses von Wasser umgeben war. Über eine Heizspirale in dem Wasserbottich konnte dessen Wasser erwärmt werden und so von außen eine Art geothermischer Gradient im wassererfüllten Grubengebäude erzeugt werden. Die Abbildung 13 verdeutlicht den Versuchsaufbau.

Mit einer herkömmlichen Labor-Leitfähigkeitssonde wurden in unregelmäßigen Abständen von einigen Tagen in den Schächten und im Messrohr in unterschiedlichen Tiefen die Leitfähigkeit und die Temperatur gemessen.

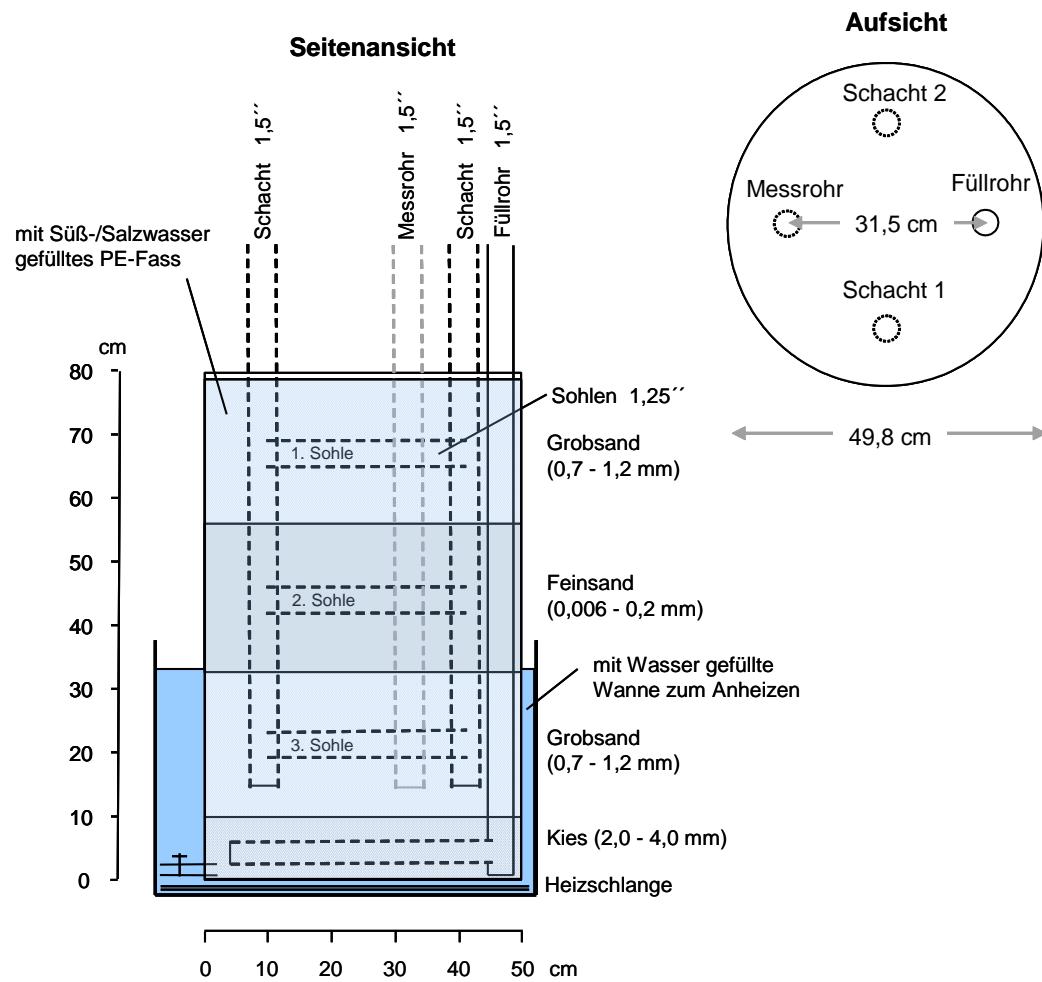


Abbildung 13: Prinzipieller Aufbau alter Technikumsversuch 1997/98

Die unter wechselnden Temperaturbedingungen durchgeführten Versuche zeigten, dass der künstlich angelegte geothermische Gradient dem „natürlichen“ Bestreben der Wässer zur Dichtedifferenzierung, d. h. zur gleichmäßigen Zunahme der Mineralisation (und der Dichte) mit der Tiefe, entgegensteht. Nur bei einer Beheizung ließ sich eine relativ scharfe Grenze zwischen Süß- und Salzwasser erkennen, die über den jeweiligen Heizzeitraum  $\pm$  stabil blieb. Unbeheizt wurde die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser zunehmend „weicher“ und es entstand ein allmählicher Übergang zwischen den beiden Wässern. Ein wiederholtes Beheizen führte regelmäßig zur erneuten Ausbildung einer stabilen Schichtgrenze.

Abbildung 14 veranschaulicht diesen Wechsel beispielhaft an einigen Messungen im Messrohr zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Messung vom 03.06.1998 (blau) zeigt die Situation nach einer Heizperiode von 65 Tagen. Deutlich ist die unterschiedliche Mineralisation (Leitfähigkeit)

und Temperatur zu erkennen mit einer scharfen Schichtgrenze bei etwa 78 cm Tiefe. Nach dieser Messung wurde die Heizung ausgeschaltet. Am 19.06.1998 (grün), also nach 16 Tagen, hatte sich die Wassertemperatur abgekühlt und vereinheitlicht und auch die scharfe Mineralisationsgrenze hatte sich zugunsten einer weichen Übergangszone stark zurückgebildet. Danach wurde abermals beheizt und nach weiteren 20 Tagen (09.07.1998, rosa) hatte sich wieder eine Schichtung in der dargestellten Form ausgebildet.

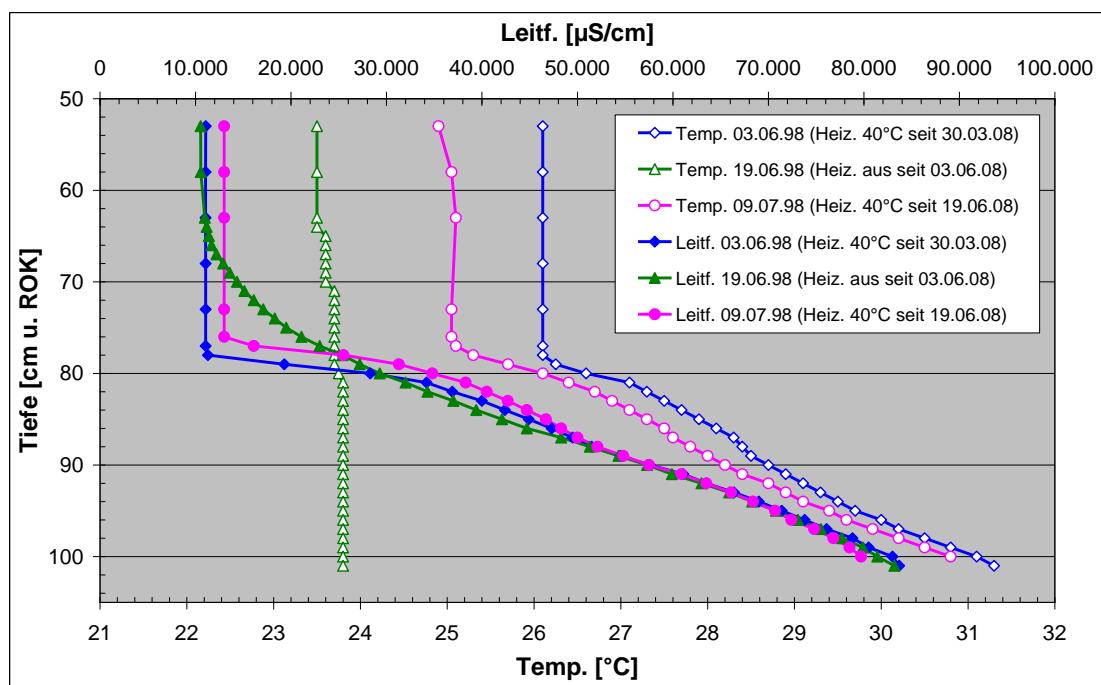


Abbildung 14: Ergebnisse alter Technikumsversuch (Messrohr)

Der Übersicht halber sind in Abbildung 14 nur Messungen im Messrohr zu drei Zeitpunkten aufgetragen, deshalb ist anzumerken, dass Reaktionen auf das An- und Abschalten der Heizung bereits nach 1-2 Tagen zu verzeichnen waren und dass die gleichzeitig durchgeföhrten Messungen in den beiden Schächten sehr ähnliche Ergebnisse aufwiesen. Die Sohlenniveaus oder gar die „Schichtgrenzen“ im Gebirge (Feinsand/Grobsand) hatten keinen Einfluss auf die festgestellte Dichteschichtung.

## 4.2 Neuer Technikumsversuch

Zur weiteren Vertiefung des Verständnisses von Strömungsphänomenen in Verbindung mit Dichteschichtung wurde das Prinzip des in Kapitel 4.1 kurz beschriebenen alten Technikumsversuchs mit folgenden Änderungen wieder aufgegriffen:

- Der Versuchsmaßstab wurde deutlich vergrößert
- Zu- bzw. Abflüsse wurden realisiert
- Eingangsdaten und Messergebnisse wurden engmaschiger und detaillierter erfasst

#### 4.2.1 Überlegungen zum geeigneten Labormaßstab

Die Überlegungen zur Größe des Technikumsversuchs orientierten sich einerseits an realen Abbautiefen von 1.000 m, andererseits sollten im Labor ca. 2 m Höhe nicht überschritten werden, um den Versuch noch handhabbar zu gestalten. Daraus ergab sich ein Maßstab von 1 : 500. Ein 500 m mächtiges Deckgebirge würde im Labor auf 1 m reduziert, auf dem restlichen Meter - im „Karbon“ - könnten dann zwei Strecken platziert werden. Ein Schachtabstand von 500 m würde auf 1 m Streckenlänge verkleinert.

Wendet man den Maßstab 1 : 500 jedoch auch auf übliche Schacht- (z. B. 7 m) und Streckendurchmesser (z. B. 4 m) an, reduzieren sich diese im Labor auf nur noch 14 mm für die Schächte und 8 mm für die Strecken. Abgesehen von technischen Problemen mit der Größe von Messsensoren ergeben sich durch die Verkleinerung im obigen Maßstab auch physikalische Probleme, wie z. B.

- überproportionale Wandeffekte bei der Strömung
- starke Störung der Strömung durch die Messinstrumente
- Be- bzw. Verhinderung von Konvektionszellen („Strömungsballen“)

Hier schien allenfalls ein Maßstab von 1 : 50 vorstellbar (also im obigen Beispiel für die Schächte 14 cm anstatt 14 mm). Aus praktischen Gründen erfolgte die Orientierung dann an handelsüblichen Rohrdurchmessern.

Diese Maßstabsabweichung - die Schacht- und Streckendurchmesser sind gegenüber den Längen ungefähr 10fach überdimensioniert - erschien statthaft, da zum einen der Versuchsstand und die Messtechnik handhabbar sein mussten. Zum anderen sollte der Versuch nicht ein reales Bergwerk simulieren (dazu wäre natürlich auch das Inventar, zwei Schächte verbunden über nur zwei Strecken, keine Blindschächte, Berge etc., zu spärlich), sondern in erster Linie der erweiterten Erkenntnis von Strömungs- und Schichtungsphänomenen dienen sowie dem Nachweis,

dass das Simulationsprogramm die beobachteten Phänomene richtig wiedergibt.

Das Versuchs-Grubengebäude sollte nicht isoliert im Raum stehen sondern eingebettet werden in ein „Gebirge“, um dort (und somit auch an den Schacht- und Streckeninnenwänden) eine sinnvolle Temperaturverteilung aufgrund eines „geothermischen Gradienten“ zu ermöglichen.

Die erforderliche Größe des das Gebirge beinhaltenden Behälters orientierte sich an Untersuchungen zur Modellgröße im in Kapitel 2 genannten FuE-Vorhaben von 2003 /4/. Dort wurde überschlägig die notwendige Ausdehnung des Berechnungsgebiets (des Gebirges) in radialer Richtung (horizontale Ausdehnung) und in der Tiefe (vertikale Ausdehnung) ermittelt. Es ergab sich, dass ab einer Gebirgsfeste von mind. 400 m radialer Ausdehnung und ab 200 m Gebirgsmächtigkeit als Differenzwert vom Schachttiefsten bis zur Unterkante des Berechnungsgebiets keine Beeinflussung durch eine räumlich eingeschränkte Modellgeometrie stattfindet. Umgesetzt in den im Laborversuch verwendeten Maßstab 1 : 500 sollte der radiale Abstand des Grubengebäudes zu den Behälterseitenwänden somit ca. 0,8 m und zur Tiefe ca. 0,4 m betragen.

Es ergibt sich somit der in Abbildung 15 bis Abbildung 17 dargestellte prinzipielle Versuchsaufbau:

Das „Grubengebäude“ besteht aus zwei Schächten (unten verschlossene PVC-Vollrohre, z. B. DN 175), die im unteren Teil über zwei Strecken (ebenfalls PVC-Vollrohre, z. B. DN 100) miteinander verbunden sind. Insgesamt hat dieses Grubengebäude Ausmaße von ca. 1,2 m Länge und 1,6 m Höhe und ist mittig, etwa 0,4 m über Grund, in einem oben offenen Rechteckbehälter mit den Maßen 2,8 m Länge, 1,8 m Breite und 2,0 m Höhe platziert. Der o. g. notwendige vertikale und radiale Abstand des Grubengebäudes zu den Behälterwänden ist damit erfüllt. Der Behälter wird mit feuchtem Sand (= „Gebirge“) gefüllt und von unten über die gesamte Fläche beheizt.

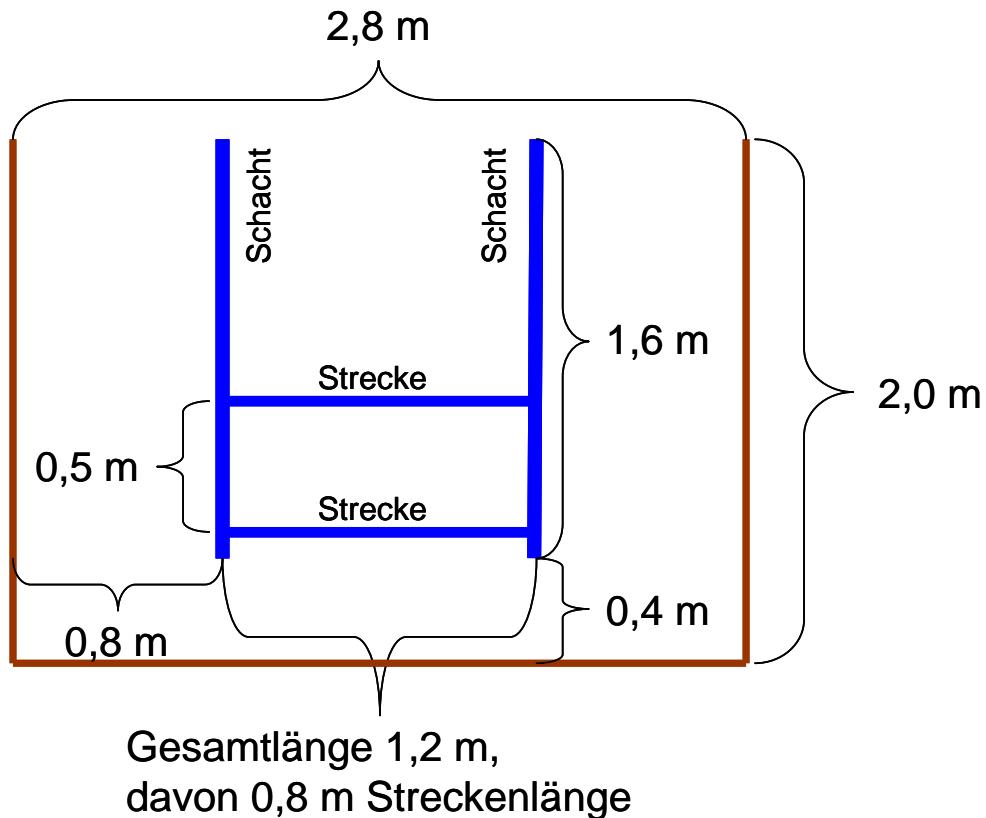


Abbildung 15: Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (Seitenansicht)

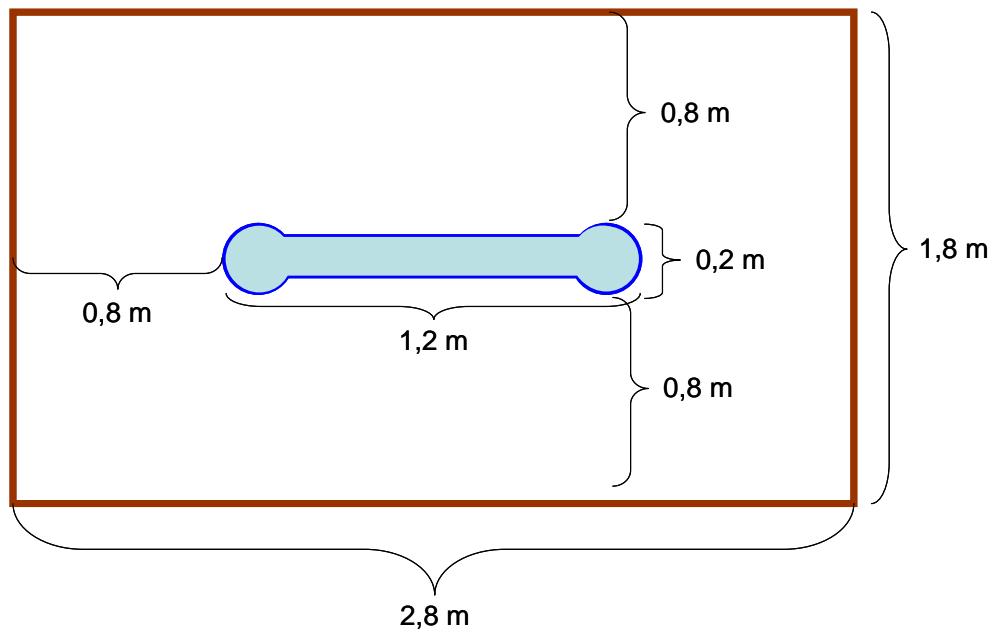


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (Aufsicht)

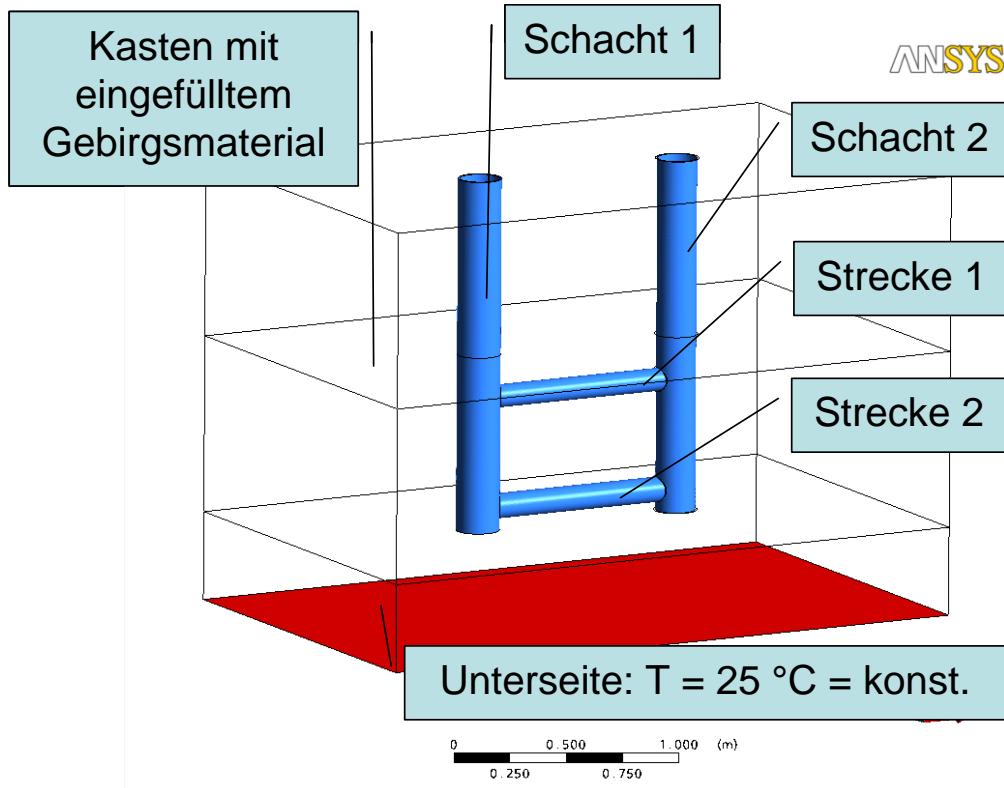


Abbildung 17: Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (3D-Ansicht)

#### 4.2.2 CFD-Voruntersuchungen

Ausgehend von der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen prinzipiellen Grundkonfiguration wurden zur Vorabschätzung eines sich entwickelnden Temperaturprofils mittels CFX stationäre Simulationen mit unterschiedlichen Stoffdaten durchgeführt.

Es zeigte sich, dass unter den getroffenen Annahmen (zu den funktionalen Abhängigkeiten siehe Kap 3.4)

- Konstante Temperatur an der Unterseite des Versuchsstands: 25 °C
- Konstante Umgebungstemperatur: 20°C
- Stoffdaten Wasser:
  - Salinität „S“: 5000 mg/l
  - Wärmeleitfähigkeit:  $f(p, T, S)$
  - spez. Wärmekapazität:  $f(S)$
  - Dichte:  $f(T, S)$
- Stoffdaten „Gebirgsmaterial“:
  - Wärmeleitfähigkeit: 1 W/mK
  - spez. Wärmekapazität: 1000 J/kgK
  - Dichte: 1500 kg/m<sup>3</sup>
- Stoffdaten „Kunststoffkastenwand“:
  - Wärmeleitfähigkeit: 0,2 W/mK
  - spez. Wärmekapazität: 1000 J/kgK
  - Dichte: 1350 kg/m<sup>3</sup>
  - Wanddicke: 10 mm
- Wärmeübergangskoeffizient Wand/Luft: 30 W/m<sup>2</sup>K

eine Temperaturspreizung im „Gebirge“ von ca. 5,0 °C zu erwarten ist (Abbildung 18).

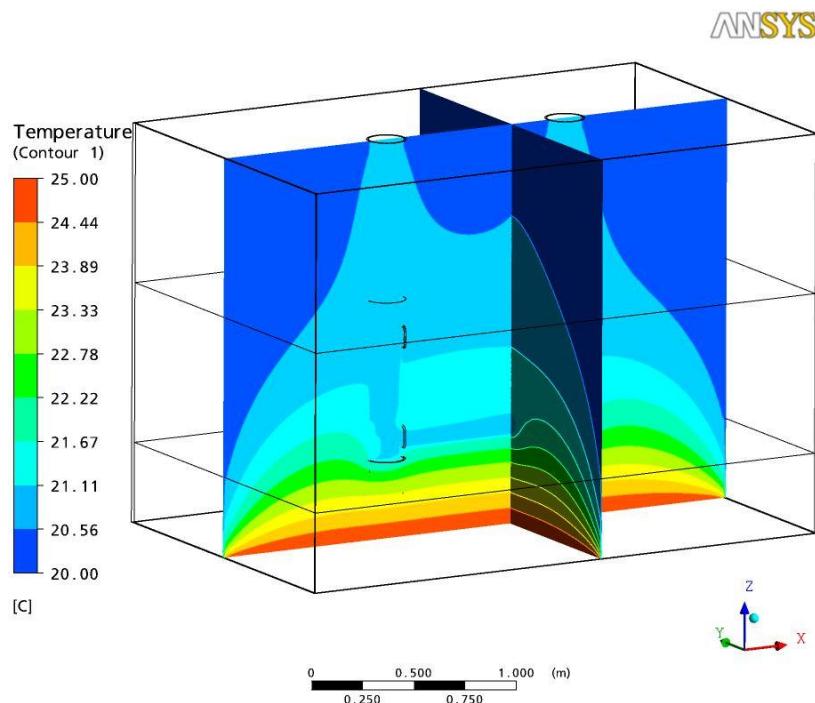


Abbildung 18: Temperaturprofil Voruntersuchung (stationär)

Abbildung 19 zeigt als Ausschnitt eine vergrößerte und im Wertebereich auf den Temperaturbereich von 20-22 °C eingeschränkte halbseitige Darstellung des Gruben- und Gebirgsbereiches. Gemäß den o. g. Stoffdaten stellt sich im Gebirge und im Grubensystem ein sich selbst regulierender geothermischer Temperaturgradient ein (die roten Konturen beschreiben summarisch Temperaturen  $\geq 22,0$  °C), der im wassergetränktem Feststoff erwartungsgemäß eine größere Spreizung erfährt als im wassererfülltem Grubengebäude.

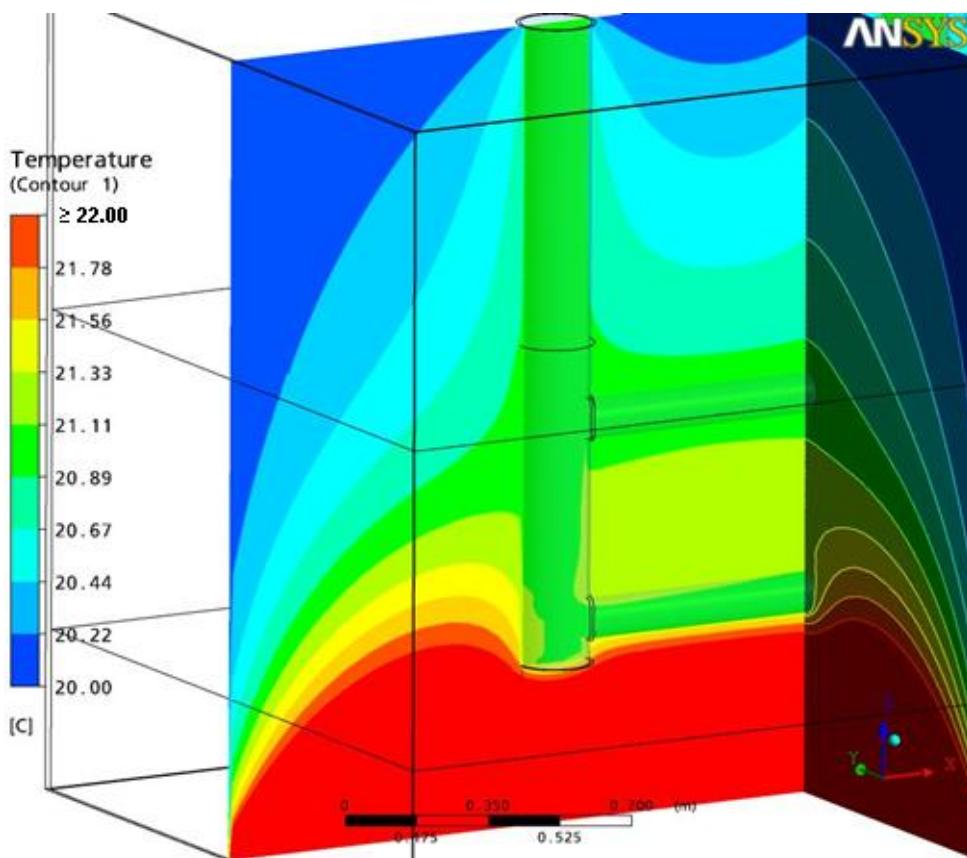


Abbildung 19: Ausschnitt Temperaturprofil Voruntersuchung (stationär)

Mit diesen CFD-Untersuchungen sollte im Vorfeld auch die Frage geklärt werden, ob eventuell auf die aufwändige Kastenkonstruktion und die Befüllung mit Sand verzichtet werden könnte, da ein freistehendes Rohrsystem natürlich sehr viel besser handhabbar und zugänglich wäre und nachträgliche Änderungen an der Konfiguration schneller umsetzbar wären (kein Entfernen bzw. Wiedereinbringen von nassem Sand - immerhin rd. 10 m<sup>3</sup>). In diesem Fall müssten allerdings die sich selbst einstellenden Temperaturen an den Schacht- und Streckenwänden künstlich vorgegeben werden.

Abbildung 20 zeigt die Temperaturverteilung an den Schacht- und Streckenaußenwänden aus obiger Simulation, wobei zur Verdeutlichung des Temperaturverlaufes das Wertebereich weiter eingeschränkt wurde auf den Temperaturbereich der dort anstehenden Minimal- und Maximaltemperatur. Das gesamte Temperaturintervall erreicht  $1,6^{\circ}\text{C}$ . ( $20,29^{\circ}\text{C}$  –  $21,89^{\circ}\text{C}$ ). Die im Bild willkürlich vorgenommene Abstufung von  $0,2^{\circ}\text{C}$  zeigt Farbverläufe, die meist nicht sehr geradlinig oder senkrecht zu den Rohren verlaufen, d. h. eine genaue Nachbildung, etwa mit außen anliegenden Heizmanschetten, kam von vornherein nicht in Betracht. So wurden als Kompromiss Temperaturbereiche gemittelt, die dann mit Heizmanschetten belegt werden sollten. Für den unteren Modellteil (2 Strecken und zwischenliegende Schachtabschnitte) ergeben sich mittlere Temperaturen von  $21,1^{\circ}\text{C}$ ,  $21,2^{\circ}\text{C}$  und  $21,3^{\circ}\text{C}$ , die konstant gehalten werden müssten.

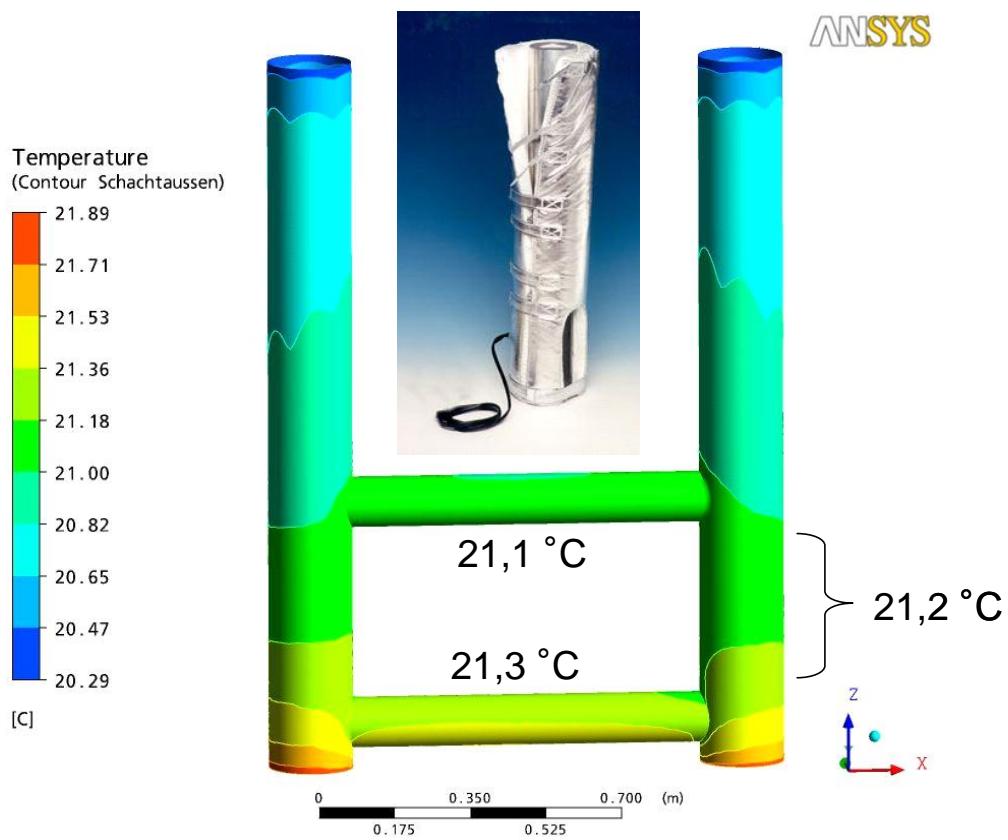


Abbildung 20: Temperaturprofil an der Außenwand des Schacht- und Streckensystems (Voruntersuchung, stationär)

Nach Rücksprache mit Herstellern ist eine derart genaue, vollflächige und konstante Temperaturregelung mit einfachen Mitteln wie Heizmanschetten nicht zu gewährleisten, die Genauigkeit würde eher im  $1^{\circ}\text{C}$ -Bereich liegen

- was nicht zielführend wäre. Spezialkonstruktionen wären zwar denkbar, aber auch sehr (kosten)aufwändig. Es bliebe aber immer ein Kompromiss, da die in Abbildung 20 dargestellte Temperaturverteilung kaum genau von außen nachbildungbar ist und ja auch nur für diesen speziellen Fall gilt. Es bliebe immer die Unsicherheit, wie sich die Temperaturverteilung bei unterschiedlichen Versuchsansätzen tatsächlich von selbst einstellen würde. Aus diesen Gründen wurde die „Kastenlösung“ schließlich favorisiert.

#### 4.2.3 Aufbau Technikumsversuch

Der endgültige Versuchsaufbau lehnt sich eng an die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Vorüberlegungen an. Abbildung 21 bis Abbildung 23 zeigen schematisch Aufbau und Maße von Versuchsstand und Messapparatur, Abbildung 24 bis Abbildung 31 den realen Aufbau bzw. einzelne Elemente.

Der aus 2,5 cm starken PE-Platten bestehende, oben offene Rechteckbehälter hat die Innenmaße 280x180x200 cm (LxBxH) und ist mit fünf umlaufenden Stahlprofilen mit PE-Ummantelung verstärkt. Auf dem Kastenboden bzw. auf einer ca. 4-5 cm mächtigen Sandschicht sind drei Edelstahl-Heizplatten (LxBxH: 175x91x2 cm) mit einer Leistung von jeweils 3.400 W verlegt, deren Wärmeabgabe über mikroprozessorgesteuerte Regler betrieben wird. Darüber befinden sich, diagonal versetzt, randlich an den beiden Schmalseiten des Kastens zwei mit Kugelhähnen verschließbare Auslassöffnungen, im Kasten mit Filterrohren (DN 50) ausgestattet, die zum Ablassen des Wassers im Kasten dienen.

Mittig im Behälter, etwa 0,3 m über den Heizplatten auf Stützen aus überzähligen PE-Stücken des Kastens stehend, wurde das aus zwei ca. 1,63 m hohen „Schächten“ (DN 160, Innen-Ø 15,2 cm, unten geschlossen) und zwei ca. 0,88 m langen „Strecken“ (DN 110, Innen-Ø 10,4 cm) bestehende „Grubengebäude“ aus PVC-U-Vollrohren („Rohrleiter“) eingebaut. Die Schächte ragen etwas über die Kastenoberkante hinaus. Damit war gewährleistet, dass abfließendes Wasser kontrolliert durch die beidseitig an den Schächten in Kastenhöhe (d. h. ca. 3 cm unterhalb Schachtoberkante) montierten Zu- bzw. Überlaufschläuche ablaufen konnte. Weitere Öffnungen mit Schlauchabgängen (Innendurchmesser ca. 9 mm) wurden in Höhe der beiden Strecken und im Boden der Schächte geschaffen, über sie kann ebenfalls ein Zustrom im tieferen Grubengebäude generiert werden. Die beiden Zuführungen im Boden der Schächte dienen in erster Linie dem Unterschichten (s. u.) bzw. dem Entleeren des Systems. Vor der

Sandbefüllung des Kastens wurde das Rohrsystem mittels Wasserauffüllung auf evtl. Leckagen geprüft.

Nach erfolgreicher Dichtigkeitsprüfung des Rohrsystems wurde der Kasten bis auf eine Höhe von etwa 180 cm mit Kies und Sand aufgefüllt. Auf den Heizplatten lagert eine ca. 25 cm mächtige Kiesschicht (Körnung 2-8 mm), darüber bis ca. 20 cm unter Kastenoberkante eine etwa 1,5 m starke Schicht Rheinsand der Körnung 0-2 mm. Der Kasten wurde dann mit Leitungswasser bis etwa 5 cm oberhalb des „Gebirges“ aufgefüllt, so dass es wassergesättigt war. Der Wasserüberstand verhinderte Schrumpfungsrisse und die Wassersättigung des Gebirges konnte so einfach kontrolliert werden. Neben der realitätsnäheren Darstellung diente die Wasserfüllung auch der gleichmäßigeren Wärmeverteilung und, zum jeweiligen Versuchsbeginn, dem weiteren Dichtigkeitsnachweis des dann noch leeren Rohrsystems. Die Wassersättigung wurde während der gesamten Versuche beibehalten. In unregelmäßigen Abständen wurde verdunstetes Wasser nachgefüllt.

Im Gebirge, ohne Anschluss an das Grubengebäude, steckt außerdem ein Filterrohr (DN 50) zur Kontrolle des dortigen Wasserstandes, mittels herkömmlicher Laborsonde kann aber auch die Wassertemperatur abgegriffen werden.

In den beiden Schächten wurde die herausnehmbare Messsensorik installiert. 16 über die wassererfüllte Mächtigkeit gleichmäßig verteilte Sensoren (A00-A15 bzw. B00-B15) registrieren automatisch die elektrische Leitfähigkeit (als Maß der Gesamtmineralisation) und die Temperatur in vorgegebenen Zeitintervallen (i. d. R. im 10 Min.-Takt). Ab Schichtungsversuch V3 wurde neben der Messsensorik in den Schächten auch eine automatische Überwachung der Temperatur im Kasten und im Labor („Umgebungsmonitoring“ T1-T6) installiert (s. u.), ab V5 konnte außerdem noch die Zustromrate registriert werden - ebenfalls im 10 Min.-Takt.

Als Ausgangssituation war im Grubengebäude, d. h. im Rohrsystem eine Dichteschichtung mit Salzwasser im unteren Teil bis etwa mittig zwischen den beiden Strecken und Süßwasser (Leitungswasser) darüber vorgesehen. Sie wurde hergestellt, indem das System mit Süßwasser befüllt (ca. 51 L) und dann über die beiden Schläuche, die im Boden der Schächte montiert waren, vorsichtig das benötigte Volumen an Salzwasser (ca. 22 L) eingeleitet wurde (Unterschichtung). Das verdrängte Süßwasser konnte über die oberen Überlaufschläuche abfließen.

## Schacht-/Streckenmodell (Seitenansicht)

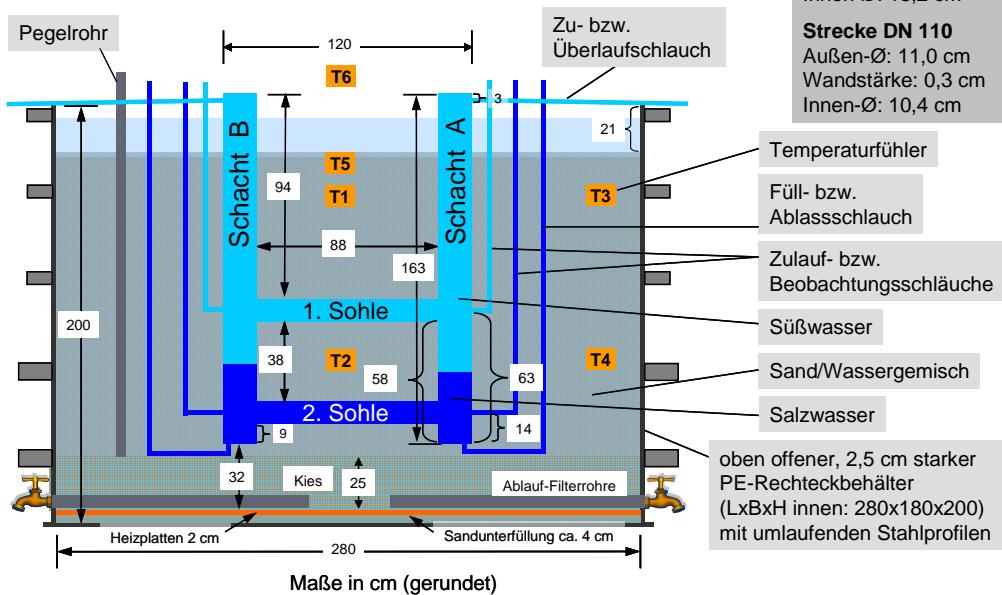


Abbildung 21: Aufbau Technikumsversuch (Seitenansicht, Maße in cm)

## Schacht-/Streckenmodell (Aufsicht)

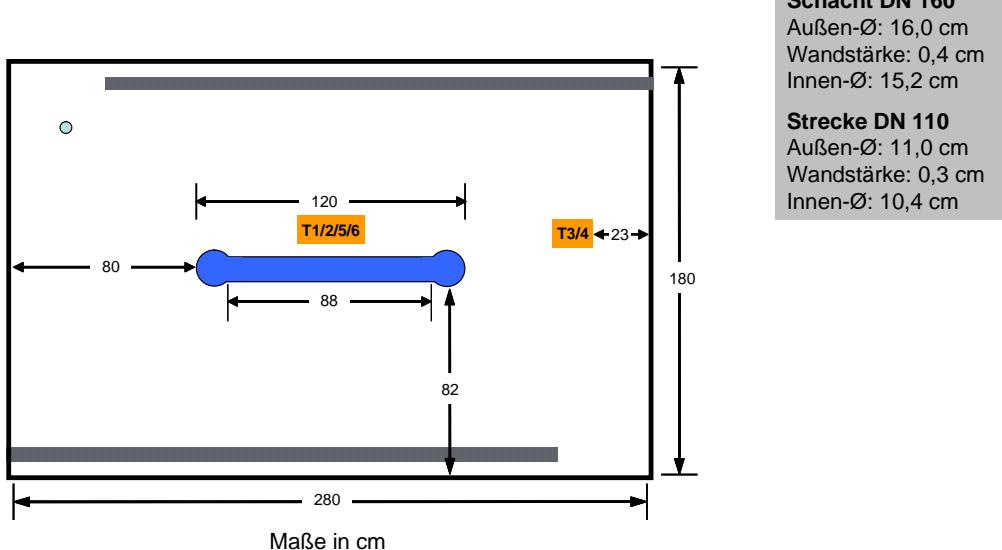


Abbildung 22: Aufbau Technikumsversuch (Aufsicht, Maße in cm)

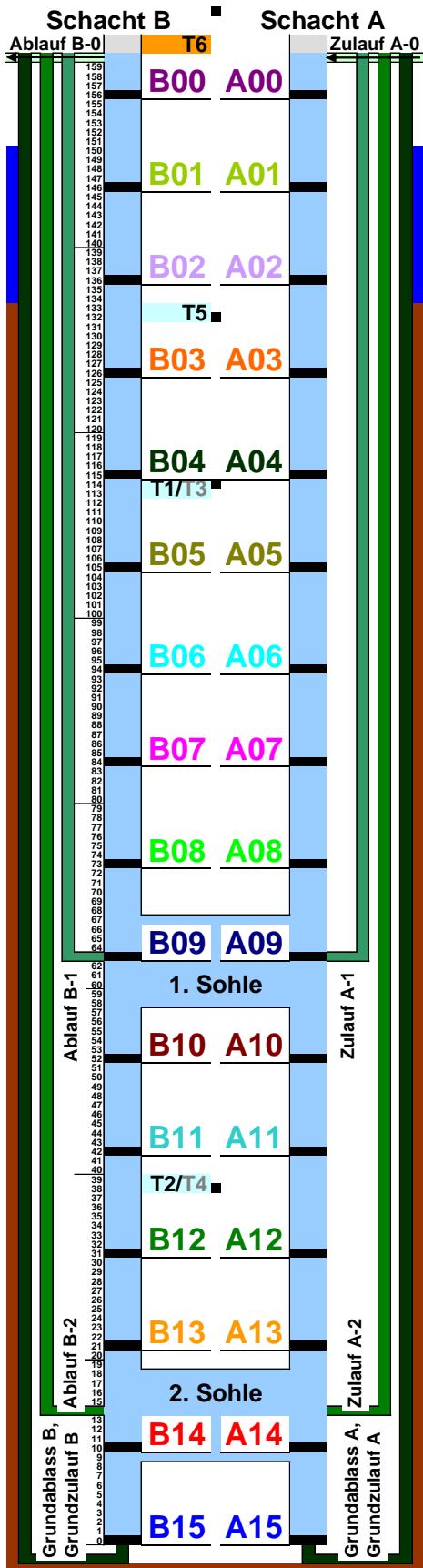


Abbildung 23: Schema Messsensorik in den Schächten

Abbildung 24 bis Abbildung 31 präsentieren den realen Versuchsaufbau samt Messtechnik. Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen den Versuchsstand aus unterschiedlichen Blickwinkeln und in verschiedenen Versuchsstadien. Unten sind jeweils die beiden gegenüber liegenden Ablassventile des Kastens zu erkennen. Aus dem Behälter ragen die beiden orangefarbenen PVC-Rohre (Schächte) etwas heraus sowie das blaue „Überwachungsrohr“ und hinten die Zuführungen für die innen im Behälter liegenden drei Heizplatten (die Reglereinheiten der Heizplatten sind an der rückwärtigen Längsseite des Kastens befestigt und in Abbildung 28 zu sehen). In den Schächten ist die Messvorrichtung installiert, kenntlich nur an den hellgrauen Schaltkästen (vgl. Abbildung 30). Links ist ein (grüner) Ablaufschlauch montiert. Um während eines Versuchs Druckschwankungen im Leitungsnetz - und damit etwaige Änderungen der Zuflussrate - möglichst gering zu halten, wurde anfangs auf den Kasten noch ein (blau- es) PE-Fass mit einem Volumen von ca. 120 L gesetzt (Abbildung 24). Dieser Behälter wurde an das Wasserleitungsnetz angeschlossen und kontinuierlich bis zu einem Überlauf etwas unterhalb des oberen Randes befüllt. In Bodennähe des Fasses wurde ein Abfluss geschaffen, der mit dem Schacht A (rechts) verbunden wurde. Die für den Versuch notwendige Wassermenge wurde mittels Quetschverbindung ausgelitert und eingestellt. Dadurch, dass das immer mehr Wasser in den Behälter ein- als ausströmte und das überschüssige Wasser oben abfließen konnte, war eine konstante Druckhöhe und damit Zuflussrate in das Rohrsystem gewährleistet.



Abbildung 24: Versuchsstand (1)



Abbildung 25: Versuchsstand (2)

Abbildung 25 zeigt den Versuchsstand in einem späteren Stadium. So sind hier z. B. über den Schächten die Apparaturen für die Salzzugabe

aufgebaut (V7, V8; vgl. Kap. 4.2.4.7 u. 4.2.4.8). Das blaue Fass für den konstanten Überdruck der Wasserzuführung wurde ab V5 durch einen automatischen Druckregler ersetzt (s. u.). Zu erkennen sind rechts außerdem zwei (hellgraue) Zufuhrrohrchen für die Temperatursonden T3 u. T4 im Kasten ab V3 (s. u.). Alle Daten wurden kontinuierlich auf dem Laptop gespeichert und konnten auch jederzeit online gesichtet werden.

Das Rohrsystem („Rohrleiter“) des Grubengebäudes (2 Schächte, 2 Strecken) nebst Schläuchen für die Wasserführungen sowie die drei eingebauten Heizplatten sind im noch leeren Kasten in Abbildung 26 zu sehen, außerdem eines der beiden Ablassfilterrohre (blau).



Abbildung 26: Rohrsystem (Grubengebäude)



Abbildung 27: Heizplatte

Abbildung 27 zeigt eine der drei Heizplatten nebst Stromzufuhr vor dem Einbau und Abbildung 28 die an die Rückseite des Kastens montierten elektronischen Reglereinheiten für die drei Heizplatten.



Abbildung 28: Reglereinheiten für Heizplatten

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen das Messsystem im „Rohbau“ und nach Fertigstellung, Abbildung 31 einen Messaufnehmer im Detail und Abbildung 32 präsentiert schließlich das fertige Messsystem in einem der beiden Rohre (Schächte). Die beiden 16-sprossigen, 2,0 m hohen Leitern werden in die bis 1,60 m hoch mit Wasser gefüllten Schächte gestellt. Die rechteckigen Holme (LxB: 3,0x2,0 cm) haben einen Innenabstand von 7,0 cm und einen Außenabstand von 13,0 cm. Jede Messsprosse besteht aus dem Temperaturfühler ( $\varnothing$  6 mm), der mittig durch den Holm 2,7 cm in den Messraum hinein ragt und den beiden (gelben) Messplatinen (LxBxT: 10,0x2,0x0,1 cm). Über Letztere wird indirekt über elektrische Spannung und Widerstand die elektrische Leitfähigkeit bestimmt (die elektr. Leitfähigkeit ist der Kehrwert des Widerstandes). Die dazu notwendigen Aufnehmer sind 1,5 cm vom Holminnenrand entfernt und liegen den Temperaturfühlern jeweils gegenüber. Zur besseren Verteilung der Datenleitungen sind die Messsprossen außerdem wechselseitig an den Holmen angebracht. Die unterste der jeweils 2,0 cm hohen Messsprossen schließt bündig mit den Holmen ab, d. h. der mittige Messpunkt liegt 1 cm über Grund. Um einerseits sicherzustellen, dass auch die oberste Messsprosse noch vollkommen unter Wasser liegt und andererseits eine gleichmäßige Verteilung der 16 Messsprossen zu gewährleisten, liegen die Abstände

zwischen den Messpositionen bei 10,4 cm, d. h. der oberste mittige Messpunkt liegt 1,57 m über Grund bzw. 3 cm unter Füllhöhe.

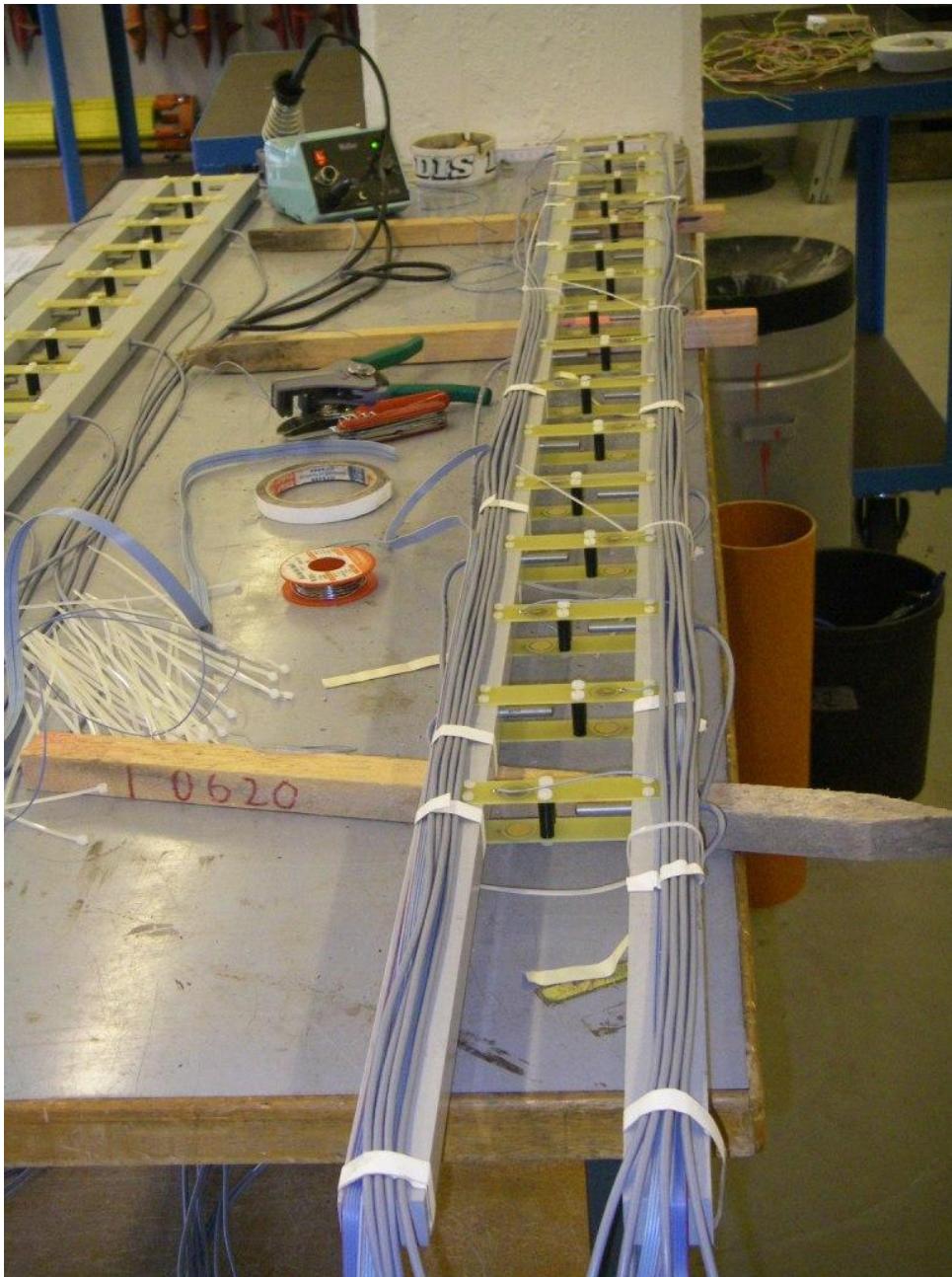


Abbildung 29: Messsystem im Rohbau (vorne = „oben“)



Abbildung 30: fertiges Messsystem (vorne = „unten“)

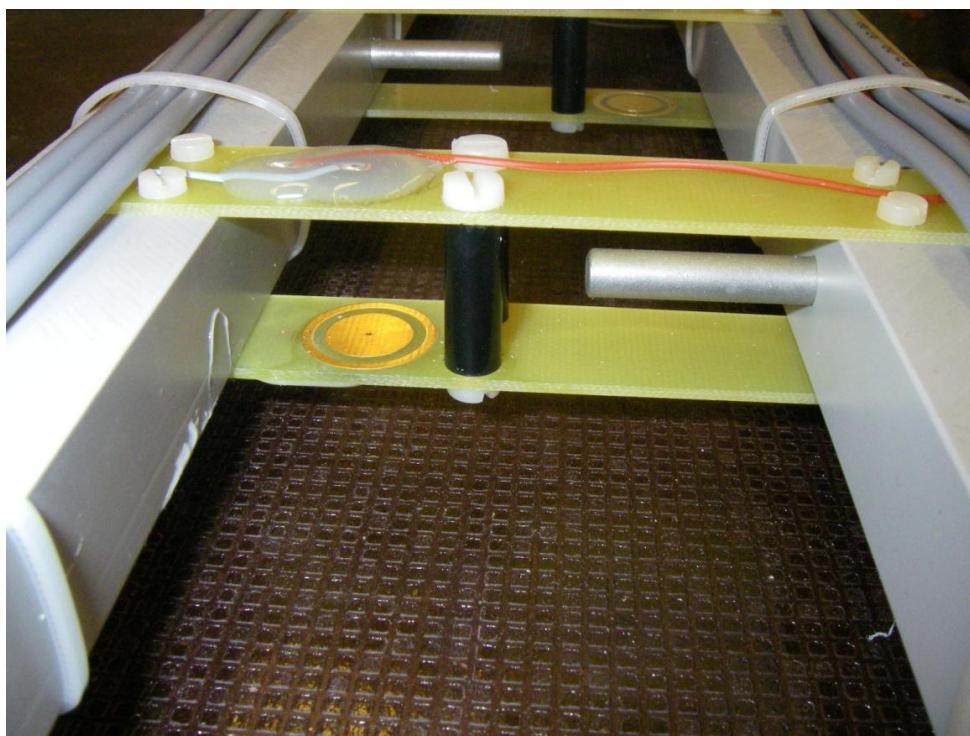


Abbildung 31: Messaufnehmer im Detail (Links: Leitfähigkeitsmessung; Mitte: Abstandshalter, Stabilisatoren; Rechts: Temperaturfühler)

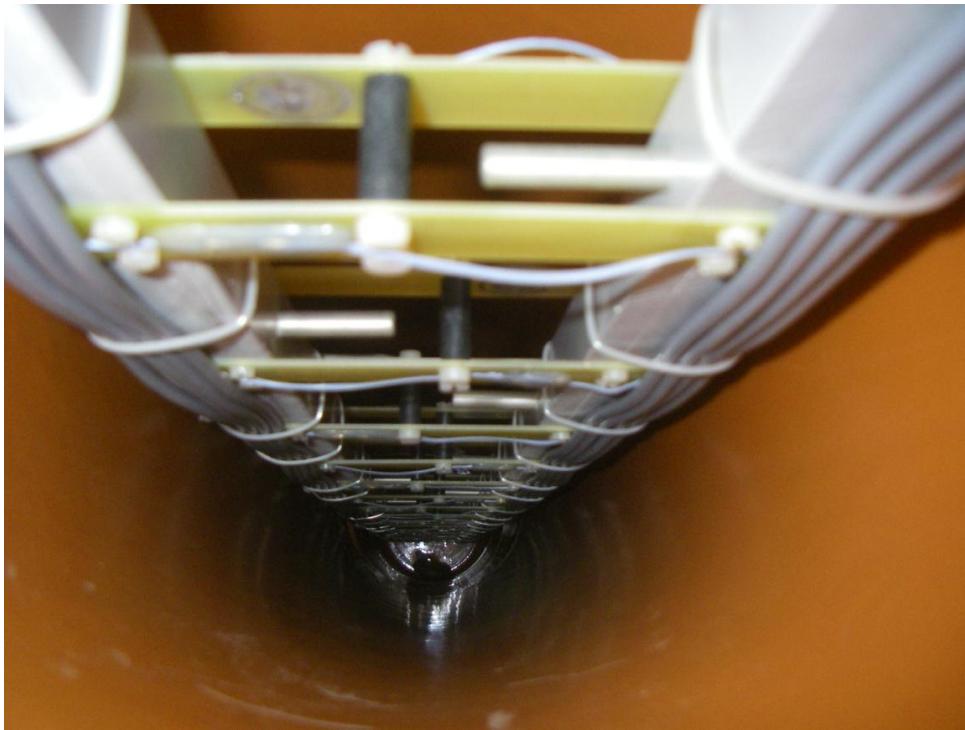


Abbildung 32: Messsystem im Schachtröhr

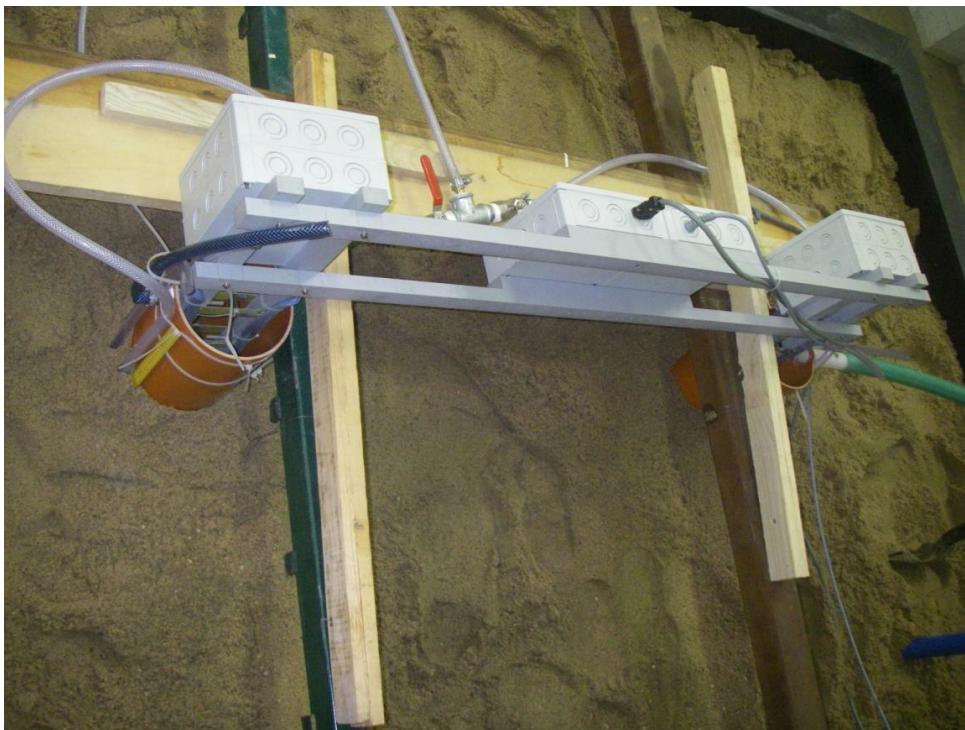


Abbildung 33: Messsystem in den Schachtränen und sandgefüllter Kasten

Nachdem diverse Vorversuche und Dichtigkeitsprüfungen zufriedenstellend verlaufen waren, wurde der Kasten schließlich mit Kies und Sand aufgefüllt (Abbildung 33) und mit Wasser geflutet (vgl. Abbildung 25).

Das oben bereits erwähnte Umgebungsmonitoring (Abbildung 34) wurde nachträglich ab V3 installiert (s. Kap. 4.2.4.3) und hatte zum Ziel, die Temperatur im Sand/Wasser-Gemisch des Kastens an verschiedenen Stellen (T1–T5) sowie die Luft- bzw. Raumtemperatur (T6) kontinuierlich zu erfassen. Die Temperaturfühler waren wie folgt positioniert (vgl. auch Abbildung 22, S. 62):

- T1: mittig zwischen den beiden Schächten, etwa in halber Höhe zwischen ROK und 1. Sohle (ca. 47 cm unter ROK)
- T2: mittig zwischen den beiden Schächten, etwa zentral zwischen 1. und 2. Sohle (ca. 124 cm unter ROK)
- T3: in Schacht-Achse, ca. 23 cm vom Kastenrand entfernt, in Höhe T1
- T4: in Schacht-Achse, ca. 23 cm vom Kastenrand entfernt, in Höhe T2
- T5: mittig zwischen den beiden Schächten, oberflächennah (ca. 2 cm unter GOK)
- T6: mittig zwischen den beiden Schächten (ca. 10 cm über GOK)

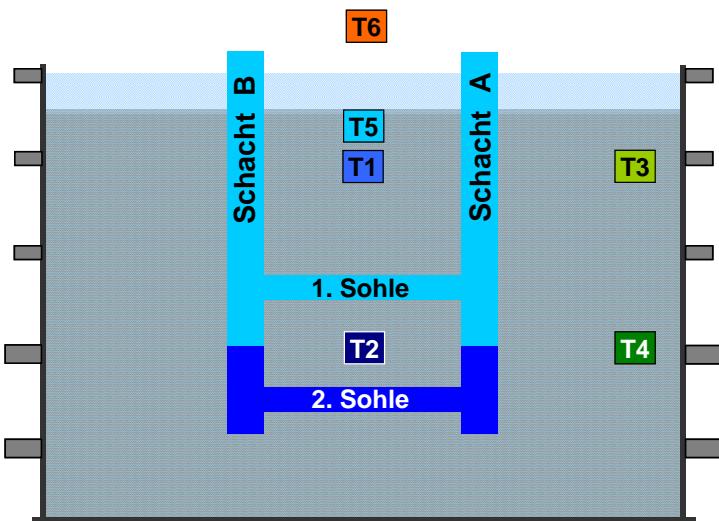


Abbildung 34: Positionierung Umgebungsmonitoring (Schema)

Ebenfalls nachträglich wurde ab V5 (Kap. 4.2.4.5) ein Druckminderer in die Zuführleitung eingebaut, der für einen konstanten Druck sorgte, sowie ein Durchflussmessgerät, das die Zuflussrate automatisch registrierte

(Abbildung 35; unterhalb des Druckreglers ist außerdem das hellgraue Zufuhrrohrchen für die Temperatursonde T2 zu sehen sowie vorne rechts die schwarz-silberne Sonde T6 für die Raumluft).



Abbildung 35: Druckregler (hellgrau, links), Durchflussmessgerät (schwarz, Mitte) und Absperrhahn (rot, rechts).

Allerdings funktionierte der Durchflussmesser auch nur im Versuch V5 einwandfrei. Während des Versuches V6 (Kap. 4.2.4.6) kam es zu Reparaturarbeiten an der Hauptwasserleitung der DMT und im Anschluss zu Aussetzern bzw. offensichtlichen Fehlmessungen im Durchflussmessgerät. Wahrscheinlich hatten sich dort kleine Partikel festgesetzt, die auch durch eine „Spülung“ nicht beseitigt werden konnten, so dass zusätzlich der Abfluss wieder per Hand gemessen (ausgelitert) wurde.

#### 4.2.4 Übersicht der Versuche

Für die acht Schichtungs- und Strömungsversuche (V1-V8) wurde i. d. R. folgender Ausgangszustand hergestellt: Das Rohrsystem wurde mit Leitungswasser gefüllt (ca. 51 L) und anschließend vorsichtig mit Salzwasser bis zu einer Höhe etwa mittig zwischen den beiden Strecken unterschichtet. Hierfür wurden ca. 22 Liter Leitungswasser mit Spülmaschinensalz (10 g/L) versetzt (gut löslich, praktisch reines NaCl). Mit dieser Salzlösung mit einer gemessenen Leitfähigkeit von etwa 17.300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  wurde dann

das im Rohrsystem stehende Süßwasser unterschichtet. Dazu wurde die Salzlösung sehr behutsam gleichzeitig über beide in den Boden der Schächte führenden Schläuche (Grundzulauf A u. B) eingefüllt. Das verdrängte Süßwasser konnte über die oberen Überlaufschläuche abfließen. Der Erfolg der Unterschichtung konnte direkt an den Messsonden in den Schächten überprüft werden. Nach einer Ruhezeit von mind. einem Tag wurde der entsprechende Versuch dann gestartet. Bis auf den Versuch V2 (direkte Fortführung von V1) wurde nach jedem Versuch das Rohrsystem entleert, mit Leitungswasser gespült und dann neu befüllt und geschichtet.

Rechnerisch ergäbe sich, abzüglich gewisser Volumenverluste durch die Zuführungsschläuche und die Messapparatur, eine Füllhöhe von ca. 0,45 m über „Schachtsohle“, d. h. der Wasserspiegel des Salzwassers müsste etwa im Bereich der Messposition 11 liegen. Da das Salzwasser beim Eindringen über die Schachtsohle das Süßwasser aber nicht nur verdrängt, sondern sich z. T. auch mit ihm vermischt, wird diese Höhe als scharfe Salzwasser/Süßwasser-Grenze nicht erreicht. Vielmehr wird sich eine Misch- bzw. Übergangszone ausbilden, wie sie Abbildung 36 verdeutlicht: Während die unteren drei Messpunkte (15-14-13) voll im Salzwasser liegen, steht Position 12 bereits in einer geringer mineralisierten Mischzone. Bei Position 11 überwiegt der Süßwassereinfluss deutlich, sie zeigt nur noch eine leicht erhöhte Mineralisation an.

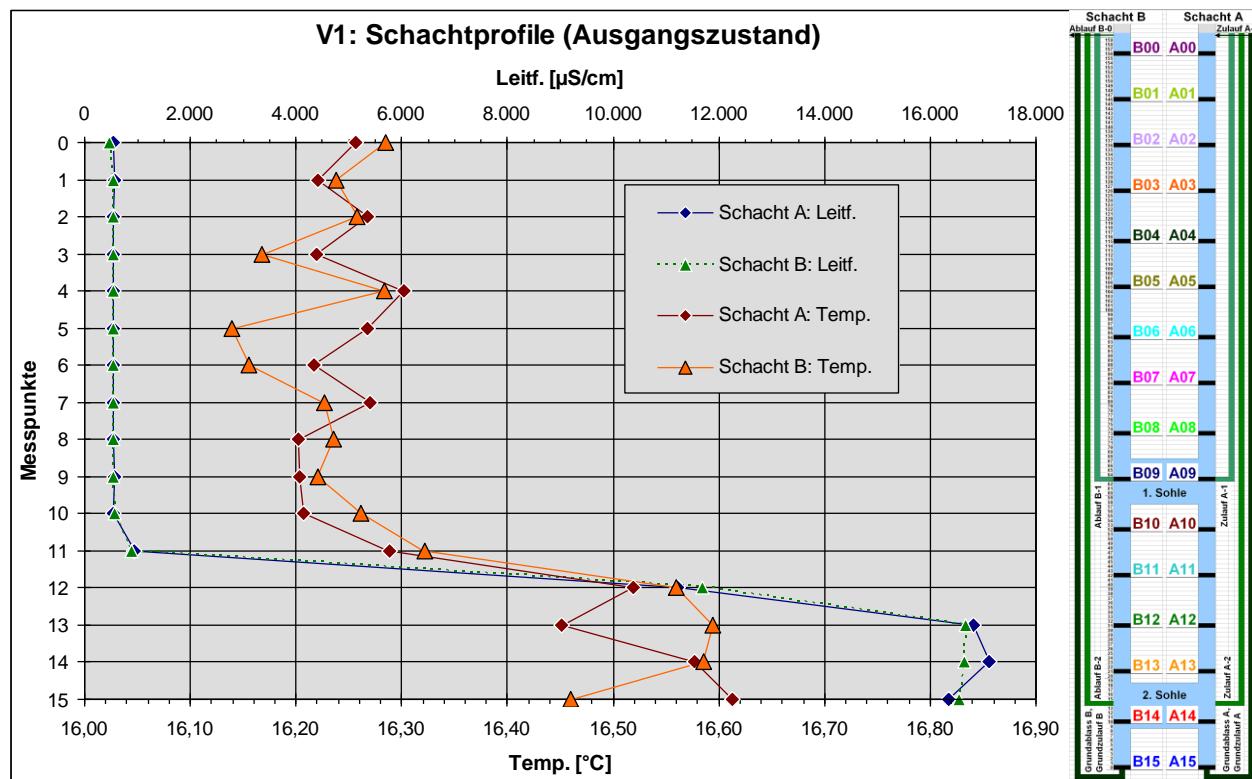


Abbildung 36: Leitfähigkeits- und Temperaturprofile in den beiden Schächten (Ausgangszustand mit Schichtung)

Die einzelnen Versuche dauerten mehrere Wochen oder Monate, der letzte Versuch V8 sogar fast ein Jahr; insgesamt ergab sich eine Versuchsdauer von ca. zwei Jahren (Nov. 2008 - Dez. 2010). Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht über die einzelnen Versuche.

Tabelle 1: Übersicht Schichtungsversuche

Versuch	Strömung	Art	Heizplatten	Versuchsdauer (Tage)	Effekt
V1	ca. 0,7 L/min, anschließend Ruhephase	Zulauf A-0, Ablauf B-0	nein	25+31=56	allmähl. Aussüßung, keine Durchmischung
V2 (Fortf. V1)	nein	–	konstant 25 °C, anschl. Ruhephase	21+10=31	Durchmischung nach 21 Tagen
V3	nein	–	stufenweise (1 °C) Aufheizung von 20 auf 25 °C (Intervalldauer 2-5 d), dann konst. 25 °C	14+35=49	Durchmischung nach 47 Tagen
V4	nein	–	konstant 30 °C	14	Durchmischung nach 13 Tagen
V5	ca. 0,6 L/min	Zulauf A-1, Ablauf B-1 („1. Sohle“)	konstant 25 °C, anschl. stufenweise (1 °C) Aufheizung von 25 auf 30 °C (Intervalldauer 7 d)	32+35=67	Aussüßung nach 64 Tagen
V6	ca. 0,5 L/min	Zulauf A-0, Ablauf B-0	konstant 25 °C	93	Aussüßung nach 89 Tagen
V7	ca. 0,5 L/min	Zulauf A-0, Ablauf B-0, tägl. Salzzufuhr im Tiefsten	konstant 25 °C	28	Aussüßung nach 19 Tagen
V8	ca. 0,5 L/min	Zulauf A-0, Ablauf B-0, tägl. bzw. 2-tägl. Salzzufuhr im Tiefsten	konstant 25 °C	322	Aussüßung (A13) nach 321 Tagen, Abbruch

In den folgenden Kapiteln werden die Schichtungsversuche und deren Ergebnisse näher erläutert. Die dort verwendeten Diagramme sind alle ähnlich aufgebaut. Dargestellt wird meist die Entwicklung der Leitfähigkeit (in  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und der Temperatur (in °C) an den einzelnen Messpositionen 00-15 (y-Achse) über die Zeit (x-Achse). Rechts neben dem Diagramm ist zur Veranschaulichung das Schema der Messsensorik in den Schächten (vgl. Abbildung 23) abgebildet. Die Farben der einzelnen Messpositionen finden sich in den Ganglinien im Diagramm wieder. Entsprechend den

realen Verhältnissen im Versuchsstand mit dem warmen, salzhaltigen Wasser unten nehmen auch auf der y-Achse Leitfähigkeit und Temperatur nach unten zu.

#### 4.2.4.1 Schichtungsversuch V1

Im 1. Versuch wurde der Einfluss eines kontinuierlichen Süßwasserzu-stroms, der über den Kopf von Schacht A zugeführt wurde, auf die beste-hende Schichtung untersucht. Der Abfluss erfolgte über den oberen Ab-gang des Schachtes B (Ablauf B-0). Nach etwa 3 Wochen wurde der Zu-fluss gestoppt und die weitere Entwicklung über ca. 4 Wochen beobachtet. Auf eine Erwärmung über die auf dem Boden des Kastens liegenden Heizplatten wurde verzichtet.

##### Versuchsbedingungen V1:

- Süßwasser: Leitungswasser
- Salzwasser: Leitungswasser versetzt mit 10 g NaCl/Liter (elektr. Leitfähigkeit ca. 17.300 µS/cm)
- Süßwasser-Salzwasser-Schichtung wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben
- kontinuierliche Wasserzuführung (Leitungswasser) über Kopf Schacht A mit ca. 0,7 L/min
- Abfluss über Schacht B (Ablauf B-0)
- keine Heizung
- Versuchsdauer Zustromphase: 24.11.08-19.12.08 (25 Tage)
- Versuchsdauer Ruhephase: 19.12.08-19.01.09 (31 Tage)

Die Süßwasser-Salzwasserschichtung (Abbildung 37, Abbildung 38) ist ersichtlich an den hohen Leitfähigkeiten unten (A15-A13 bzw. B15-B13: ca. 16.000 µS/cm) und den niedrigen Leitfähigkeiten oben (A11/B11: ca. 600 µS/cm, A10-A00 bzw. B10-B00: ca. 400 µS/cm).<sup>3</sup> Die Positionen A12/B12 mit anfänglich ca. 11.000 µS/cm liegen im Übergangsbereich. Im Verlauf der Zustromphase kommt es zu einer leichten Aussüßung des Salzwassers bis auf ca. 14.000 µS/cm. Im Übergangsbereich (A12/B12)

<sup>3</sup> Die Sonden wurden zwar auf die zu erwartenden Temperatur- (ca. 10-35 °C) und Leitfähigkeitsbereiche (ca. 200-20.000 µS/cm) geeicht, die Messwerte der einzelnen Zel-len sind allerdings nicht als „Absolutwerte“ anzusehen sondern eher als „Wertebereich“. So wird etwa die zu erwartende Reihenfolge an den Messpositionen im Tiefsten (15-14-13) nicht immer exakt abgebildet: innerhalb des schmalen Leitfähigkeitsbandes weist z. B. die Pos. 15 nicht die höchsten Werte auf (Abbildung 37). Der Wertebereich (ca. 16.000 µS/cm) ist jedoch korrekt.

nimmt die Leitfähigkeit deutlich, im Zustromschacht A bis fast auf Süßwasser-Niveau ab. Auch die noch leicht erhöhte Leitfähigkeit von Position A11/B11 nimmt etwas ab. Mit dem Zustromstopp am 19.12.08 findet diese Aussüßung ein Ende, die Schichtung stabilisiert sich wieder: die Salzwässer verharren bei ca. 14.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , die Leitfähigkeit von A12/B12 nimmt wieder deutlich bis auf ca. 7.000-8.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  zu und auch A11/B11 werden sichtbar bis auf ca. 1.200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aufkonzentriert. Grundlegende Unterschiede zwischen Schacht A und Schacht B sind nicht zu erkennen.

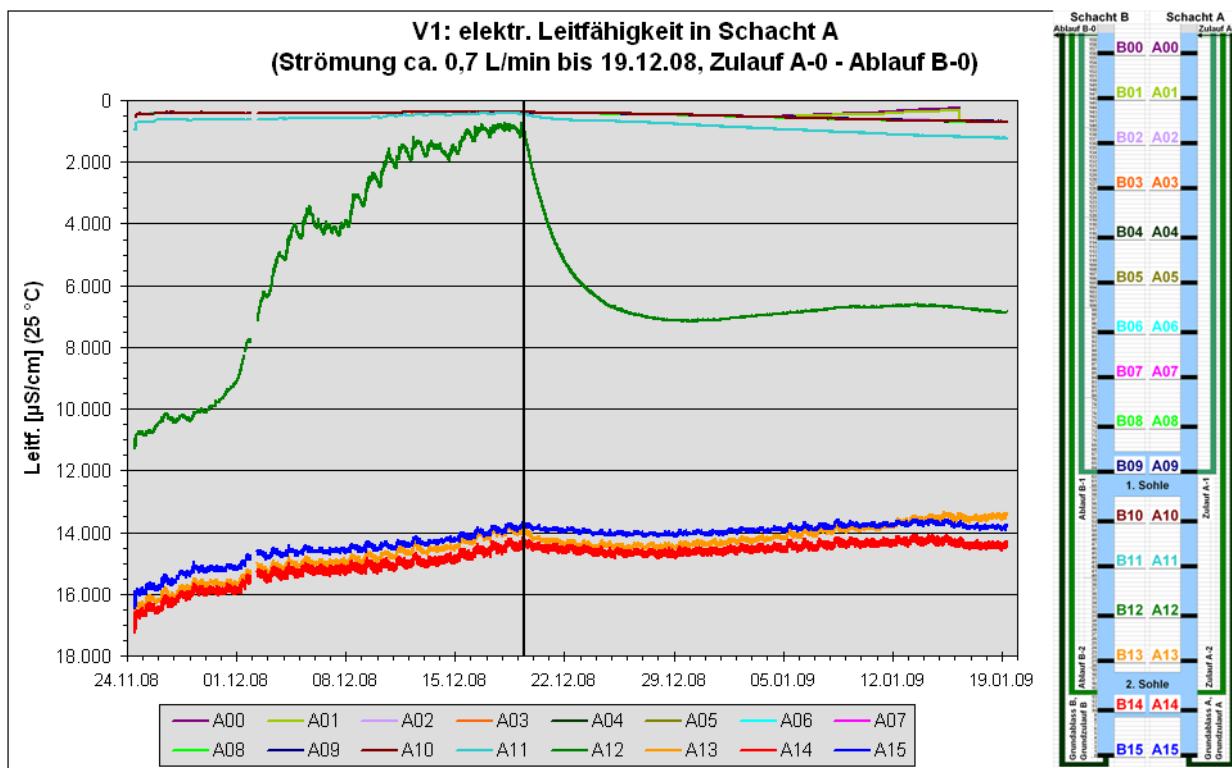


Abbildung 37: V1: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

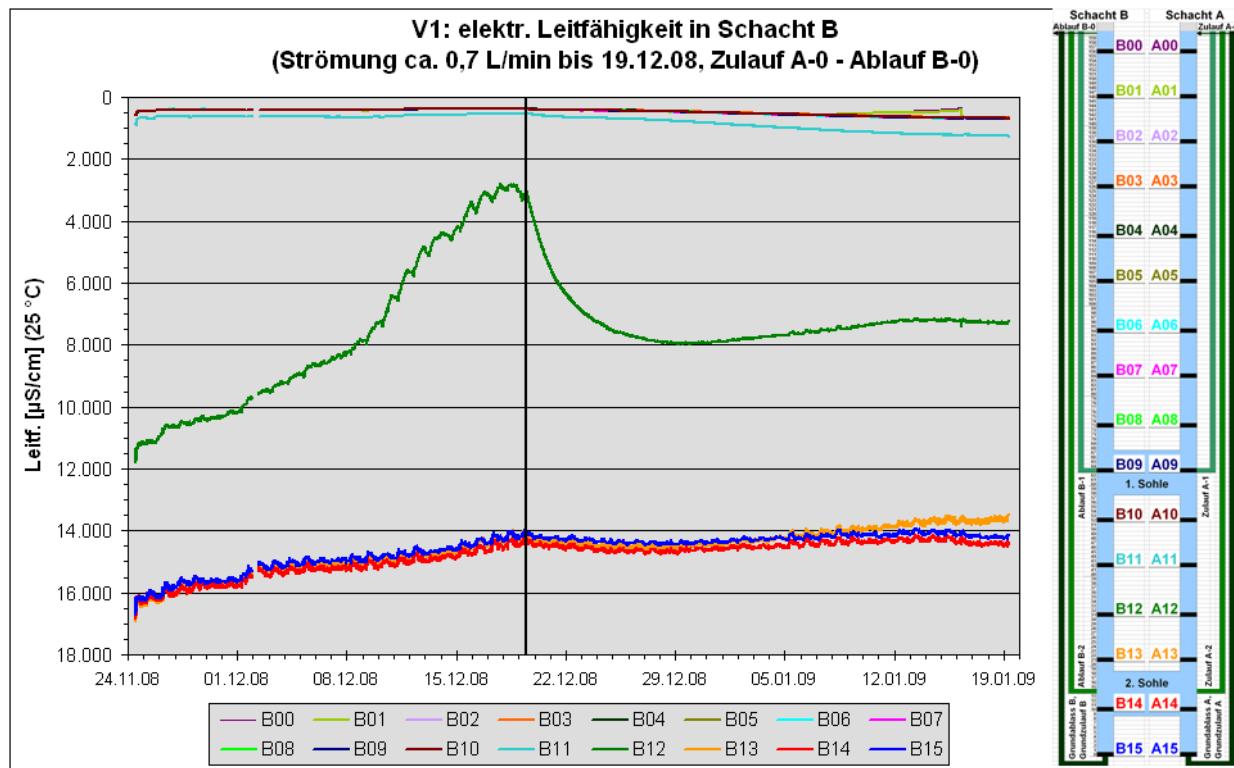


Abbildung 38: V1: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B

Ebenso wie bei der Leitfähigkeit gibt es auch bei der Temperatur (Abbildung 39, Abbildung 40) eine deutliche Unterteilung, allerdings mit einem bemerkenswertem Unterschied: die Pos. A 12, die bei der Leitfähigkeit einen Übergangsbereich abbildete, sortiert sich von Anfang an bei den Salzwässern ein.

Der Einfluss und die unmittelbare Reichweite des Leitungswasserzustromes lassen sich sehr gut verfolgen. Im Süßwasserbereich (A00-A11) erklären sich die regelmäßigen Schwankungen durch den Wasserverbrauch im Gebäude, d. h. durch die Verweilzeit im relativ warmen Leitungsnetz des Gebäudes. Während der Nacht wird wenig Wasser verbraucht. Entsprechend lang ist die Verweilzeit im Netz, so dass das Wasser morgens seine höchste Temperatur aufweist. Tagsüber ist die Verweilzeit aufgrund des höheren Wasserverbrauches geringer, d. h. das Frischwasser kann sich nicht so gut aufwärmen und folglich sind am späten Nachmittag die Wassertemperaturen am niedrigsten. Auch am Wochenende ist dieser Effekt sichtbar: wegen des generell geringeren Wasserbrauchs sind die Temperaturen im Mittel etwas höher und die Schwankungen geringer (z. B. 06./07.12.08). Das Volumen (ca. 120 L) des PE-Fasses (Kap. 4.2.3, Abbildung 24), durch das das Wasser geleitet wird, reicht als Puffer (Raumtemperatur) nicht aus - war allerdings dafür auch nicht vorgesehen.

Abgesehen von diesen rhythmischen Schwankungen, die auch in den anderen Versuchen V5-V8 mit Süßwasserzufuhr zu beobachten sind (Kap. 4.2.4.5-4.2.4.8), erfährt das Süßwasser in den Schächten generell eine Abkühlung, da das zuströmende Leitungswasser etwas kühler ist, als das durch die Raumtemperatur im Labor leicht „aufgeheizte“ Wasser im von der Strömung nicht tangierten tieferen Bereich. Dieser Einfluss ist bis Pos. A11 sichtbar, darunter (A13-A15) verlaufen die Temperatur-Ganglinien nahezu unbeeinflusst. Insgesamt kommt es zu einer leichten Temperaturabnahme während der Zustromphase. Ursache hierfür sind wahrscheinlich die anhaltend kalten Außentemperaturen, die sich in geringem Ausmaß bis auf das Frischwasserleitungsnetz durchpausen. Unmittelbar nach Zustromstopp erhöht sich die Wassertemperatur besonders im abgekühlten Süßwasserbereich schnell wieder und gleicht sich dem Salzwasser (und der Raumtemperatur) an. Zwischenzeitlich differieren die Temperaturen zwischen Süß- und Salzwasser wieder um ca. 0,5 °C, vermutlich verursacht durch die Erwärmung der Raumluft. Die Lüftungsöffnungen liegen in Deckenhöhe, zum anderen steigt warme Luft nach oben. Der Fußbodenbereich ist demzufolge etwas kühler - was sich auf die Temperatur im Rohrsystem durchpausen kann.

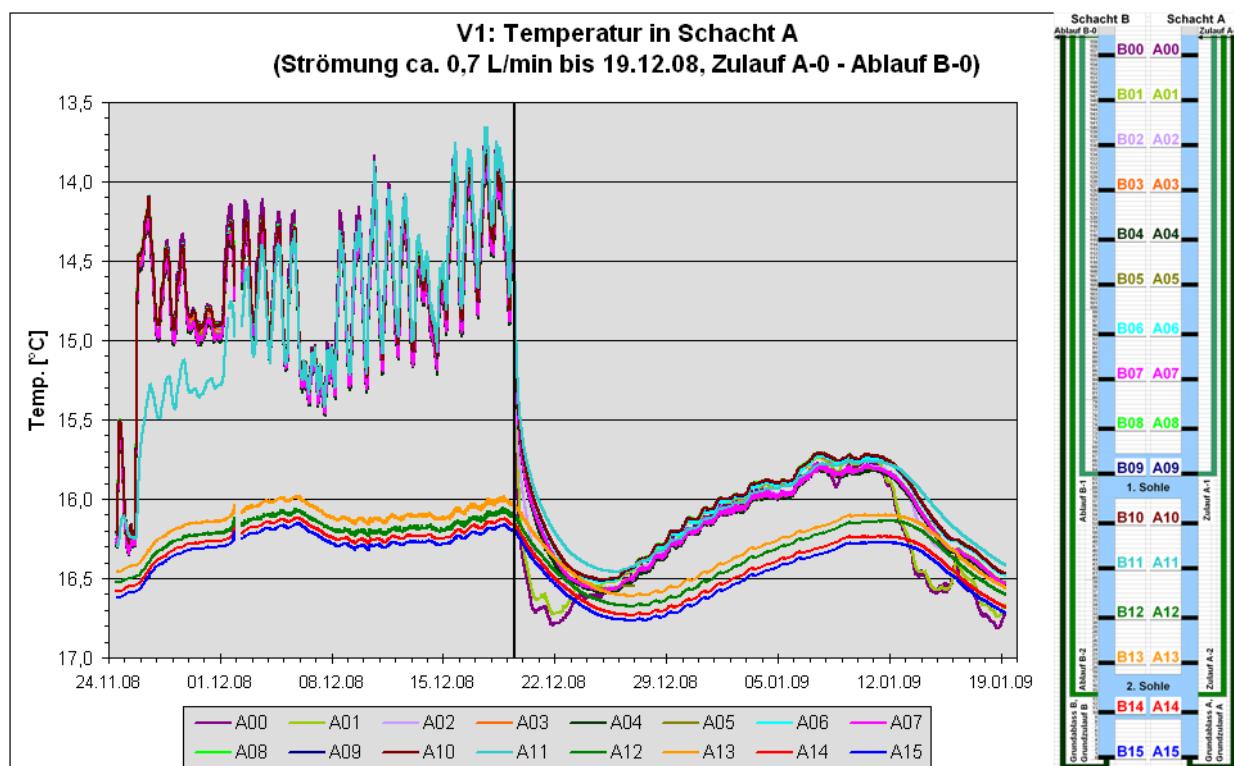


Abbildung 39: V1: Temperatur in Schacht A

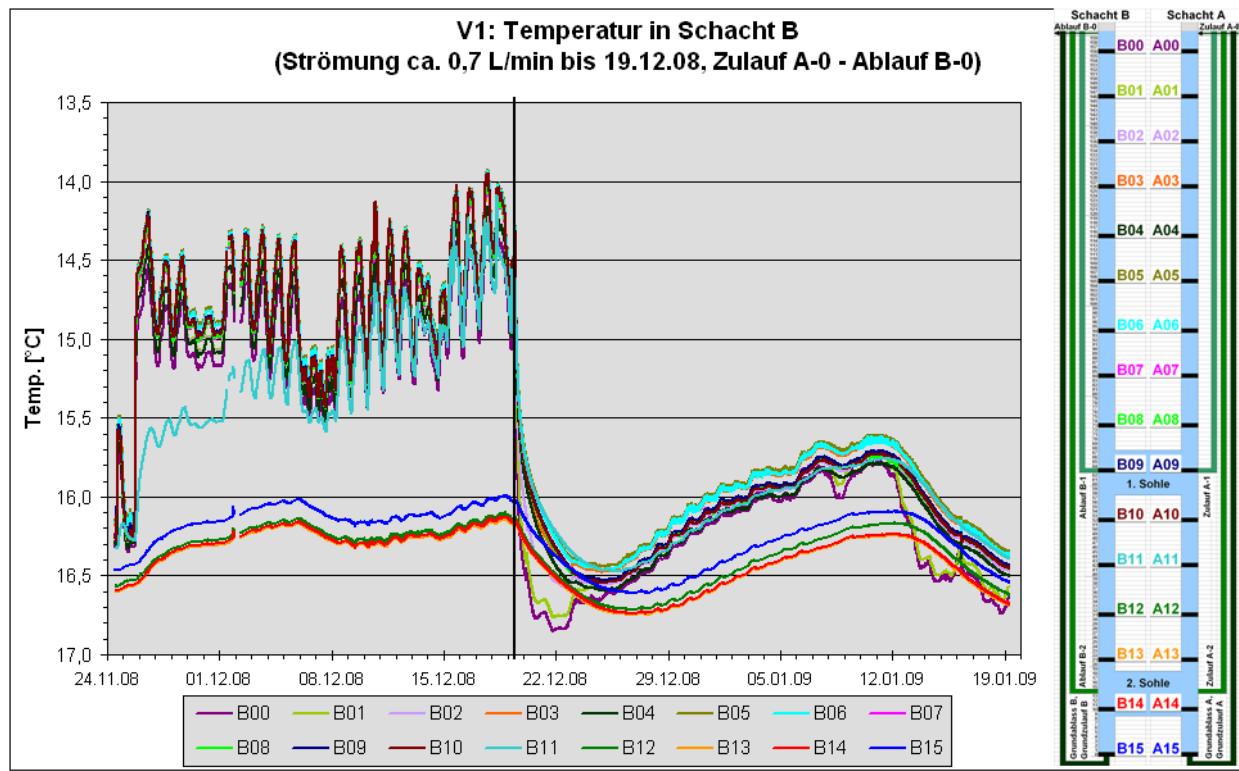


Abbildung 40: V1: Temperatur in Schacht B

Mit dem Süßwasserstrom wird kontinuierlich auch ein kleiner Salzanteil abgeführt (Aussüßung des Salzwassers). Unmittelbare Auswirkungen der Süßwasserströmung sind zwar bis etwas unterhalb der 1. Sohle nachweisbar (Aussüßung Pos. 12), sie schafft es jedoch in den gut 3 Wochen nicht, bis zur 2. Sohle vorzudringen und das schwerere Salzwasser zu verdrängen (rein rechnerisch wäre bei einer Zuflussrate von 0,7 L/min das gesamte Volumen im „Grubengebäude“ in ca. 1,5 Std. ausgetauscht). Zwar ist das Salzwasser ungefähr 1,5 °C wärmer als das Süßwasser, diese prinzipielle Dichteerniedrigung wird aber durch die hohe Salzkonzentration mehr als kompensiert (Abbildung 41). Mit dem Abschalten des Zuflusses stabilisiert sich die Schichtung wieder. In der letzten Versuchswocche hat sich die Temperatur im System - im Gegensatz zur Mineralisation - vereinheitlicht.

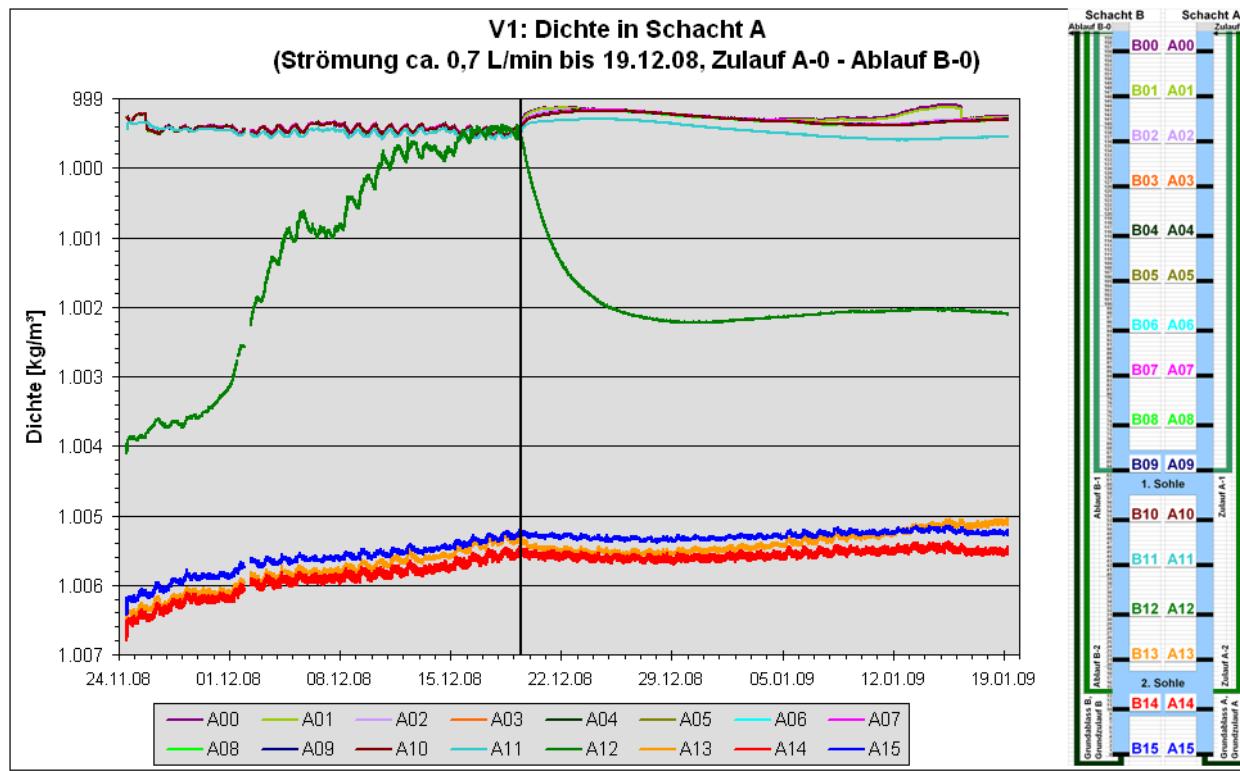


Abbildung 41: V1: Dichte in Schacht A

#### 4.2.4.2 Schichtungsversuch V2

Da die Schichtung in V1 noch intakt war, wurde mit diesem Versuch fortgefahrene. Nun sollte der Einfluss der Erwärmung untersucht werden, ein Zufluss wurde nicht aktiviert.

##### Versuchsbedingungen V2:

- Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung aus V1
- keine Wasserzuführung
- konstante Aufheizung über Heizplatten mit 25 °C
- Versuchsdauer Heizphase: 19.01.09-09.02.09 (21 Tage)
- Versuchsdauer Ruhephase: 09.02.09-19.02.09 (10 Tage)

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die Entwicklung ab dem 12.01.09, die letzte Woche aus V1 ist also die erste Woche von V2. Die oberen beiden Sonden (A00/B00, A01/B01) fielen zeitweise trocken, was zu atypischen Werten führte. Der Versuch wurde dadurch jedoch nicht beeinträchtigt.

Mit Beginn der Aufheizung am 19.01.09 kommt es zu einer schnellen Erwärmung des Wassers und zu einer deutlichen Aufspaltung des vorher einheitlichen Temperaturniveaus von Süß- und Salzwasser (Abbildung 42, Abbildung 43). So erwärmt sich das Süßwasser von ca. 16,5 °C auf gut 20 °C, das Salzwasser bis auf etwa 23,5 °C. Am 29.01.09 wurde Wasser im Kasten (nicht im Rohrsystem) nachgefüllt, da der Wasserspiegel mittlerweile bis auf den Sand abgesunken war. Dieses Nachfüllen mit (kühllem) Leitungswasser macht sich im Süßwasserbereich (A00-A11, B00-B11) mit einer Temperaturerniedrigung von ca. 1 °C bemerkbar, im Salzwasserbereich sind kaum Einflüsse erkennbar.

Im Laufe der nächsten Woche kommt es zu einer kontinuierlichen Temperaturerhöhung (Süßwasser) bzw. –erniedrigung (Salzwasser), d. h. die beiden Temperaturbereiche nähern sich einander bis auf ca. 1,5 °C Differenz an. In der Nacht vom 08.01. auf den 09.01.09 kommt es dann, 3 Wochen nach dem Start der Heizung, „schlagartig“ (innerhalb von etwa 2 Stunden) zur Vermischung auf eine einheitliche Temperatur von ca. 21 °C (Abbildung 44, Scht. B verhält sich analog). A11/B11 und A10/B10 nehmen diese Mischung vorweg, indem sie am 02.02. bzw. 07.02.09 ebenso schlagartig die höhere Temperatur des Salzwasserbereiches annehmen.

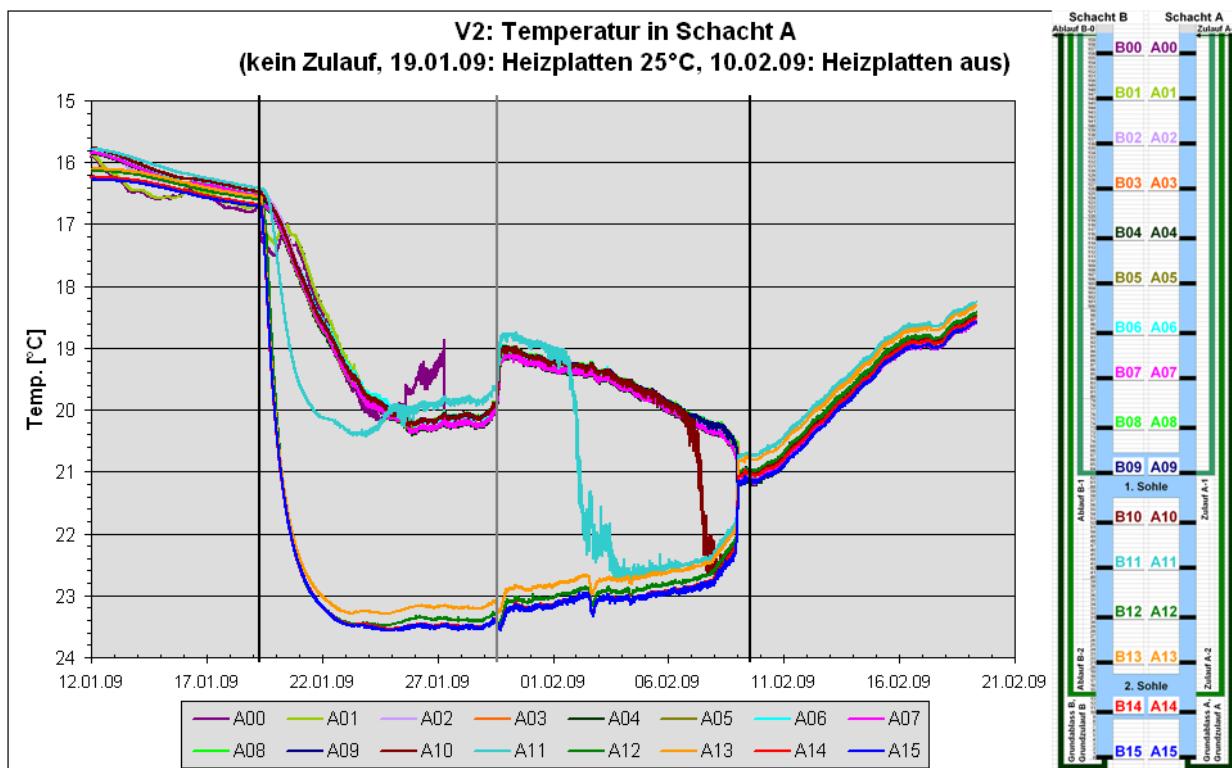


Abbildung 42: V2: Temperatur in Schacht A

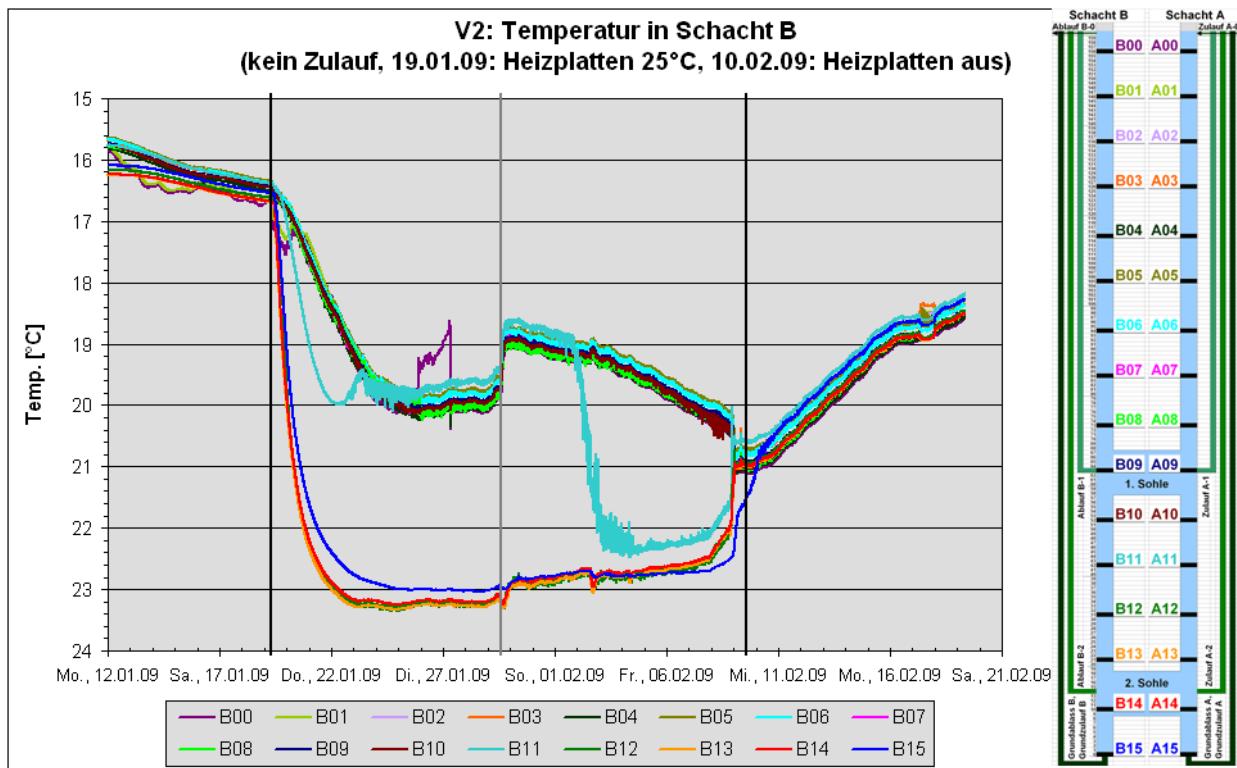


Abbildung 43: V2: Temperatur in Schacht B

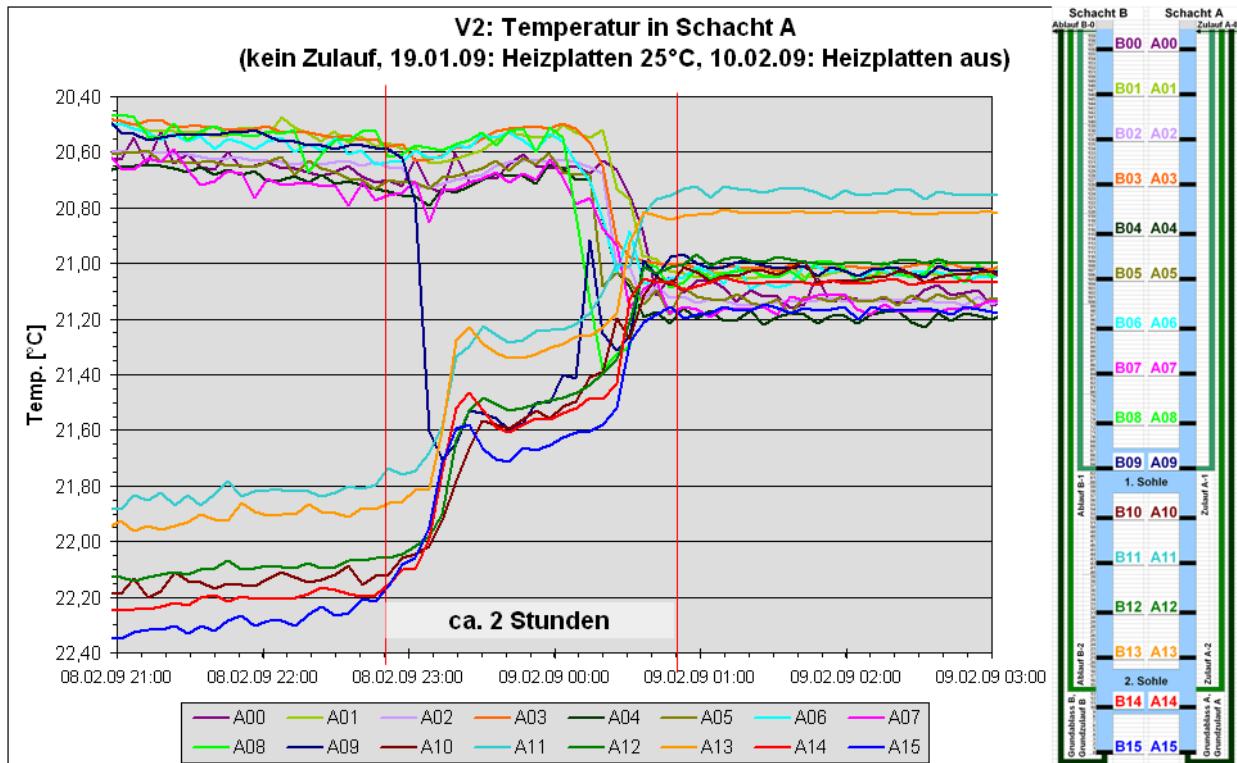


Abbildung 44: V2: Temperatur-Durchbruch in Schacht A

Ähnlich wie bei der Temperatur kommt es auch bei der Mineralisation zu einer erst langsamen Annäherung, die dann schlagartig in einer einheitlichen Leitfähigkeit von ca. 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  mündet (Abbildung 45, Abbildung 46) - mit einigen bemerkenswerten Unterschieden:

Wie bei V1 (Kap. 4.2.4.1) bereits beschrieben, bildet die Pos. A12/B12 bei der Mineralisation den Übergangsbereich ab (sortiert sich bei der Temperatur aber von Anfang an beim Salzwasser ein). A12/B12 ordnet sich in der Folge erst bei den Süßwässern ein (d. h. die Leitfähigkeit sinkt rapide ab) und dann wieder bei den Salzwässern (Anstieg), um zum Schluss den Verlauf des Salzwassers - einschließlich Vermischung mit dem Süßwasser - mitzumachen. Einen ähnlichen, nicht so ausgeprägten Verlauf nimmt auch A11/B11.

Die Differenzen zwischen den Süß- und Salzwassertemperaturen bzw. -leitfähigkeiten unmittelbar vor der kompletten Vermischung liegen bei etwa 1,3 °C bzw. 900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

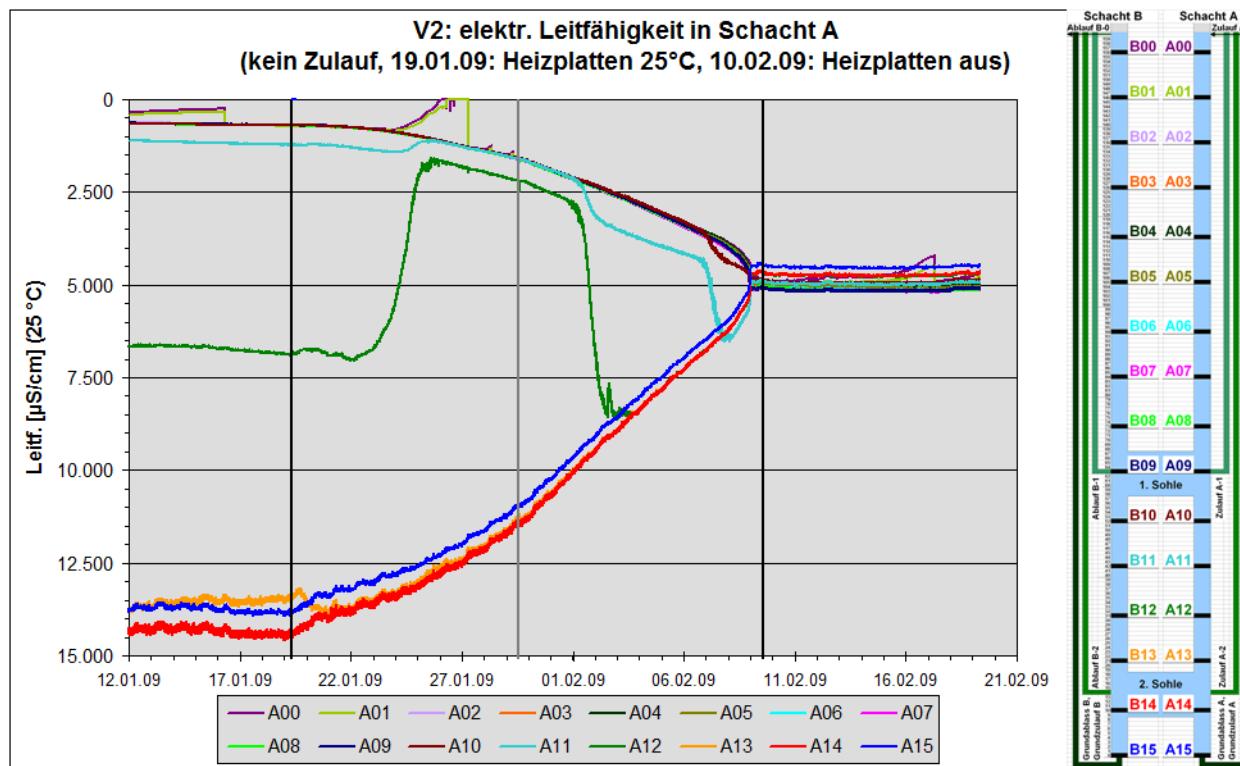


Abbildung 45: V2: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

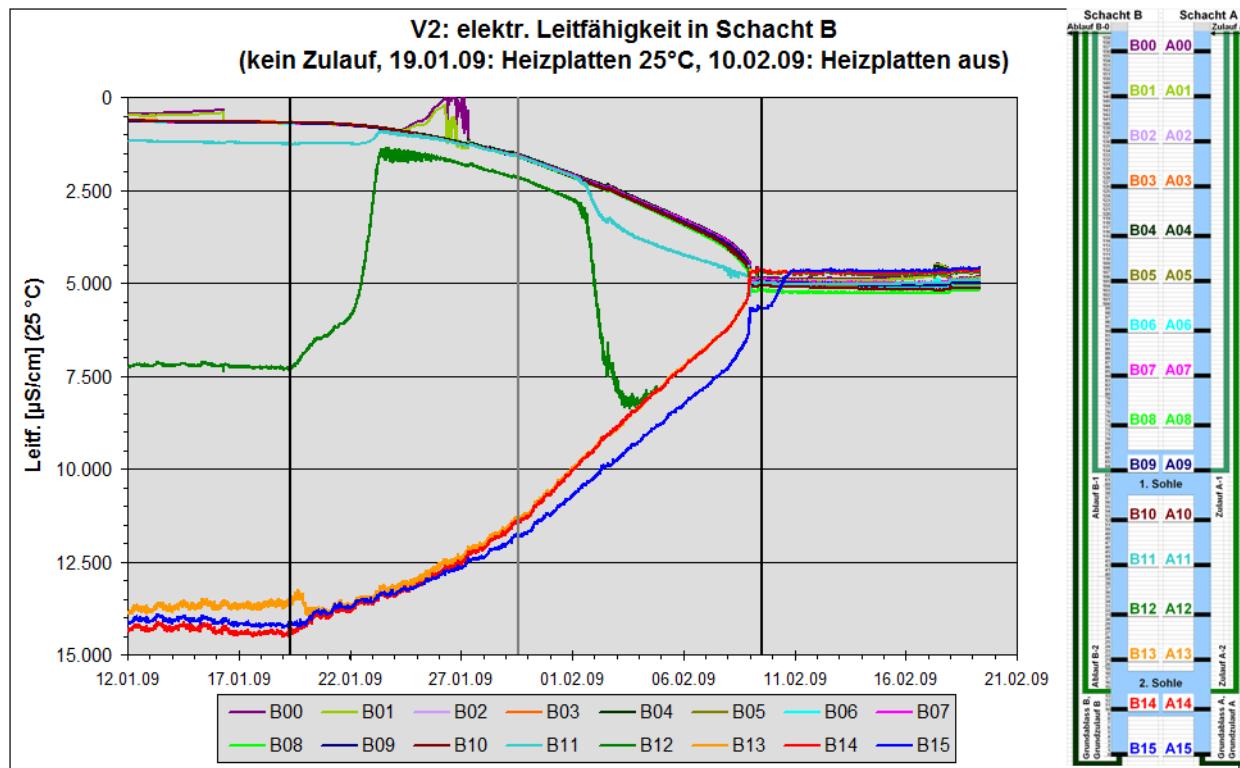


Abbildung 46: V2: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B

In der anschließenden 10-tägigen Ruhephase nehmen die Temperaturen aufgrund des Fehlens der Heizung zwar von ca. 20,5 °C auf ca. 17 °C ab, dies jedoch einheitlich in der gesamten Säule. Die Leitfähigkeit bleibt konstant bei etwa 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , d. h. es kommt nicht wieder zu einer Entmischung.

Die Erwärmung führt zu einer stetigen Annäherung von Temperatur und Mineralisation des Süß- und Salzwassers. Nach 21 Tagen erfolgt der „Durchbruch“ zu einheitlichen Verhältnissen schließlich innerhalb weniger Stunden.

Mineralisation und Temperatur verhalten sich jedoch nicht gleich: So bildet A12/B12 bei der Mineralisation einen Übergangsbereich zwischen Süß- und Salzwasser, während die Temperatur von Anfang an dem des Salzwassers entspricht.

Auch bei A11 verlaufen die Änderungen von Temperatur und Mineralisation nicht synchron: Die Temperaturänderung (Erhöhung auf Salzwasserniveau) erfolgt einige Tage vor der Leitfähigkeitserhöhung - und zwar zu dem Zeitpunkt, als die Leitfähigkeit von A12 auf Salzwasserniveau an-

steigt (Abbildung 47). Einige Tage später wiederholt sich dieser Vorgang „eine Etage höher“: Die Mineralisation (Leitfähigkeit) von A11 erhöht sich auf Salzwasserniveau, zur gleichen Zeit steigt die Temperatur von A10 an. Die Temperaturerhöhung „eilt“ demnach der Erhöhung der Leitfähigkeit um einen Schritt voraus (Abbildung 48).

Dieses Verhalten ist der im Vergleich zur Salinität höheren Diffusivität von Wärme geschuldet (vgl. Kap. 3.5): ein Wasserteilchen gibt Wärme schneller an die kältere Umgebung ab als es Salz verliert.

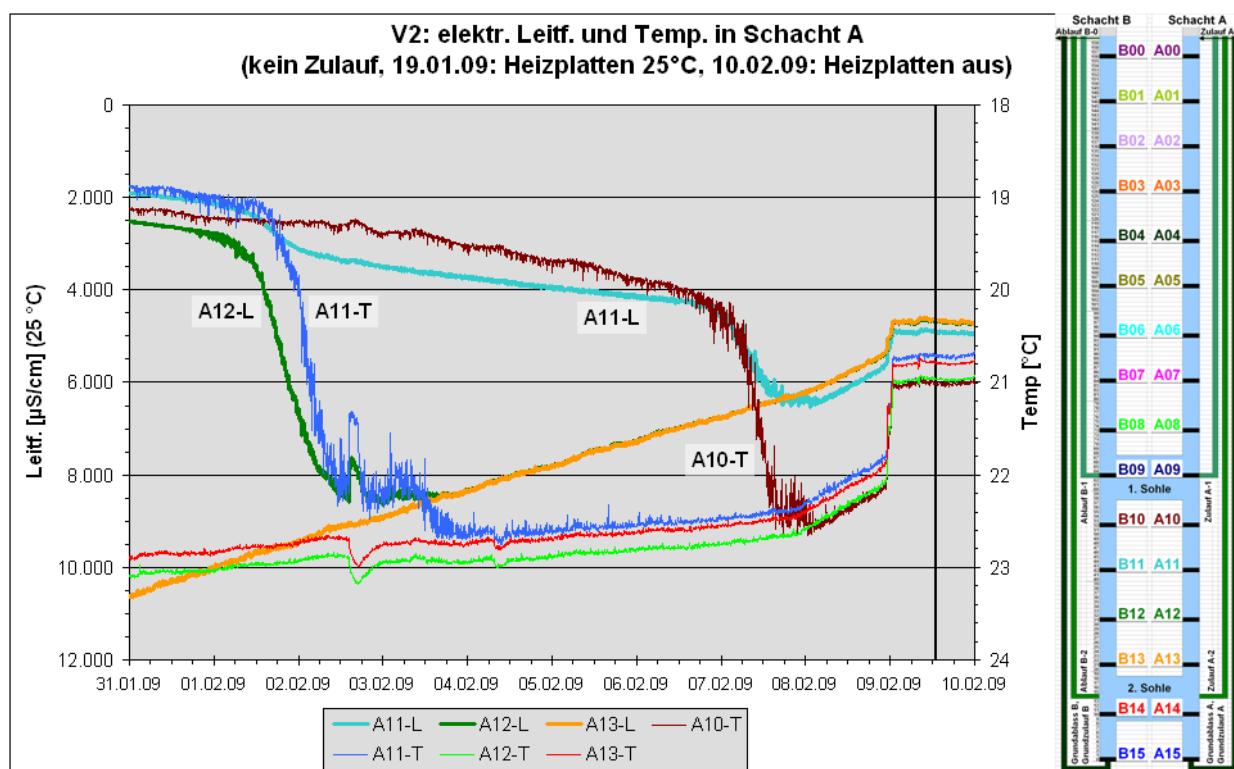


Abbildung 47: V2: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A10-A13)

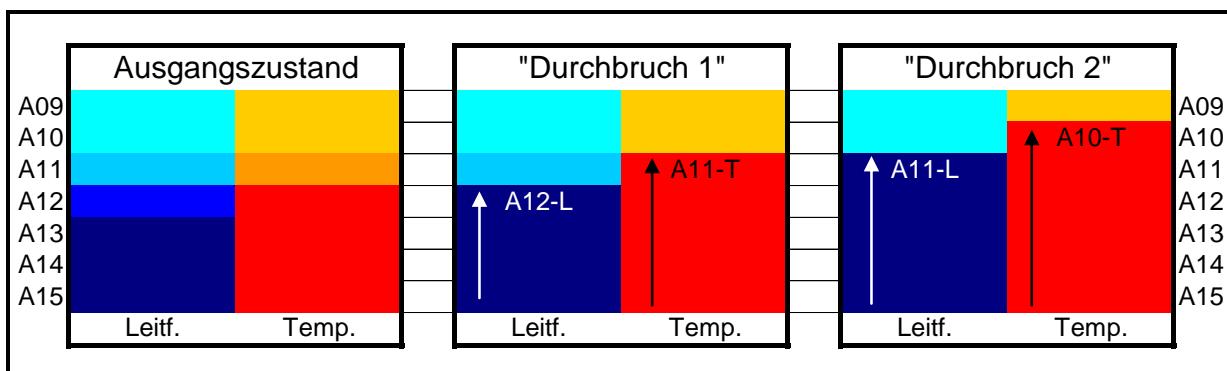


Abbildung 48: V2: Schema der schrittweisen Leitfähigkeits- und Temperaturerhöhungen

Wie die Versuche V1 und V2 gezeigt haben, unterscheidet sich der Ganglinienverlauf von Leitfähigkeit und Temperatur in den beiden Schächten A und B kaum voneinander. Da dies auch bei den weiteren Versuchen der Fall ist, wird im Folgenden nur noch auf Schacht A Bezug genommen.

#### 4.2.4.3 Schichtungsversuch V3

Da V2 mit der Vermischung von Süß- und Salzwasser endete, wurde für V3 eine neue Schichtung, wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben, hergestellt. Auch für diesen Versuch wurde kein Zufluss aktiviert. Im Unterschied zu V2 wurde die Heizleistung, ausgehend von 20 °C, stufenweise um jeweils 1 °C bis auf schließlich 25 °C erhöht. Jede Stufe wurde mehrere Tage gehalten, die Endstufe (25°C) schließlich etwa 1 Monat.

##### Versuchsbedingungen V3:

- neue Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung [10g NaCl/L]
- keine Wasserzuführung
- stufenweise Aufheizung von 20 °C auf 25 °C, dann konstant 25 °C
- Intervalldauer Aufheizphase: jeweils 2-5 Tage
- Versuchsdauer Aufheizphase 20-25 °C: 02.03.-16.03.09 (14 Tage)
- Versuchsdauer Heizphase 25 °C: 16.03-20.04.09 (35 Tage)

Ab diesem Versuch wurde, wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben, neben der Messsensorik in den Schächten auch eine Überwachung der Temperatur im Kasten sowie der Raumtemperatur („Umgebungsmonitoring“ T1-T6) installiert (vgl. Abbildung 34, S. 72). Die Temperatur der Raumluft (T6) lässt einen deutlichen Tag/Nacht-Rhythmus erkennen (Abbildung 49). Ab etwa Anfang April 2009 wird es allgemein deutlich wärmer. Die beiden unteren Temperaturfühler im Kasten (T2, T4) reagieren auf die Erwärmung durch die Heizplatten, die drei oberen Temperaturfühler (T1, T3, T5) werden stärker durch die Raumluft beeinflusst.

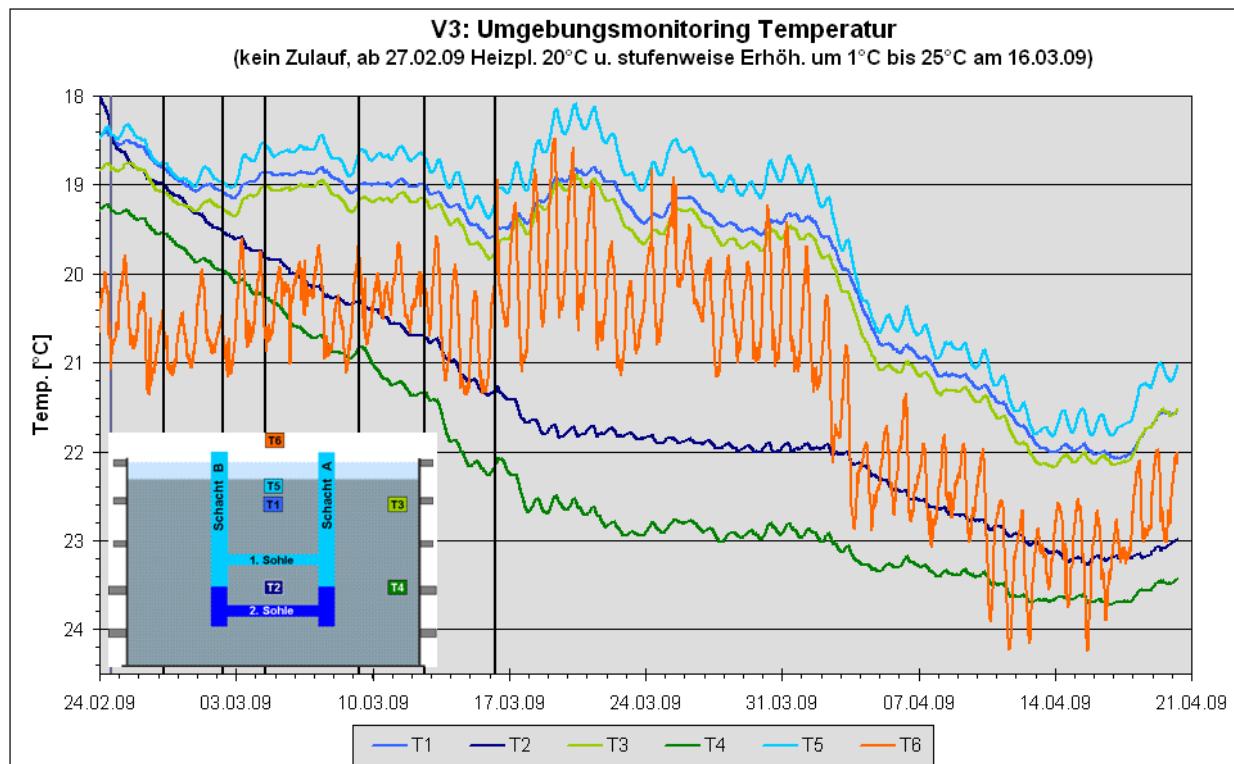


Abbildung 49: V3: Umgebungsmonitoring

Abgesehen von der zwischenzeitlichen Aussüßung von A12 und A11 verläuft der V3 im Prinzip wie V2 (Kap. 4.2.4.2). Im Zuge der Aufheizung erfolgt eine deutliche Trennung von höher (A12-A15) und niedriger (A00-A11) temperierten Wässern (Abbildung 50). Im Laufe der Zeit kommt es zu einer sukzessiven Aussüßung der Salzwässer und Aufsalzung der Süßwässer (Abbildung 51). Auf dem Weg der Mineralisationsangleichung kommt es in der Reihenfolge A12-A11 im Abstand einiger Tage wieder zur raschen Aufsalzung auf „Salzwasserniveau“ (auch A10 wird etwas aufmineralisiert), bevor es im letzten (kleinen) Schritt zur schlagartigen Vermischung kommt. Auch die Temperaturdifferenzen werden mit der Zeit geringer, wobei die höheren Salzwassertemperaturen recht konstant gehalten bleiben und sich die niedrigeren Süßwassertemperaturen erhöhen - bis zur schlagartigen Vermischung.

Die Dichte (Abbildung 52) ist deutlich salinitätsbeherrscht, sind die Ganglinienverläufe der elektr. Leitfähigkeit (Abbildung 51) und der Dichte doch sehr ähnlich. Kleine Abweichungen gibt es nur dort, wo sich die Temperatur deutlich erhöht (Abbildung 50: A11, A10): die Dichte wird etwas geringer.

Wieder eilt dem sprunghaften Mineralisationsanstieg die Temperaturerhöhung um einen Schritt voraus (Abbildung 53: A12-L – A11-T, A11-L – A10-T).

Die Differenzen zwischen den Süß- und Salzwassertemperaturen bzw. -leitfähigkeiten unmittelbar vor der kompletten Vermischung sind viel geringer als bei V2 und liegen bei etwa 0,8 °C bzw. 250 µS/cm.

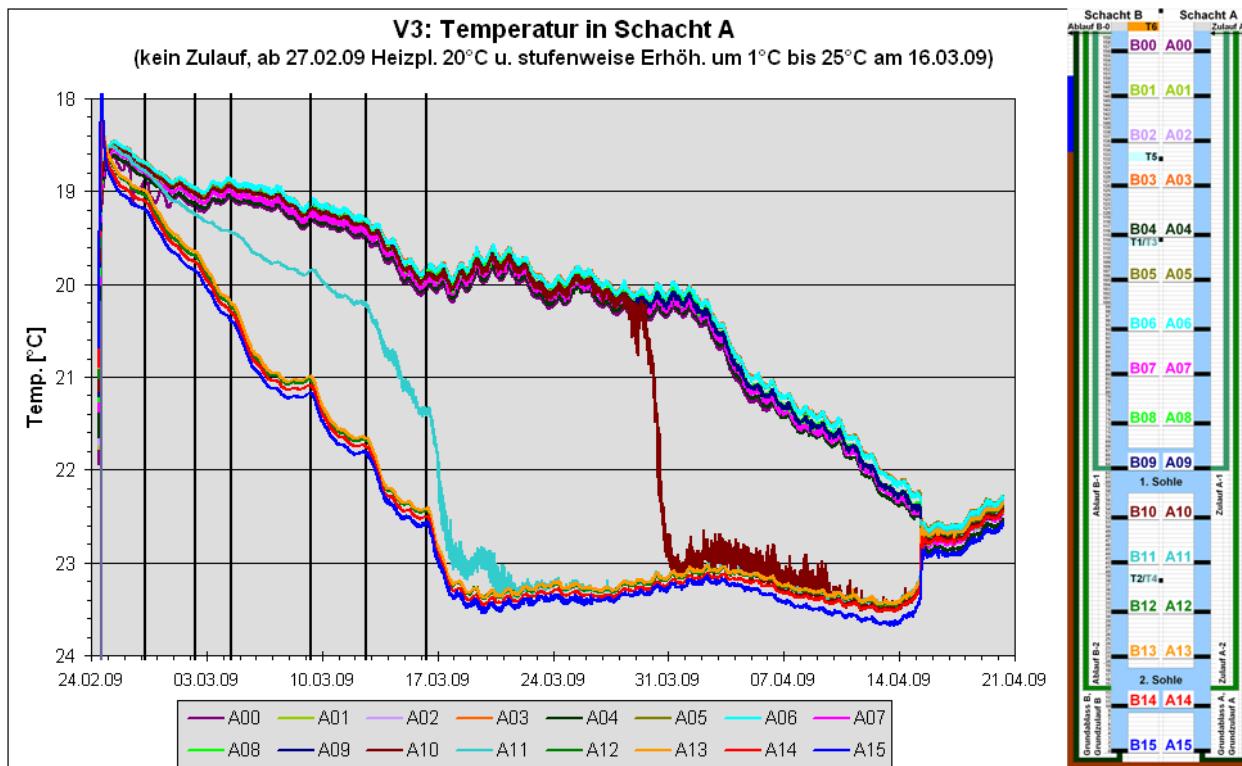


Abbildung 50: V3: Temperatur in Schacht A

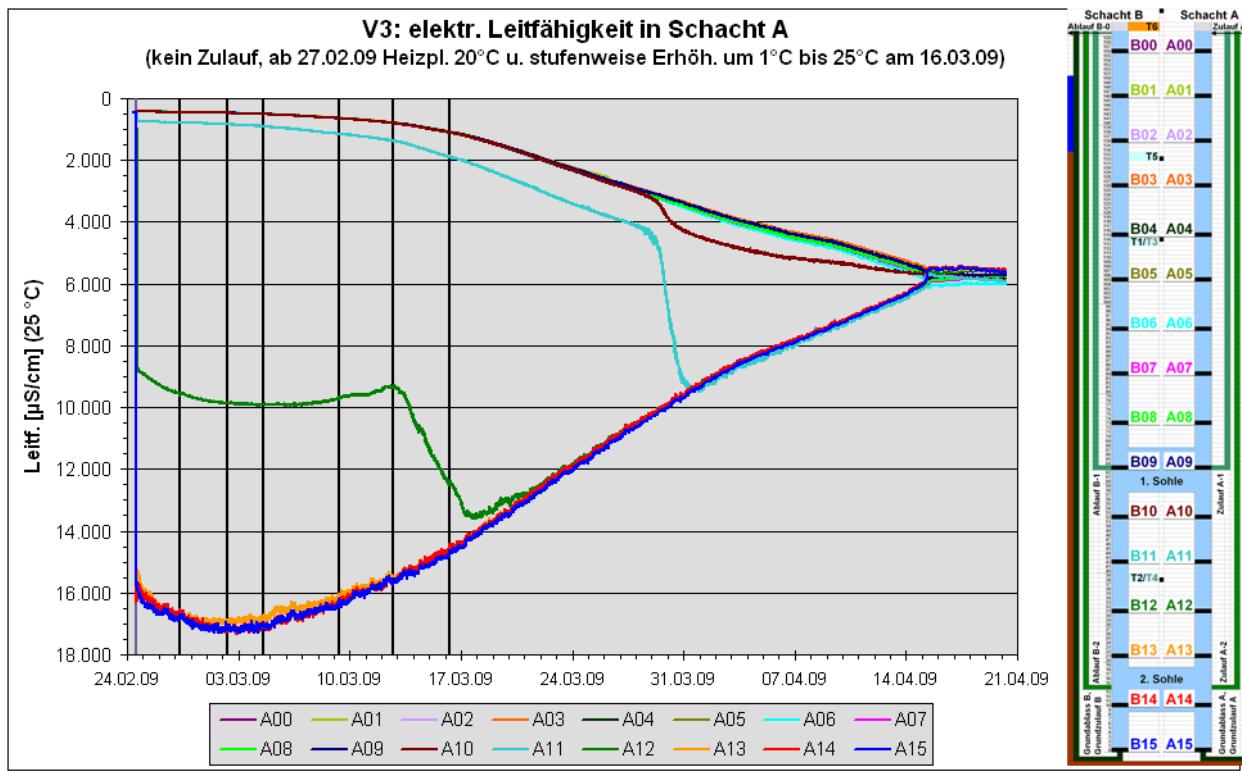


Abbildung 51: V3: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

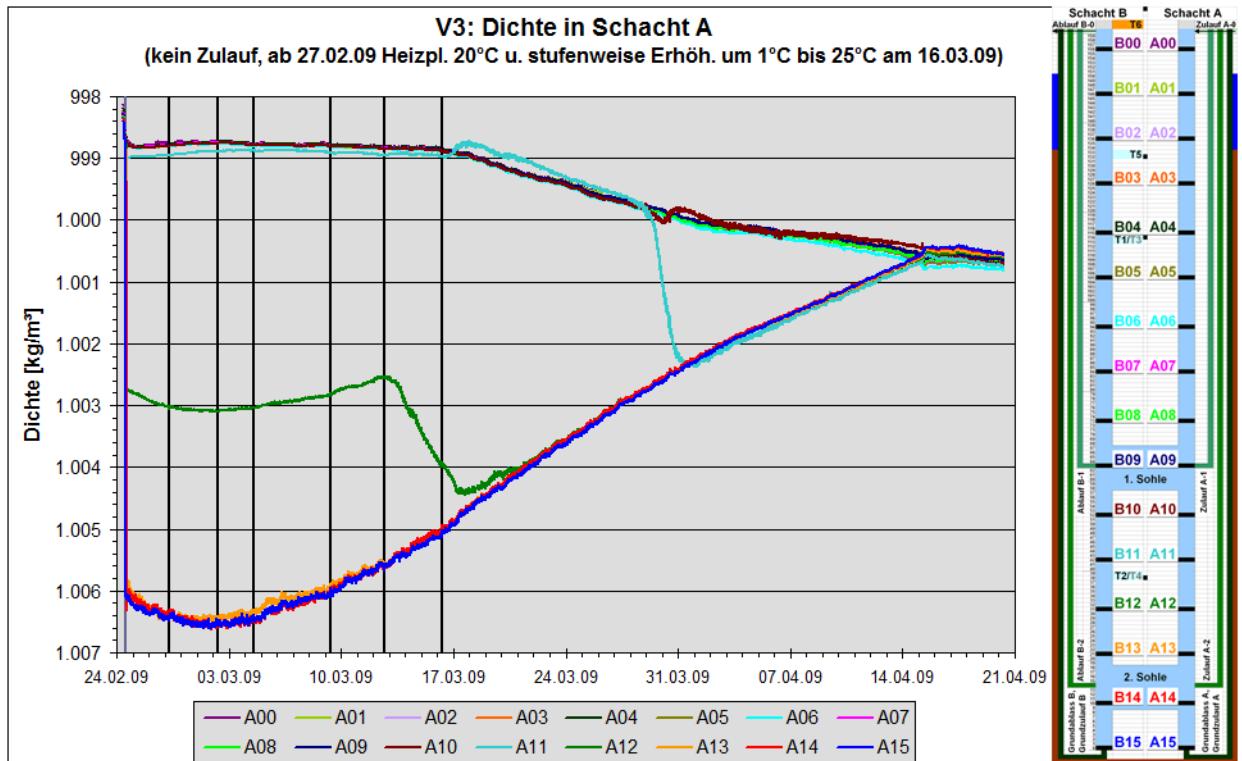


Abbildung 52: V3: Dichte in Schacht A

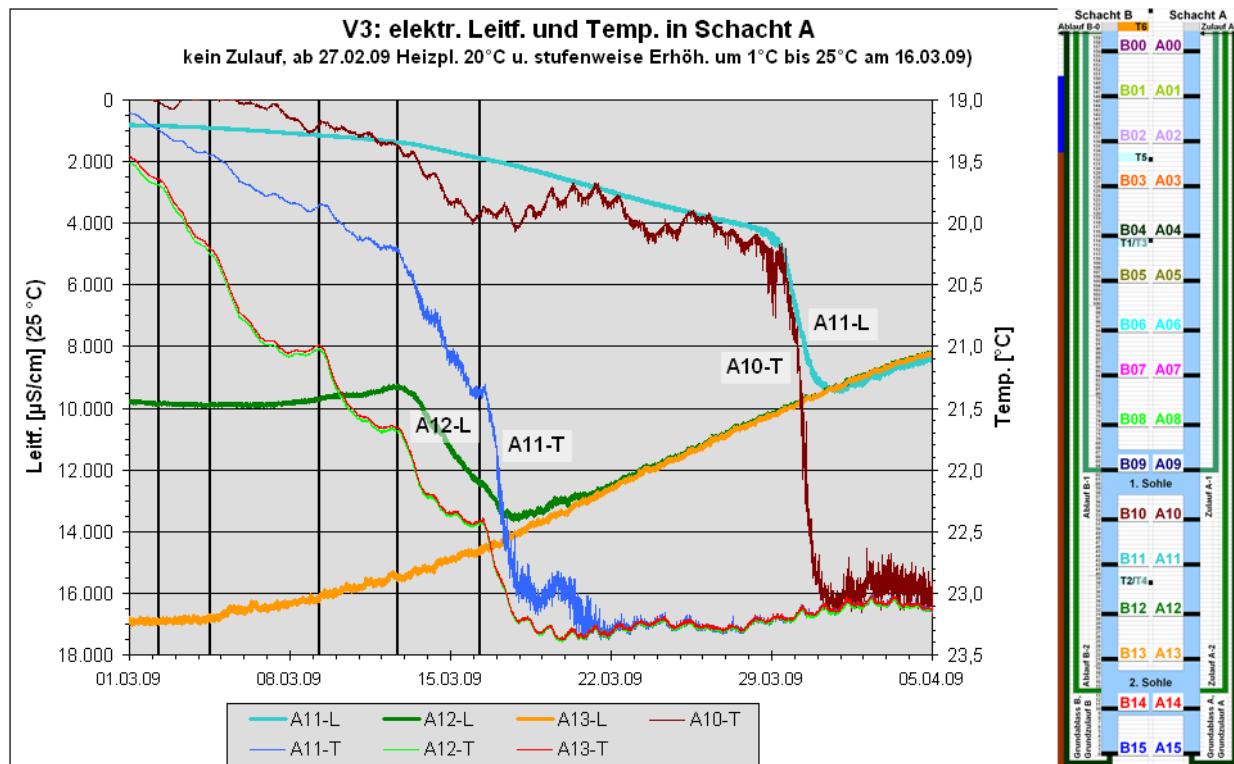


Abbildung 53: V3: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A10-A13)

Die stufenweise Temperaturerhöhung findet sich wieder in der schrittweisen Erhöhung der Salzwassertemperaturen, ansonsten verläuft der Versuch V3 ähnlich wie V2.

Die Erwärmung führt zu einer stetigen Annäherung von Temperatur und Mineralisation des Süß- und Salzwassers. Der „Durchbruch“ nach 47 Tagen zu einheitlichen Verhältnissen erfolgt wieder innerhalb weniger Stunden. Wie bei V2 werden im Versuchsverlauf die Mineralisationsniveaus oberhalb des Salzwassers (A12, A11) sprunghaft aufmineralisiert, ungefähr zeitgleich mit einer ebenfalls sprunghaften Temperaturerhöhung von A11 und A10; das für V2 beschriebene Schema der schrittweisen Leitfähigkeits- und Temperaturerhöhungen bleibt erhalten: die Temperaturerhöhung eilt dem Mineralisationsanstieg um einen Schritt voraus (Abbildung 53, vgl. Abbildung 48, S. 87).

Bis zum „Durchbruch“ dauert es mit 47 Tagen gut doppelt so lange wie bei V2 (21 Tage). Bei beiden Versuchen war keine Strömung aktiviert, V3 lief anfangs jedoch nur bei gemäßigten Heizbedingungen (20 °C), die stufenweise bis auf 25 °C erhöht wurden, während V2 gleich mit 25 °C startete.

#### 4.2.4.4 Schichtungsversuch V4

Nach dem Herstellen einer neuen Schichtung wurde für diesen 4. Versuch, bei ebenfalls nicht aktiviertem Zufluss, die Heiztemperatur von Anfang an auf 30 °C eingestellt.

##### Versuchsbedingungen V4:

- neue Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung [10g NaCl/L]
- keine Wasserzuführung
- konstante Heizung von 30 °C
- Versuchsdauer Heizphase 25 °C: 24.04-08.05.09 (14 Tage)

Das Umgebungsmonitoring (Abbildung 54) zeigt die aus dem letzten Versuch bekannte Zweiteilung: Die beiden unteren Temperaturfühler im Kasten (T2, T4) reagieren auf die Erwärmung durch die Heizplatten, die drei oberen Temperaturfühler (T1, T3, T5) werden stärker durch die Raumluft (T6) beeinflusst. Insgesamt machen sich die ausgeglichenen Lufttemperaturen in nur noch geringen Schwankungen der Raumluft bemerkbar.

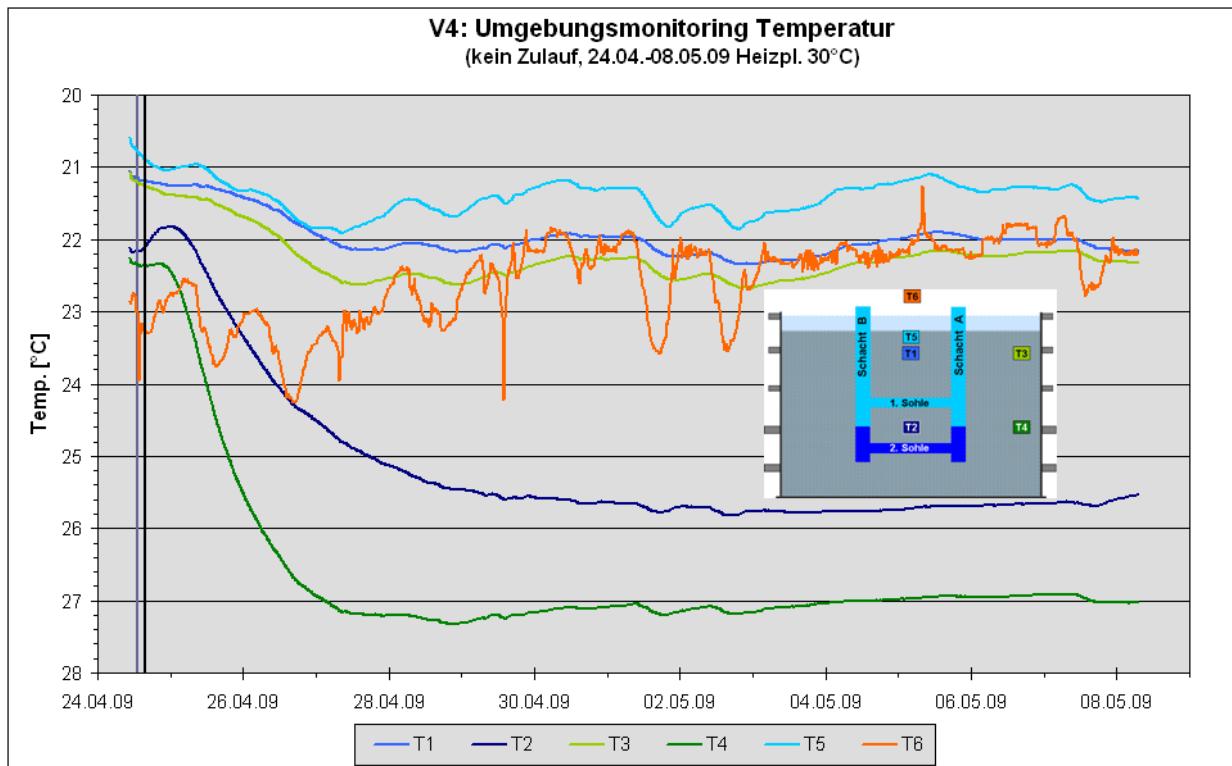


Abbildung 54: V4: Umgebungsmonitoring

Die Heizleistung von 30 °C macht sich gegenüber V3 in den höheren Temperaturen (Salzwasser ca. 28 °C, Süßwasser ca. 23,5 °C) bemerkbar und der gleichmäßige Verlauf der Außenlufttemperatur führt zu geringeren Temperaturschwankungen, ansonsten verläuft der Versuch V4 bis zur Vermischung zwar deutlich kürzer, aber analog zu V3 (Abbildung 55, Abbildung 56).

Die Differenzen zwischen den Süß- und Salzwassertemperaturen bzw. -leitfähigkeiten unmittelbar vor der kompletten Vermischung sind größer als bei V3 und liegen bei etwa 1,7 °C bzw. 1500 µS/cm.

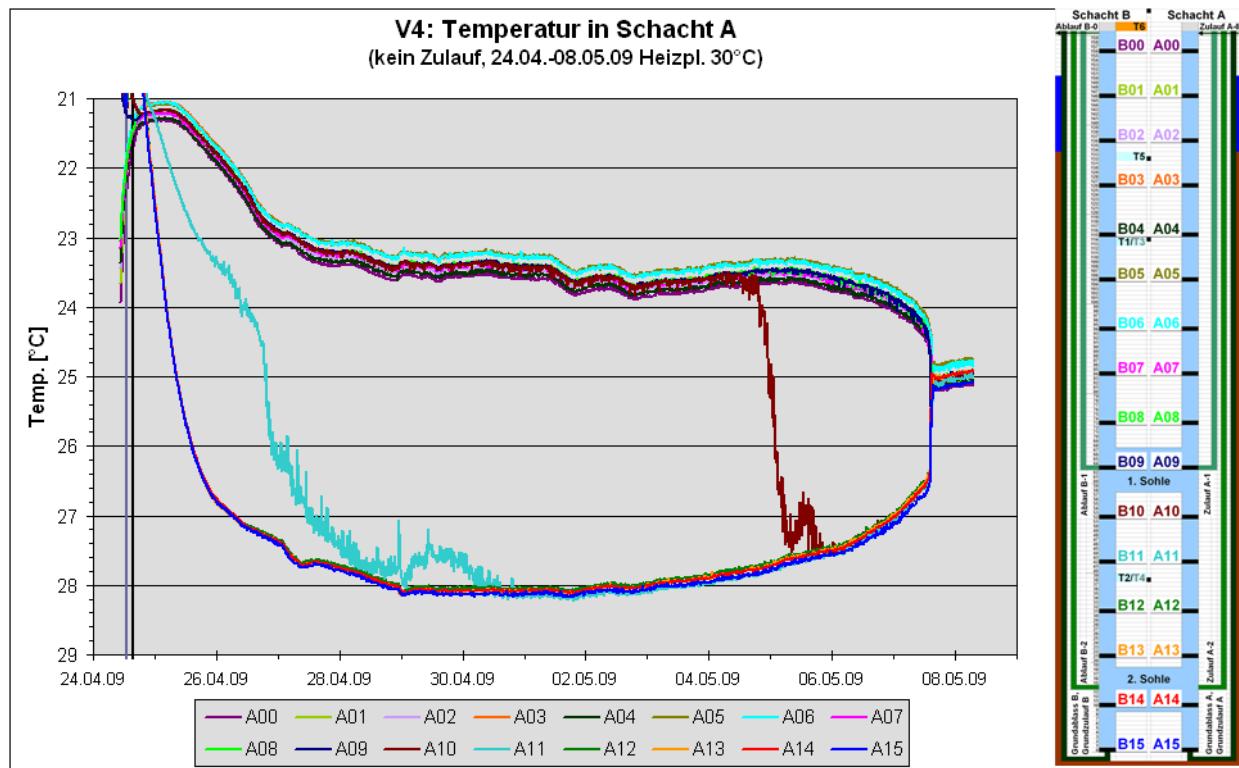


Abbildung 55: V4: Temperatur in Schacht A

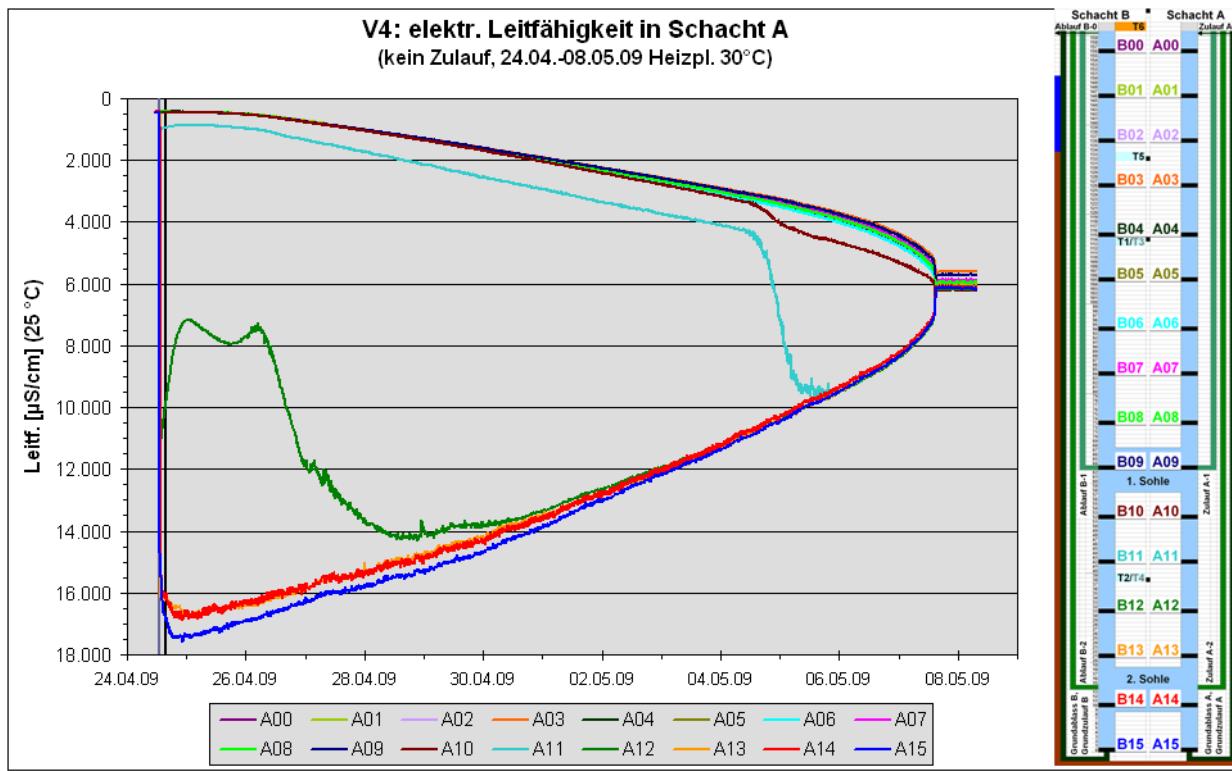


Abbildung 56: V4: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

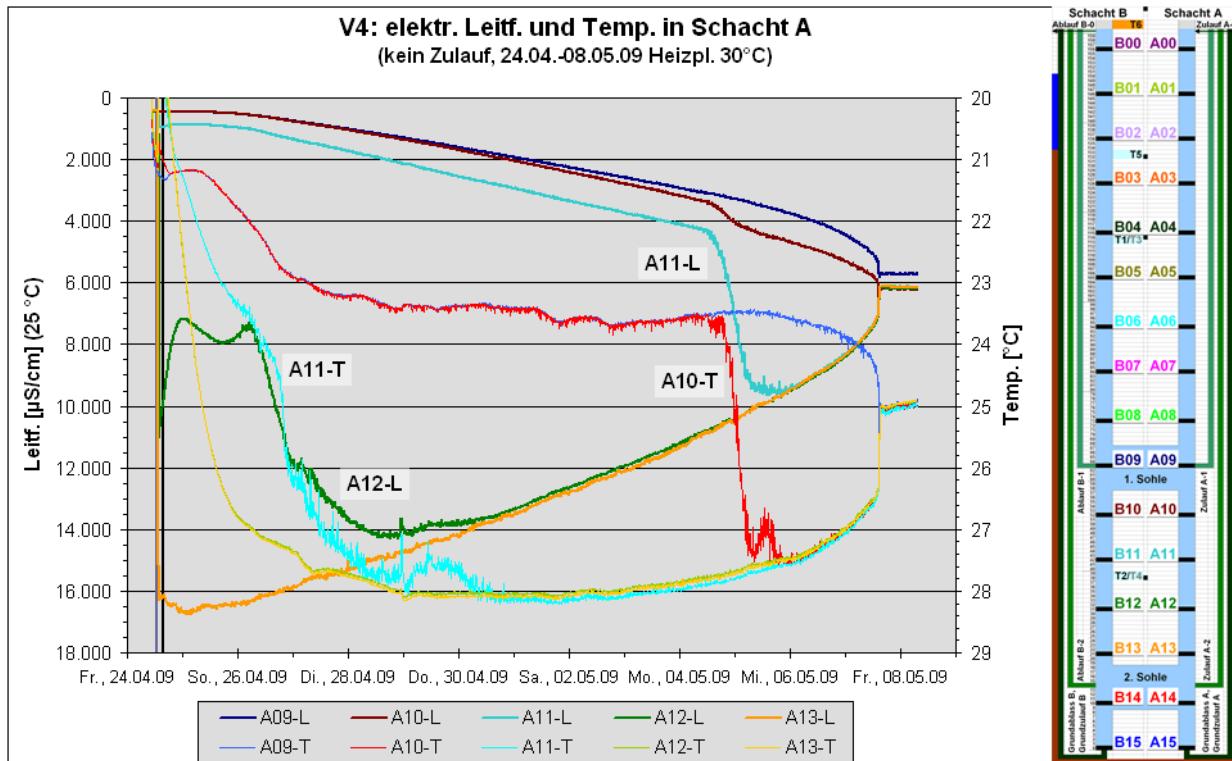


Abbildung 57: V4: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A09-A13)

Die höhere Aufheizenergie (30 °C) führt zur schnelleren Vermischung (nach 13 Tagen) bei grundsätzlich unveränderter Abfolge der Einzelschritte wie des gesamten Verlaufes (Abbildung 57).

#### 4.2.4.5 Schichtungsversuch V5

Nach dem Herstellen einer neuen Schichtung wurde für diesen 5. Versuch die anfängliche Heiztemperatur von 25 °C nach 1 Mon. stufenweise um 1 °C bis auf 30 °C erhöht (ähnlich wie V3). Jedes Intervall dauerte 1 Woche. Zusätzlich wurde ein kontinuierlicher Süßwasserzufluss (ca. 0,6 L/min) in Schacht A in Höhe der 1. Sohle (Zulauf A-1) aktiviert. Der Abfluss erfolgte auf gleichem Niveau im Schacht B (Ablauf B-1).

##### Versuchsbedingungen V5:

- neue Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung [10g NaCl/L]
- kontinuierliche Wasserzuführung (Leitungswasser) im Niveau 1. Sohle Schacht A (Zulauf A-1) mit ca. 0,6 L/min
- niveaugleicher Abfluss über Schacht B (Ablauf B-1)
- anfänglich konstante Heizung von 25 °C
- dann stufenweise Aufheizung von 25 °C auf 30 °C in 1 °C-Schritten
- Intervalldauer Aufheizphase: jeweils 7 Tage
- Versuchsdauer Heizphase 25 °C: 28.05-29.06.09 (32 Tage)
- Versuchsdauer Aufheizphase 25-30 °C: 29.06.-03.08.09 (35 Tage)

Anders als bei V1 wurde Druckschwankungen im Leitungsnetz, die zu etwaigen Änderungen der Zuflussrate führen könnten, dadurch begegnet, dass ein Druckminderer in die Zufuhrleitung eingebaut wurde, der für einen konstanten Druck sorgte. Außerdem wurde ein Durchflussmessgerät eingebaut, das die Zuflussrate automatisch registriert (Kap. 4.2.3, Abbildung 35).

Das Umgebungsmonitoring (Abbildung 58) zeigt wieder die bekannte Zweiteilung: Die drei oberen Temperaturfühler (T1, T3, T5) werden stärker durch die Raumluft (T6) beeinflusst. Die beiden unteren Temperaturfühler im Kasten (T2, T4) reagieren auf die Heizplatten mit etwas höheren Temperaturen, sind aber ebenfalls durch die Außentemperatur beeinflusst. Aber erst ab einer Heiztemperatur von 28 °C wird dieser Einfluss geringer. Die Zuflussrate (Q) liegt recht konstant bei ca. 0,6 L/min.

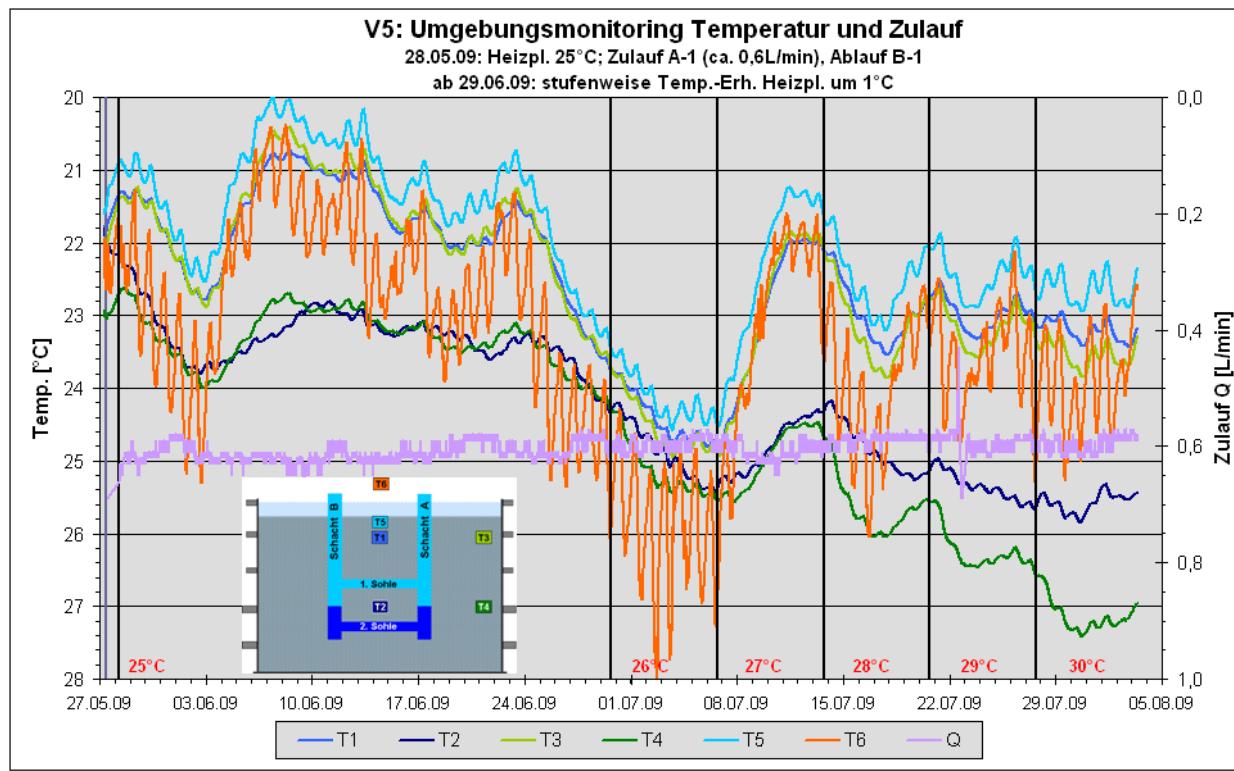


Abbildung 58: V5: Umgebungsmonitoring

Die Leitfähigkeit (Abbildung 59) gleicht im Grundsatz den vorherigen Versuchen: Der Salzwasserbereich (A13-A15) süßt erst langsam, dann immer schneller aus und die darüber liegenden süßeren Partien (A12, A11) werden nacheinander plötzlich „eingefangen“, d. h. aufmineralisiert. Bei den Heiztemperaturen von 25/26 °C scheint sich im Salzwasserbereich eine gewisse Stabilisierung bei rd. 14.000 µS/cm einzustellen. Erst ab etwa 27 °C Heiztemperatur verläuft die Aussüßung schneller. Ab hier wird auch die Temperaturdifferenz zwischen dem Süß- und dem Salzwasserbereich größer (Abbildung 60). Die rhythmischen Temperaturschwankungen hängen mit der unterschiedlich langen Verweildauer des zuströmenden Wassers im Leitungsnetz zusammen und wurden in Kapitel 4.2.4.1 (V1) näher erläutert.

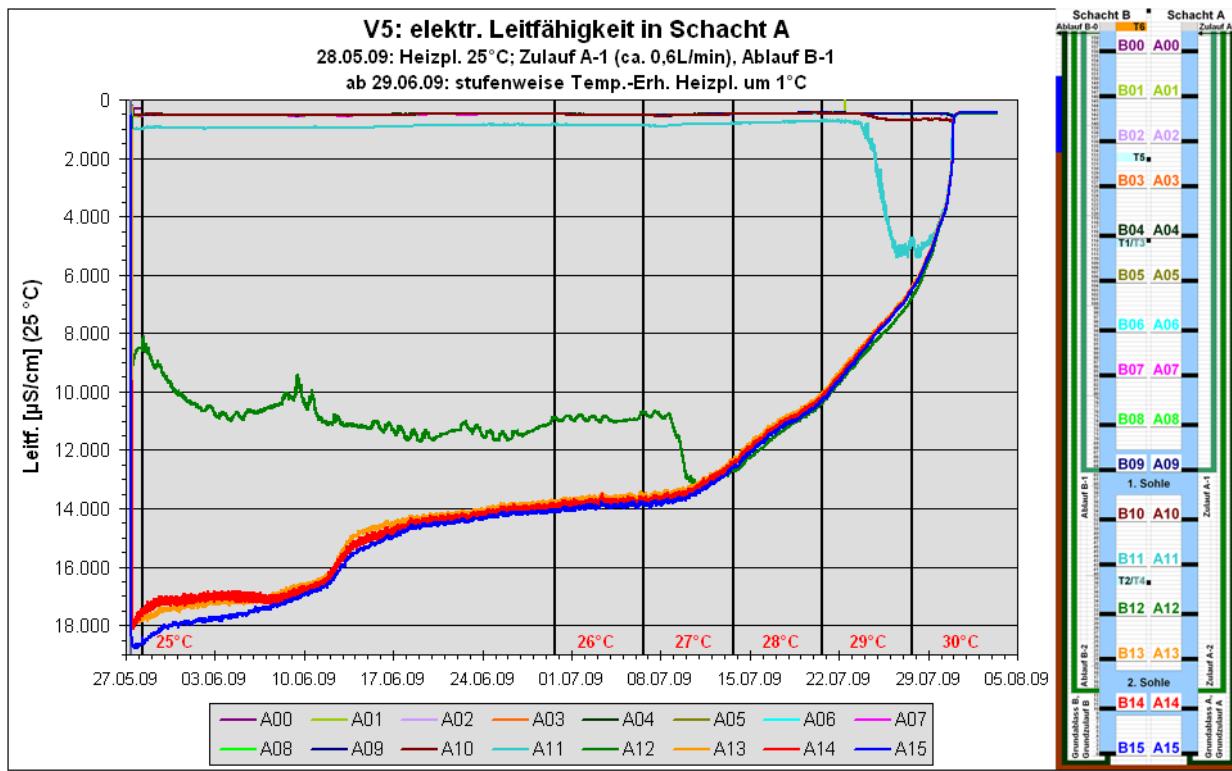


Abbildung 59: V5: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

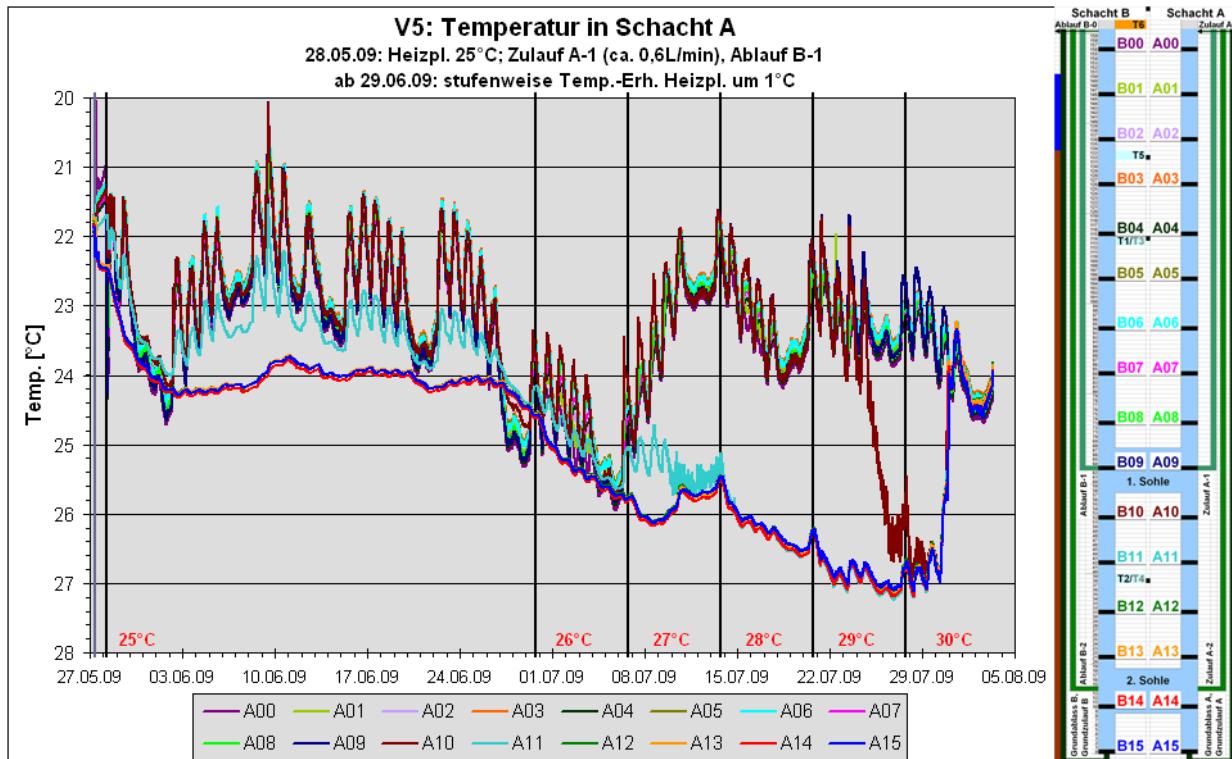


Abbildung 60: V5: Temperatur in Schacht A

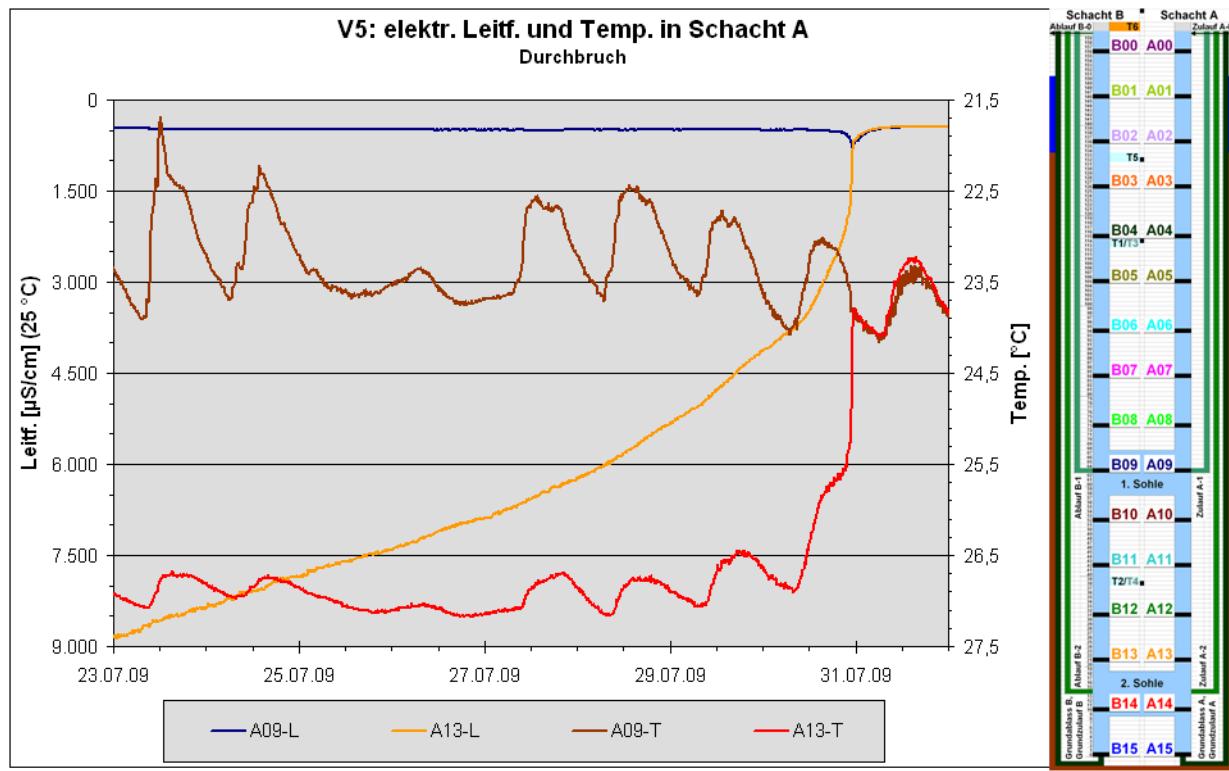


Abbildung 61: V5: elektr. Leitf. und Temp. in Schacht A (A09, A13: Durchbruch)

Während die Salzwassermineralisation jedoch in Form einer Exponentialfunktion aussüßt und sich dem Süßwasser annähert, bleibt die Salzwassertemperatur bis kurz vor dem „Durchbruch“ konstant (Abbildung 62).

Bedingt durch die stetige Süßwasserzufuhr kommt es nicht zu einer Vermischung von Süß- und Salzwasser im eigentlichen Sinn (bisher lag die Mischleitfähigkeit der Versuche bei etwa 6.000 µS/cm) sondern zur kompletten Aussüßung (Leitf. ca. 450 µS/cm). Ähnlich ist es bei der Temperatur: mit dem Ausräumen des Salzwassers stellt sich schließlich die Süßwassertemperatur ein.

Erst ab einer Heiztemperatur von 27 °C erfolgt eine deutlichere Temperaturtrennung zwischen Süß- und Salzwasser. Ab dieser Heiztemperatur verläuft auch die Aussüßung des Salzwassers merklich schneller.

Die kontinuierliche Süßwasserzufuhr sorgt im Endeffekt für eine völlige Ausräumung des Salzwassers, die grundsätzliche Abfolge der Einzelschritte sowie der gesamte Verlauf ändern sich jedoch nicht (Abbildung 62). Die Zu- bzw. Abflussführung im Niveau der 1. Sohle (etwa A09) lässt sich in den Kurvenverläufen weder bei der Leitfähigkeit noch der Temperatur erkennen: in beiden Fällen sind die Bereiche 00-10 sehr homogen.

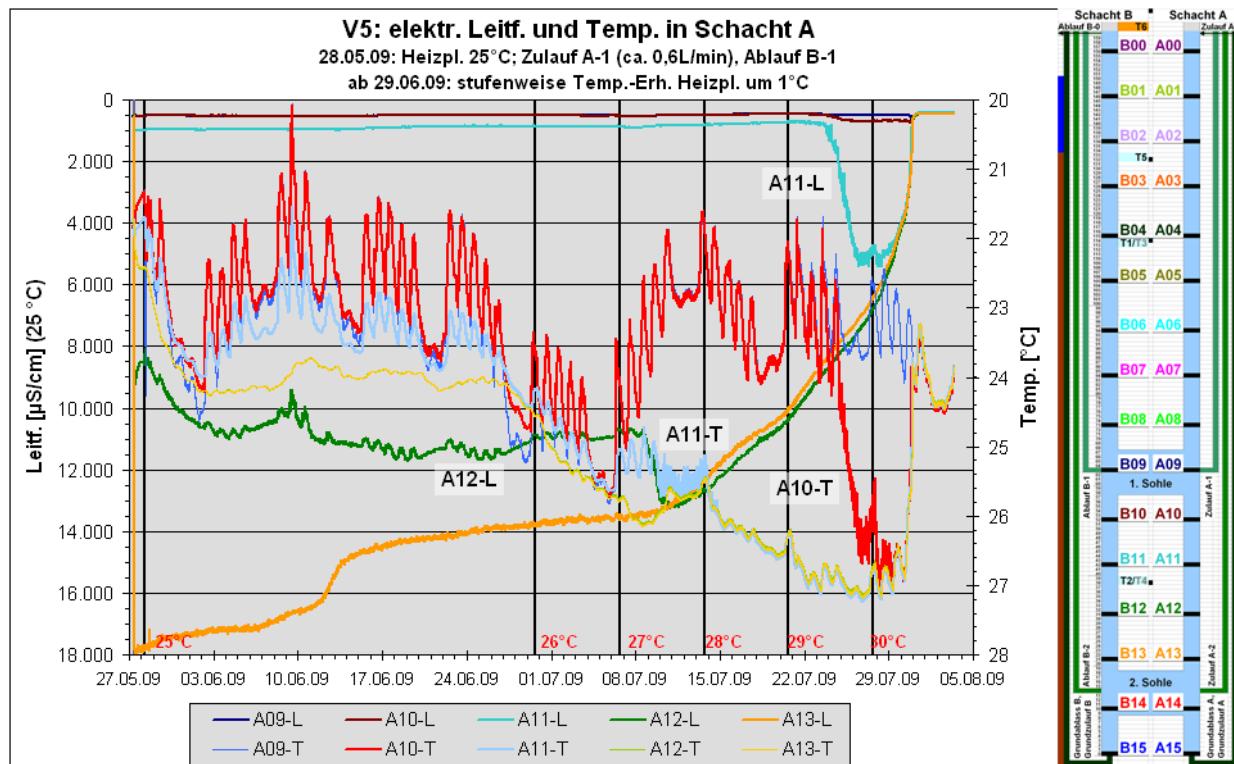


Abbildung 62: V5: elektr. Leitfähigkeit und Temperatur in Schacht A (A09-A13)

Mit 64 Tagen bis zur Vermischung dauert V5 deutlich länger als die vorhergehenden Versuche. Bereits die 1. Phase mit konstant 25 °C Heiztemperatur dauert mit 32 Tagen ohne Vermischung deutlich länger als V2 (21 Tage bis zur Vermischung), der ebenfalls eine konstante Heiztemperatur von 25 °C aufwies - aber keine Strömung. Die Strömung scheint die Schichtung demnach in gewisser Weise zu stabilisieren (vgl. V1).

#### 4.2.4.6 Schichtungsversuch V6

Um den Effekt der Heiztemperatur in V5 zu verifizieren, wurde im 6. Versuch die Heiztemperatur bei 25 °C konstant gehalten.

##### Versuchsbedingungen V6:

- neue Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung [10g NaCl/L]
- kontinuierliche Wasserzuführung (Leitungswasser) über Kopf Schacht A mit ca. 0,5 L/min
- Abfluss über Schacht B (Ablauf B-0)
- konstante Heizung mit 25 °C
- Versuchsdauer: 17.08-18.11.09 (93 Tage)

Das Umgebungsmonitoring (Abbildung 63) zeigt im Oktober/November 2009 die jahreszeitlich bedingte Abkühlung, die sich, da der Raum noch nicht beheizt wurde, auf die Raum- und Kastentemperatur durchpaust. Ab etwa Mitte Oktober macht sich die Kastenheizung dahingehend bemerkbar, dass der untere Bereich (T2, T4) nicht so stark auskühlt.

Da sich der Zufluss etwa Mitte September bis auf fast 0,4 L/min verminderte, wurde er am 23.09.09 neu eingeregelt. Mitte Oktober kam es zu Reparaturarbeiten an der Hauptwasserleitung der DMT und die Wasserzufluss wurde für ca. 1 Std. unterbrochen. Danach kam es im Durchflussmessgerät zu Aussetzern bzw. offensichtlichen Fehlmessungen (wahrscheinlich hatten sich kleine Partikel festgesetzt), so dass zusätzlich der Abfluss per Hand gemessen wurde.

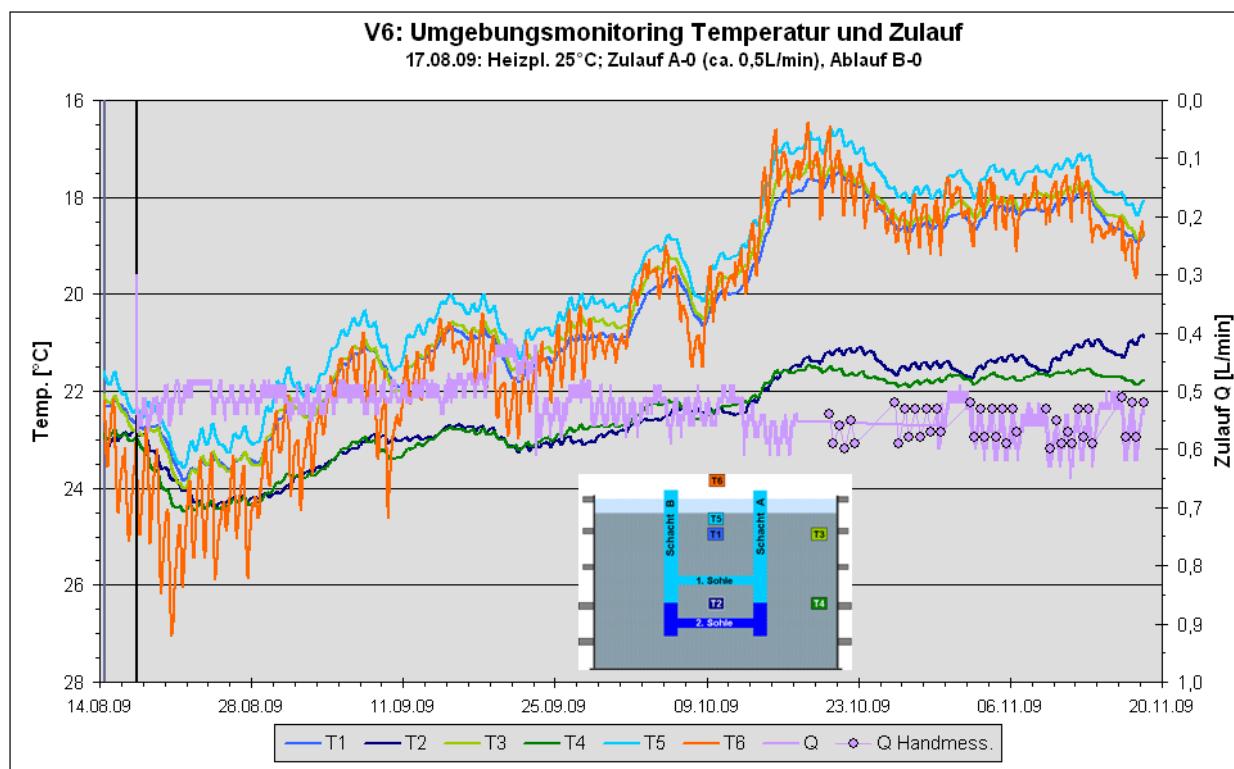


Abbildung 63: V6: Umgebungsmonitoring

Die Entwicklung der Leitfähigkeit (Abbildung 64) verläuft im Prinzip wie bei V5, jedoch mit wesentlich längerem Zeitraum (89 Tage) bis zur Vermischung.

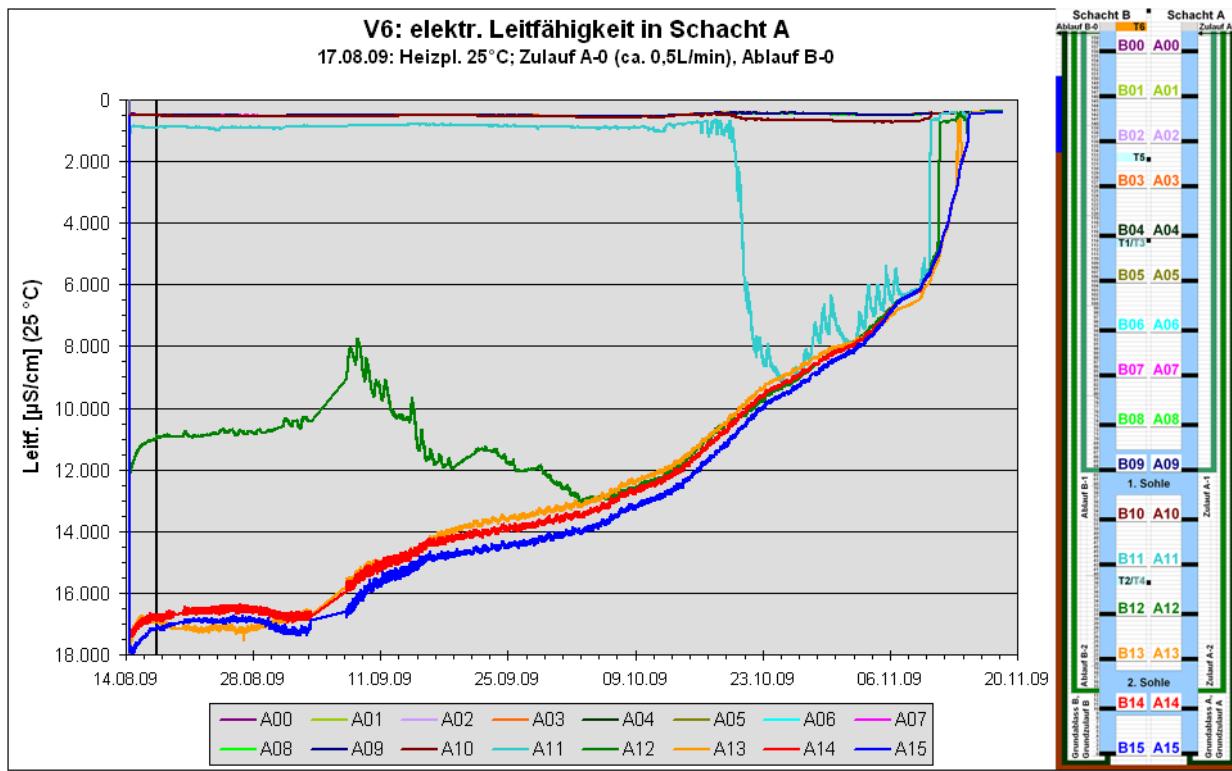


Abbildung 64: V6: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

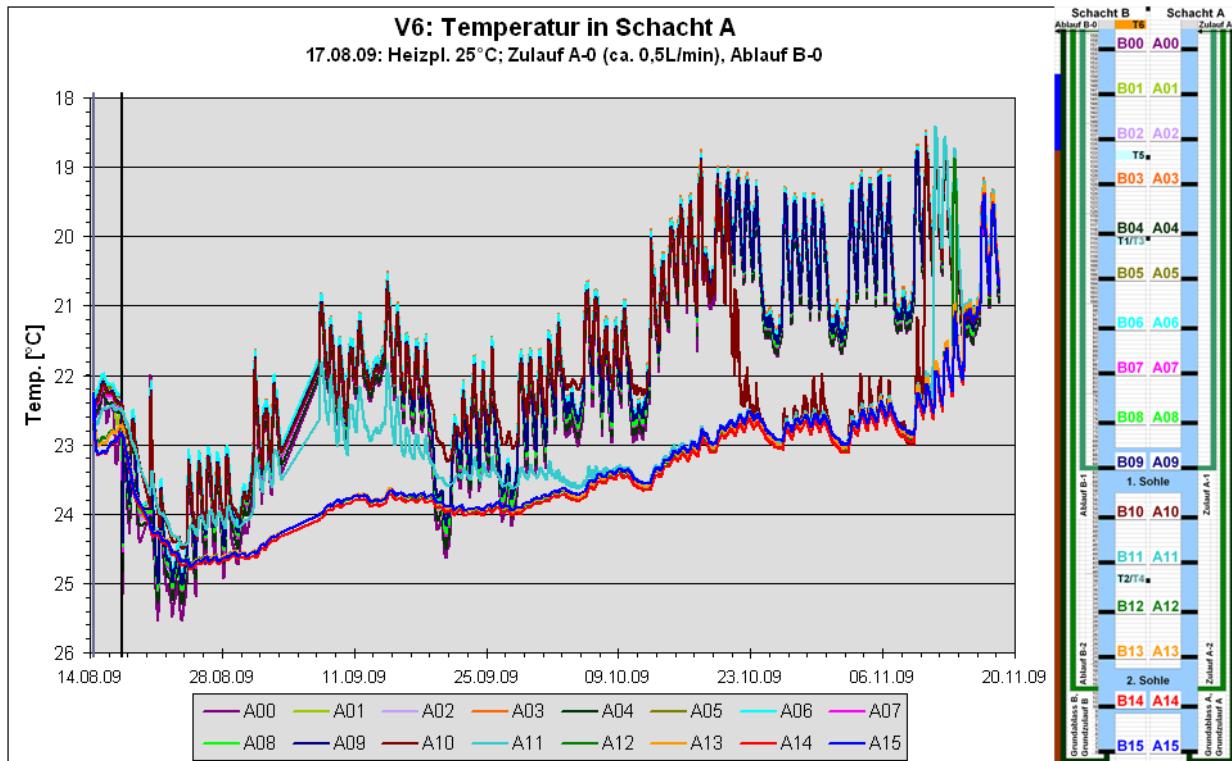


Abbildung 65: V6: Temperatur in Schacht A

Aufgrund der o. g. jahreszeitlichen Abkühlung kommt es auch bei der Wassertemperatur im Rohrsystem über die Zeit zur Abkühlung (Abbildung 65), die stufenweise Erwärmung der über dem Salzwasser liegenden Bereiche A11 und A10 ist aber wie gehabt. Die rhythmischen Temperaturschwankungen wurden bereits bei den anderen Zuströmversuchen V1 und V5 beobachtet. Sie hängen mit der unterschiedlich langen Verweildauer des zuströmenden Wassers im Leitungsnetz zusammen und wurden in Kapitel 4.2.4.1 (V1) näher erläutert.

Kam es bisher allerdings bei der Vermischung zu einem plötzlichen und einheitlichen Vorgang über die gesamte Wassersäule, so ist jetzt dieses Geschehen in mehreren Etappen aufgeteilt (Abbildung 66). Zuerst süßt A11 aus, dann A12, dann noch kurzzeitig A13, welches sich noch mal wieder aufmineralisiert. Wie bereits mehrfach beschrieben, ist auch hier wieder zu beobachten, dass die Temperatur des darüber liegenden Abschnitts diese Vorgänge (Abkühlung) ebenfalls ausführt - bis hin zur Wiederwärmung von A12 parallel zur Wiederaufmineralisation von A13.

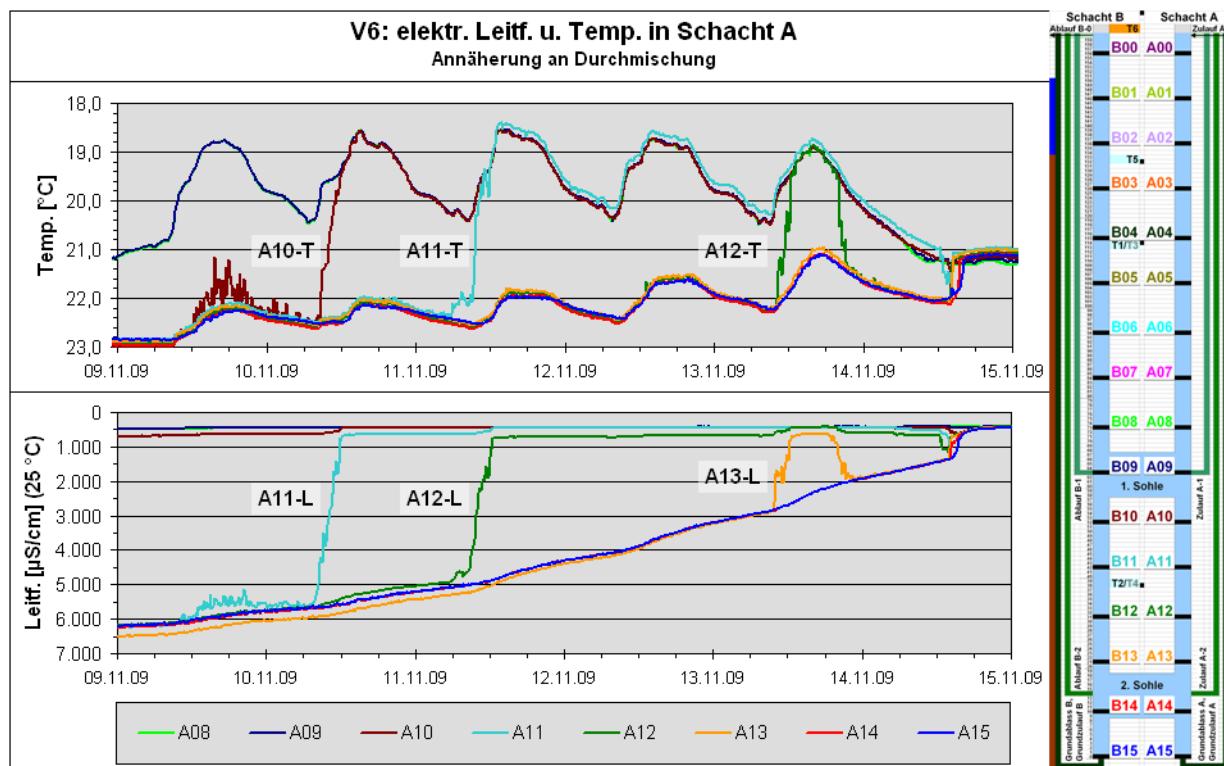


Abbildung 66: V6: elektr. Leitf. u. Temp. in Schacht A (A08-A15: Annäherung)

Mit 89 Tagen bis zur Vermischung dauert der V6 nochmals über 3 Wochen länger als V5 (64 Tage). Bei etwa gleicher Süßwasserzuströmung liegt der Unterschied in der Heizenergie: Beide starteten mit

25 °C, bei V5 wurde die Heizung nach 32 Tagen stufenweise in Wochenschritten bis auf 30 °C erhöht, bei V6 blieb die Heizung konstant bei 25 °C.

#### 4.2.4.7 Schichtungsversuch V7

Bei den Versuchen V1, V5 und V6 wurde kontinuierlich Süßwasser zugeführt und infolge der Durchströmung auch immer etwas Salzwasser mit abgeführt, was aber nach dem ersten Befüllen nicht weiter ergänzt wurde. Mit dem 7. Versuch sollte untersucht werden, wie sich - in Anlehnung an einen salzhaltigen Tiefenwasserzufluss im Grubengebäude - eine ständige Salzzufuhr auf das System auswirkt.

Um das System möglichst wenig zu stören wurde darauf verzichtet, wie beim Süßwasser einen Salzwasserzufluss zu aktivieren (was eine entsprechende Durchströmung und einen Abfluss des Salzwassers bedeutet hätte), sondern das Salz wurde wie beim Anmischen in fester Form (Körnchen) zugegeben.

Die benötigte Menge wurde aus der Abnahme der Leitfähigkeit von A15 in V6 zwischen dem 28.08.09 und dem 02.11.09, also etwa zwischen dem Beginn der langsamen und der schnellen „Aussüßung“ (Abbildung 64, S. 102) abgeschätzt. Im Ergebnis ergab sich eine Salzzufuhr von etwa 1 g NaCl pro Schacht und Tag, um die Salzkonzentration konstant zu halten.

Die Zufuhr erfolgte für jeden Schacht gesondert mittels zweier Dosierautomaten, wie sie in der Aquaristik als Futterautomat für Fische in Gebrauch sind (Abbildung 67). Damit war eine rhythmische Zuführung auch an Wochenenden möglich. Die jeweilige Salzmenge (ca. 1 g) wurde abgewogen und für einige Tage im Voraus in die Schälchen gefüllt. Mittels eingebauter Zeitschaltuhr wurden Takt (1x am Tag) und Uhrzeit (06:30; da an Wochentagen oft zwischen ca. 07:00 und 07:30 Uhr eine Funktionskontrolle am Versuchsstand durchgeführt wurde, konnte so auch die Entleerung der Schälchen überprüft werden) vorgegeben. Die Salzkörnchen fielen über einen Trichter in ein dünnes, in den Schacht gestelltes Rohr (Ø 16 mm), das kurz oberhalb der Messposition 15 endete (Abbildung 68). Damit war gewährleistet, dass das Salz auf dem Weg zur Tiefe nicht auch die anderen Messpositionen beeinträchtigte.



Abbildung 67: Dosierapparat für Salzzufuhr



Abbildung 68: Technik der Salzzufuhr

Ansonsten wurden die Versuchsbedingungen gegenüber V6 nicht verändert, also Heiztemperatur konstant 25 °C und Süßwasserzulauf kontinuierlich ca. 0,5 L/min.

Versuchsbedingungen V7:

- neue Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung [10g NaCl/L]
- kontinuierliche Wasserzuführung (Leitungswasser) über Kopf Schacht A mit ca. 0,5 L/min
- Abfluss über Schacht B (Ablauf B-0)
- konstante Heizung mit 25 °C
- tägl. Salzzufuhr ins Tiefste (ca. 1,0 g NaCl pro Schacht)
- Versuchsdauer: 07.12.09-04.01.10 (28 Tage)

Das Umgebungsmonitoring (Abbildung 69) zeigt deutlich den Effekt der Kastenheizung: mit Heizbeginn (07.12.09) erwärmen sich die unteren Partien deutlich (T2, T4). Der Raum selbst wurde erst ab Mitte Dezember 09, entsprechend dem Rückgang der Tagestemperaturen auf anhaltende Minusgrade, stärker beheizt, was sich bei den oberen Temperaturfühlern (T1, T3, T5, T6) niederschlägt.

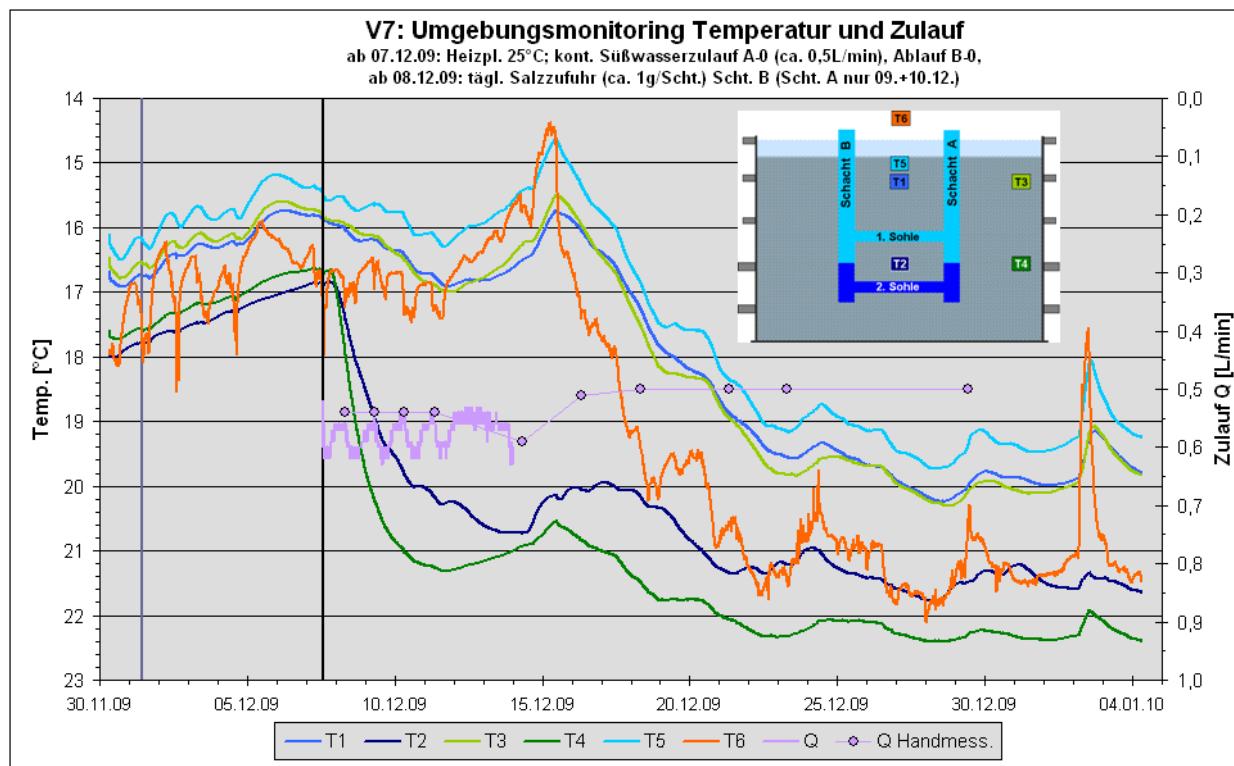


Abbildung 69: V7: Umgebungsmonitoring

Die Salzzufuhr klappte noch nicht optimal. Für Schacht A kam der Dosierautomat gar nicht in Gang, wurde zweimal per Hand ausgelöst und dann abgebaut. Ursache der Funktionsstörung war ein defekter Netzstecker - das Gerät wurde eingeschickt und getauscht. Für Schacht B funktionierte der Automat zwar einwandfrei, d. h. die Schälchen wurden entleert, es kam jedoch im Trichter aufgrund der Querschnittsverengung und einzelner zu großer Salzkörnchen zur Brückenbildung und Verstopfung, so dass zwischen dem 17.12.09 und dem 23.12.09 für 7 Tage kein Salz im Tiefsten ankam. Nachdem die Tülle der Trichter verkürzt und damit gleichzeitig der Durchmesser erweitert wurde und generell kleinere Körnchen gewählt wurden, funktionierte die Salzzufuhr in Schacht B für den Rest des Versuchs tadellos.

Der Effekt ist in Abbildung 70 sichtbar. Mit der Salzzufuhr kommt es bei B15 anfänglich zu einer Aufmineralisierung und dann zu einer Stabilisierung. Dieser Effekt hält ungefähr eine Woche an. Danach setzt die Aussüßung ein - und zwar noch vor der „Verstopfung“ (gelbe Markierung), ab dem 23.12.09 kommt es zur kompletten Vermischung. Wie ersichtlich, wirkt sich die Salzzufuhr nur auf die tiefste Position B15 aus, die darüber liegenden nehmen den „normalen“ Gang. Wie der Vergleich mit Schacht A (Abbildung 71 u. Abbildung 72, praktisch ohne Salzzufuhr) zeigt, kommt es im Tiefsten zu einer Aufmineralisation um ca. 3.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , für die darüber liegenden Messpunkte sind die Kurvenverläufe praktisch identisch. Auch bleibt B15 nach der Vermischung mit ca. 1.250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  deutlich höher mineralisiert als der darüber liegende Süßwasserkörper (ca. 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), während A15 gänzlich aussüßt.

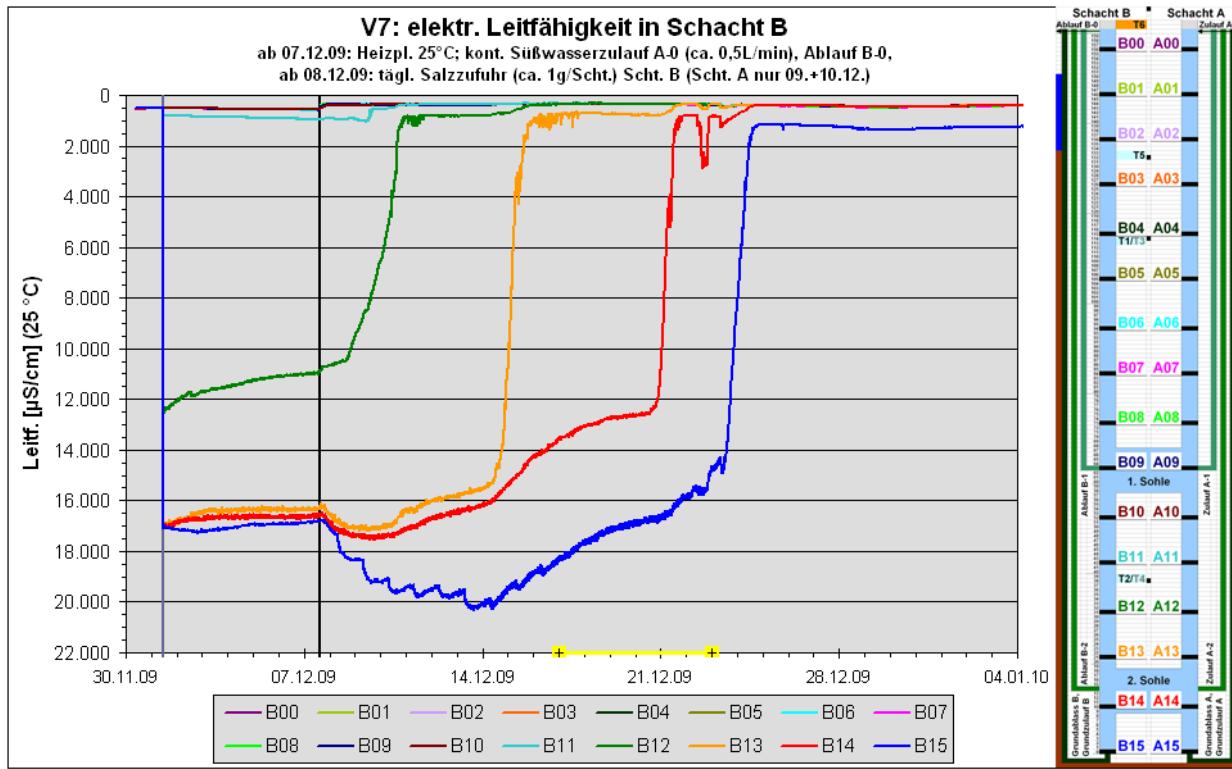


Abbildung 70: V7: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B

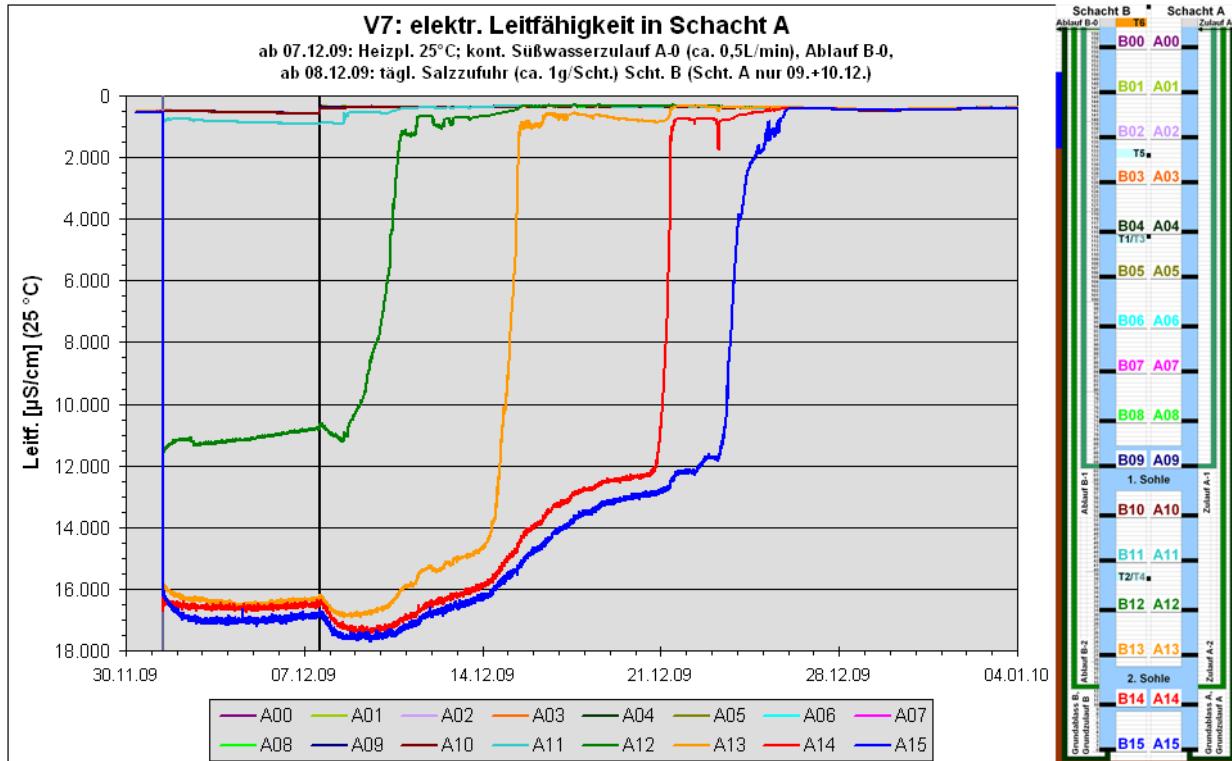


Abbildung 71: V7: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

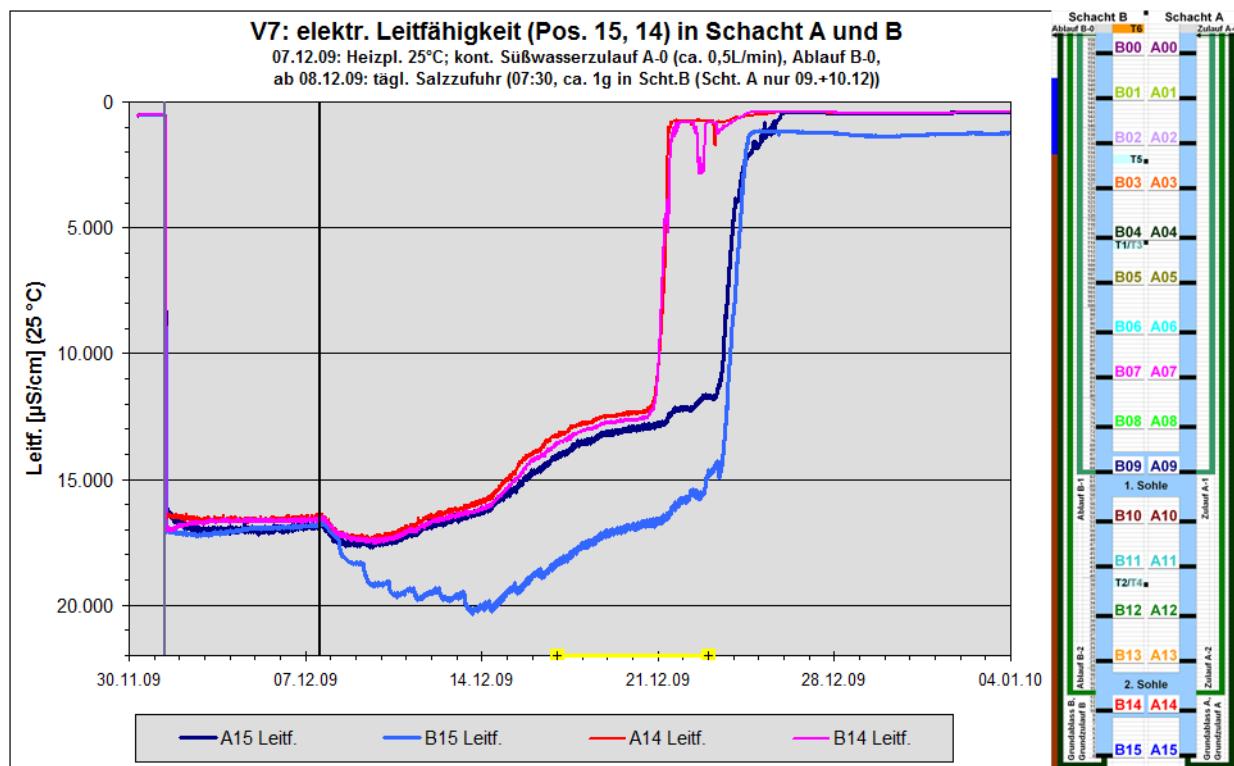


Abbildung 72: V7: elektr. Leitfähigkeit (Pos. 15, 14) in Schacht A u. B

Die Kurvenverläufe sind im Vergleich mit den früheren Versuchen auch aus folgendem Grund bemerkenswert. War es bisher so, dass sich die Salzwasserpositionen 13-15 kontinuierlich aussüßten, die darüber liegenden „Süßwasser“-Positionen 12 und 11 im Laufe der Zeit aber noch auf dieses zwar abnehmende, aber doch höhere Salzwasserkonzentrationsniveau aufmineralisiert wurden, bevor es zuletzt dann zur gemeinsamen Vermischung mit dem Süßwasser kam, so ist nun festzustellen, dass alle Positionen der Reihe nach (11-12-13-14-15) die Süßwasserkonzentration annehmen - ähnlich wie es für die Schlussphase von V6 beschrieben wurde (Abbildung 66, S. 103).

Der Einfluss der Salzzugabe (= dichteres Wasser) in Schacht B ist auch bei der Temperatur von B15 vorhanden (Abbildung 73). Sie liegt erkennbar höher als bei den darüber liegenden Salzwassertemperaturen B14 und B13 und bleibt auch nach der Vermischung ca. 0,5 °C höher temperiert.

Ebenso wie bei der Leitfähigkeit ist festzustellen, dass die Positionen 11 und 10 nicht erst die höhere Salzwassertemperatur annehmen, sondern nacheinander direkt auf das kühlere Süßwassertemperaturniveau gehen (Abbildung 73, Abbildung 74).

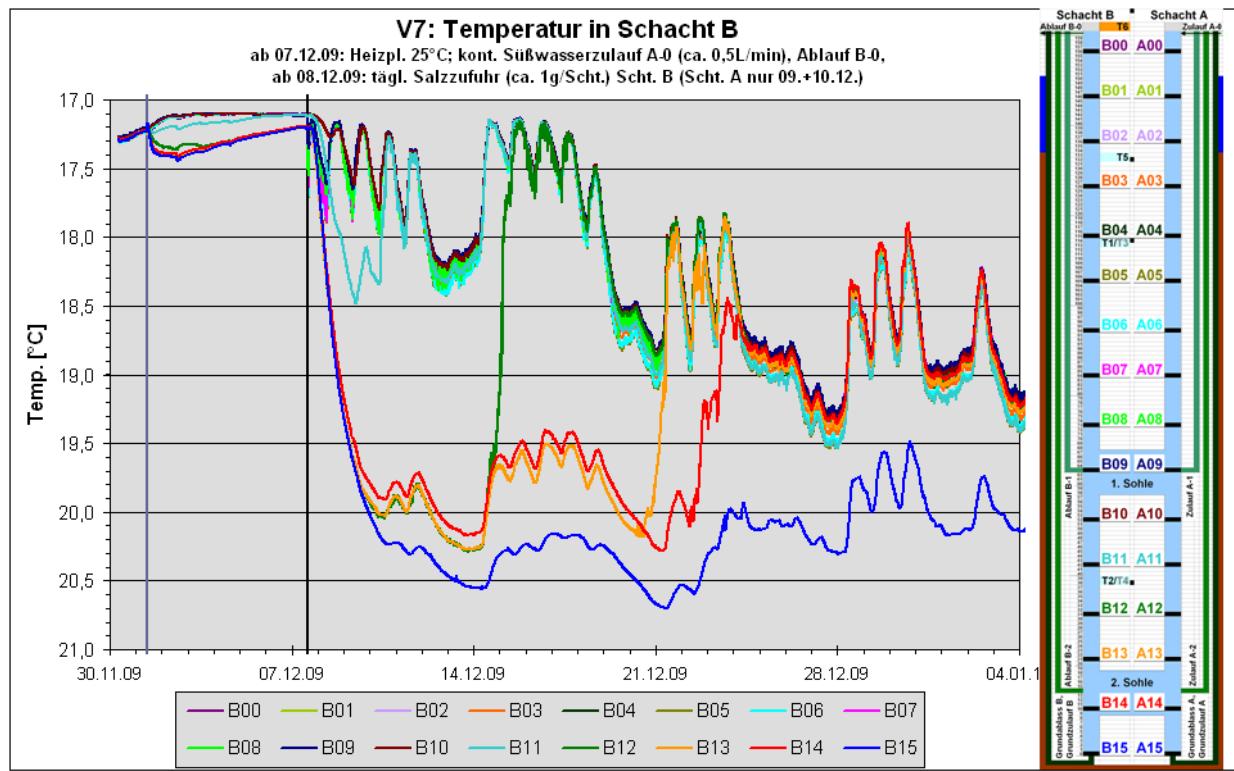


Abbildung 73: V7: Temperatur in Schacht B

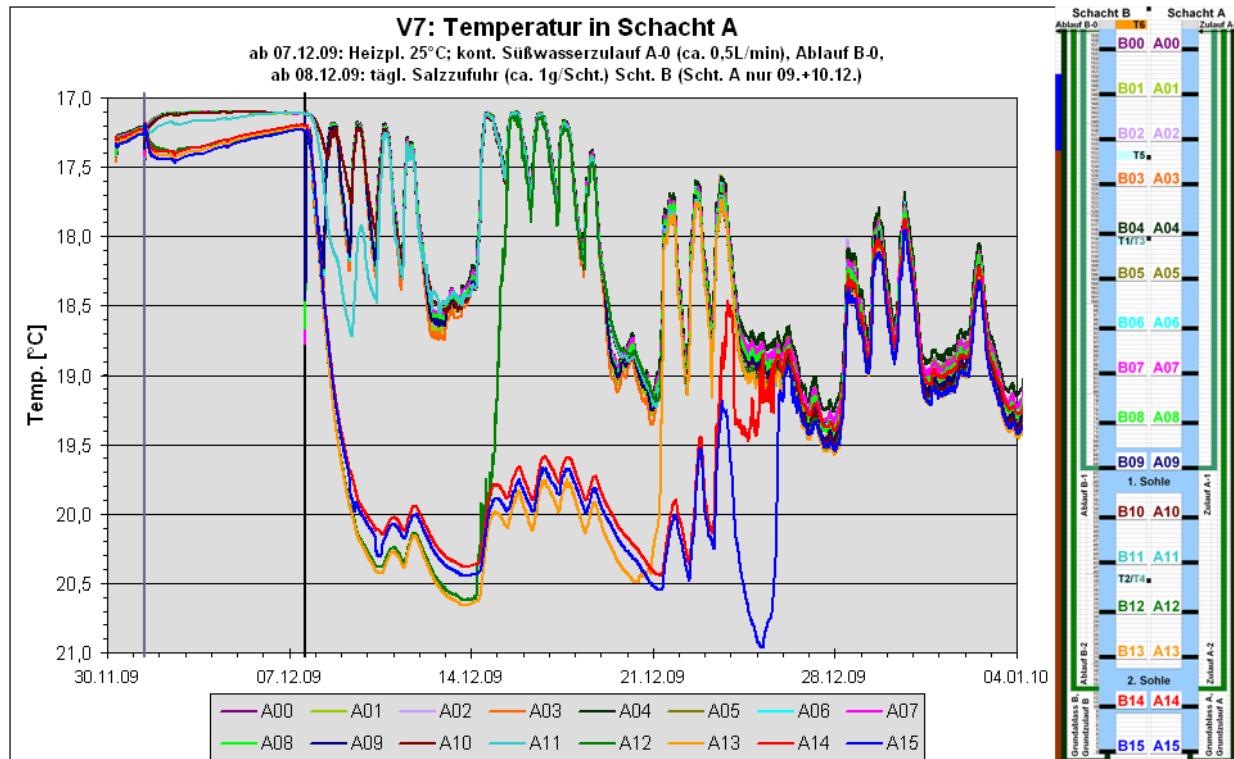


Abbildung 74: V7: Temperatur in Schacht A

Zwar ist der Effekt der Heizung (Start 07.12.09) an den danach deutlich steigenden Temperaturen abzulesen, insgesamt macht sich aber die relativ kühle Raumtemperatur (Abbildung 69) durch nicht so hohe Aufheiztemperaturen bemerkbar. Die rhythmischen Temperaturschwankungen wurden bereits bei den anderen Zuströmversuchen V1, V5 und V6 beobachtet. Sie hängen mit der unterschiedlich langen Verweildauer des zuströmenden Wassers im Leitungsnetz zusammen und wurden in Kapitel 4.2.4.1 (V1) näher erläutert.

Des Weiteren ist die kurze Versuchsdauer bis zur Vermischung bemerkenswert. Während, abgesehen von der Salzzufuhr, unter den gleichen Versuchsbedingungen (Strömung ca. 0,5 L/min, Heizplatten konstant 25 °C) V6 89 Tage bis zur Durchmischung brauchte, waren es bei V7 gerade mal 19 Tage. Mit 13 Tagen war bisher nur V4 schneller (keine Strömung, aber mit konstant 30 °C höhere Heizenergie).

#### 4.2.4.8 Schichtungsversuch V8

Da die Salzzufuhr bei V7 (Kap. 4.2.4.7) noch nicht zufriedenstellend funktionierte, wurde der Versuch unter gleichen Bedingungen wiederholt.

Versuchsbedingungen V8:

- neue Süßwasser-/Salzwasser-Schichtung [10g NaCl/L]
- kontinuierliche Wasserzuführung (Leitungswasser) über Kopf Schacht A mit ca. 0,5 L/min
- Abfluss über Schacht B (Ablauf B-0)
- konstante Heizung mit 25 °C
- tägl. bzw. 2-tägl. Salzzufuhr ins Tiefste (ca. 1,0 g NaCl pro Schacht)
- Versuchsdauer: 11.01.10-29.11.10 (322 Tage)

Der Versuch V8 entwickelte sich zum „Langläufer“. Ab dem 11.01.10 lief er ohne Unterbrechung 322 Tage. Am 29.11.10 wurde der Versuch wegen der anstehenden Räumung der Halle abgebrochen.

Die anfänglich tägliche Salzzufuhr in beide Schächte startete am 12.01.10. Wie Abbildung 75 (Schacht A) zeigt, gelang es diesmal, die Schichtung (A15) nach anfänglicher Aussüßung von ca. 15.000 µS/cm auf etwa 10.000 µS/cm ab Mitte Februar zu stabilisieren. Anfang Mai wurde die Salzzufuhr halbiert (nur noch jeden 2. Tag), ohne dass sich ein nennenswerter Aussüßungseffekt einstellt.

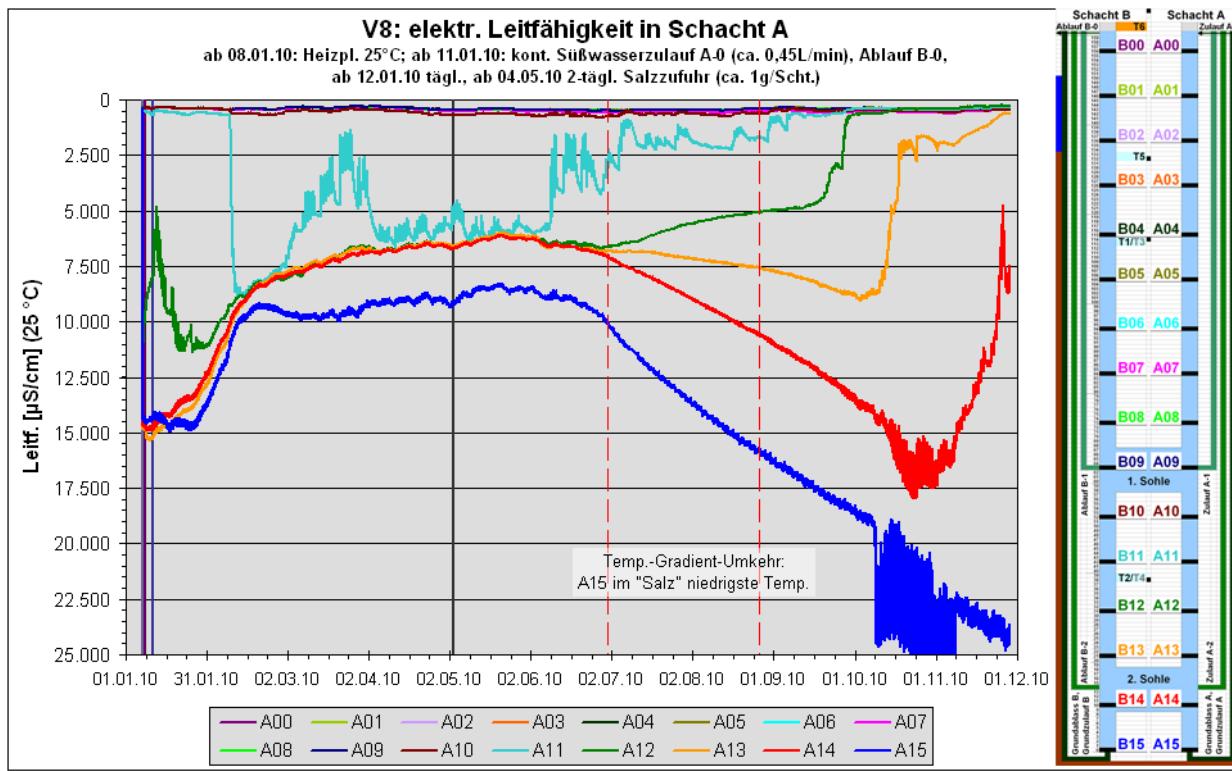


Abbildung 75: V8: elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

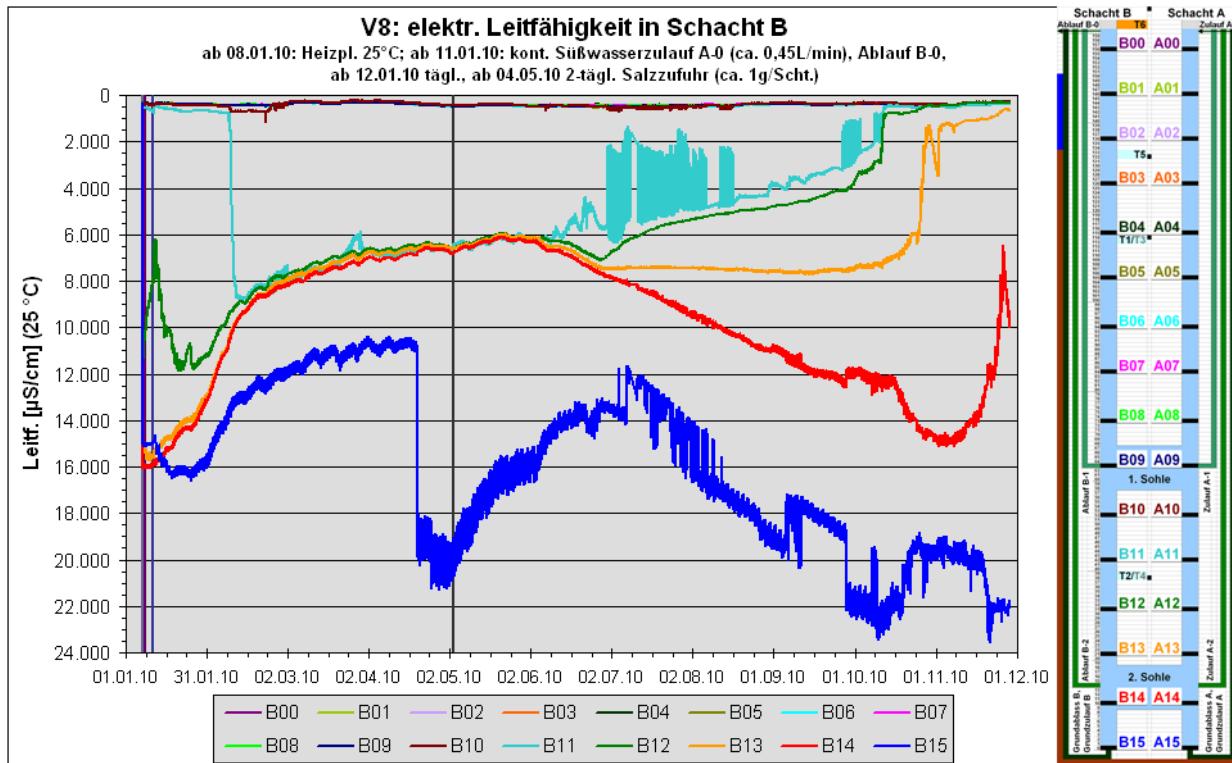


Abbildung 76: V8: elektr. Leitfähigkeit in Schacht B

In Schacht B (Abbildung 76) zeigten die Messungen am 20.10.10 eine sprunghafte Erhöhung der Leitfähigkeit von B15. Diese Erhöhung trat praktisch innerhalb von 10 Minuten ein, etwa zwischen 18:40 Uhr und 18:50 Uhr. Ursache ist wahrscheinlich eine schleichende Verschmutzung der Messplatine, die ab einem gewissen Grad zu Fehlmessungen führte. Wie der Gangverlauf zeigt, löste sich diese Verschmutzung im Laufe der Zeit wieder etwas auf, so dass zeitweise wieder „normale“ Werte angezeigt wurden. Die höher liegenden Messpunkte sind davon nicht betroffen.

Infolge des sehr warmen Sommers 2010, die Lufttemperatur im Technikum erreichte Werte bis ca. 29 °C (Abbildung 77), kam es zu einem interessanten Phänomen. Durch die konstante Beheizung (25 °C) an der Basis des Versuchsstandes war normalerweise gewährleitet, dass sich in Anlehnung an natürliche Gebirgsverhältnisse eine Temperaturzunahme von oben (Pos. 00) nach unten (Pos. 15) einstellte. Zwar erreichte im Juli/August das Wasser im Tiefsten mit Werten bis ca. 26 °C (Pos. 15) sogar Werte oberhalb der Heizplattentemperatur, war damit aber trotzdem am kühlst (Abbildung 78, Abbildung 79). Vor allem Abbildung 80 zeigt, dass es in dieser Zeit zu einer inversen Temperaturverteilung in den Schächten kam. Der Grund ist der o. g. heiße Sommer. Dabei spielt nicht so sehr die Lufttemperatur direkt im Raum die entscheidende Rolle, denn wie Abbildung 81 zeigt, steigt die Raumtemperatur T6 zwar bis auf über 29 °C an, die innerhalb des Versuchstandes im Sand/Wassergemisch gemessenen Temperaturen T1-T5 betragen aber max. 27 °C und liegen damit unterhalb der in den Schächten gemessenen Wassertemperaturen (Abbildung 80). Die hohen Wassertemperaturen resultieren aus dem mit dem Gebäude aufgeheizten Leitungsnetz, was dazu führt, dass bereits rel. warmes Wasser zugeführt wird. Da diese Zuführung im Schacht A von oben geschieht und das Süßwasser vorzugsweise den Weg über die 1. Sohle nimmt um dann oben über Schacht B abzufließen, ist das Wasser zwischen Pos. 00 und Pos. 09 deutlich wärmer als das darunter liegende Salzwasser (Pos. 10-15). Wie die Abstufung zwischen Pos. 10 („warm“) und Pos. 15 („kühl“) zeigt, beeinflusst das warme Süßwasser aber auch das darunter liegende Salzwasser.

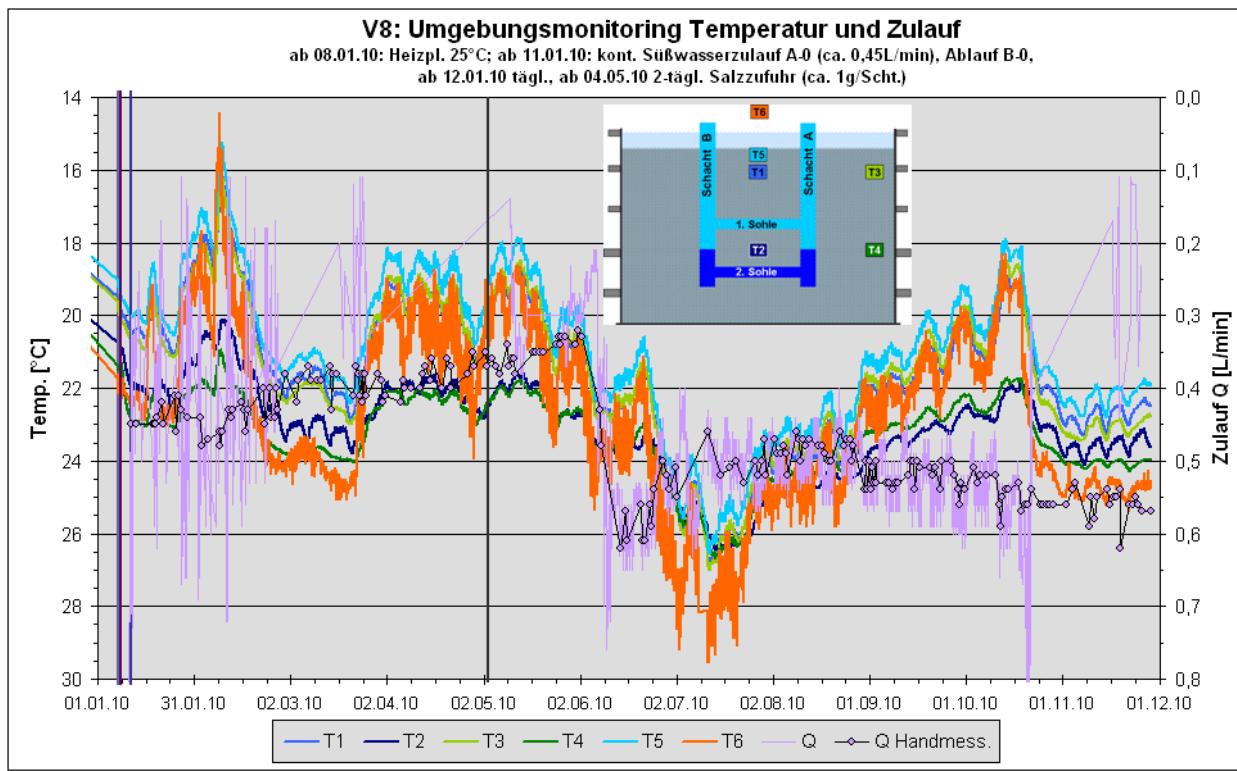


Abbildung 77: V8: Umgebungsmonitoring

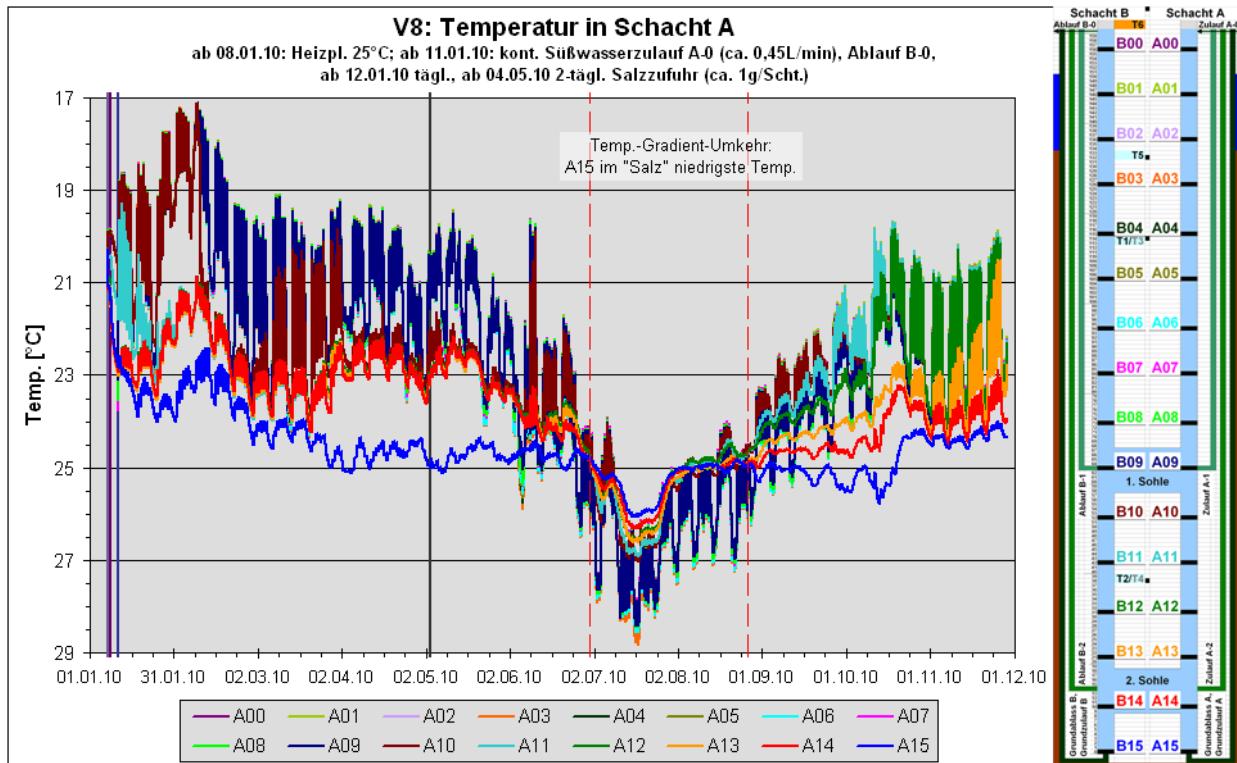


Abbildung 78: V8: Temperatur in Schacht A

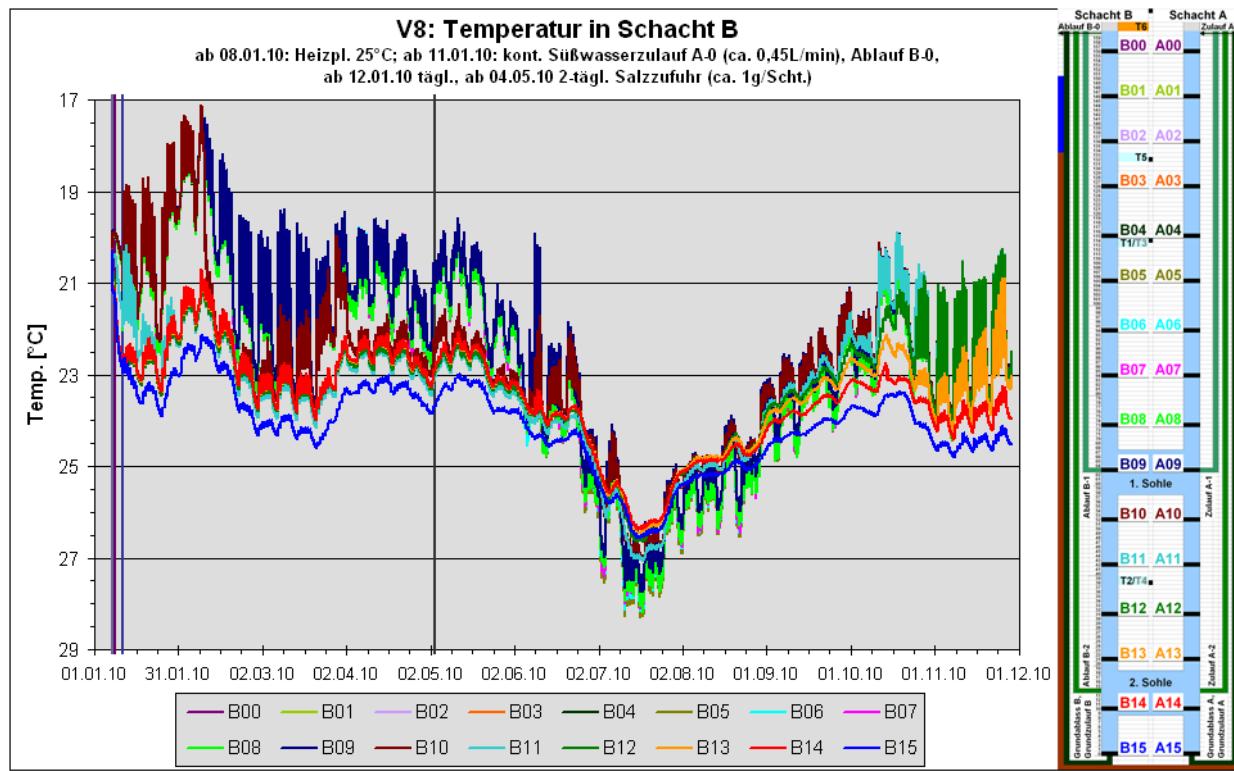


Abbildung 79: V8: Temperatur in Schacht B

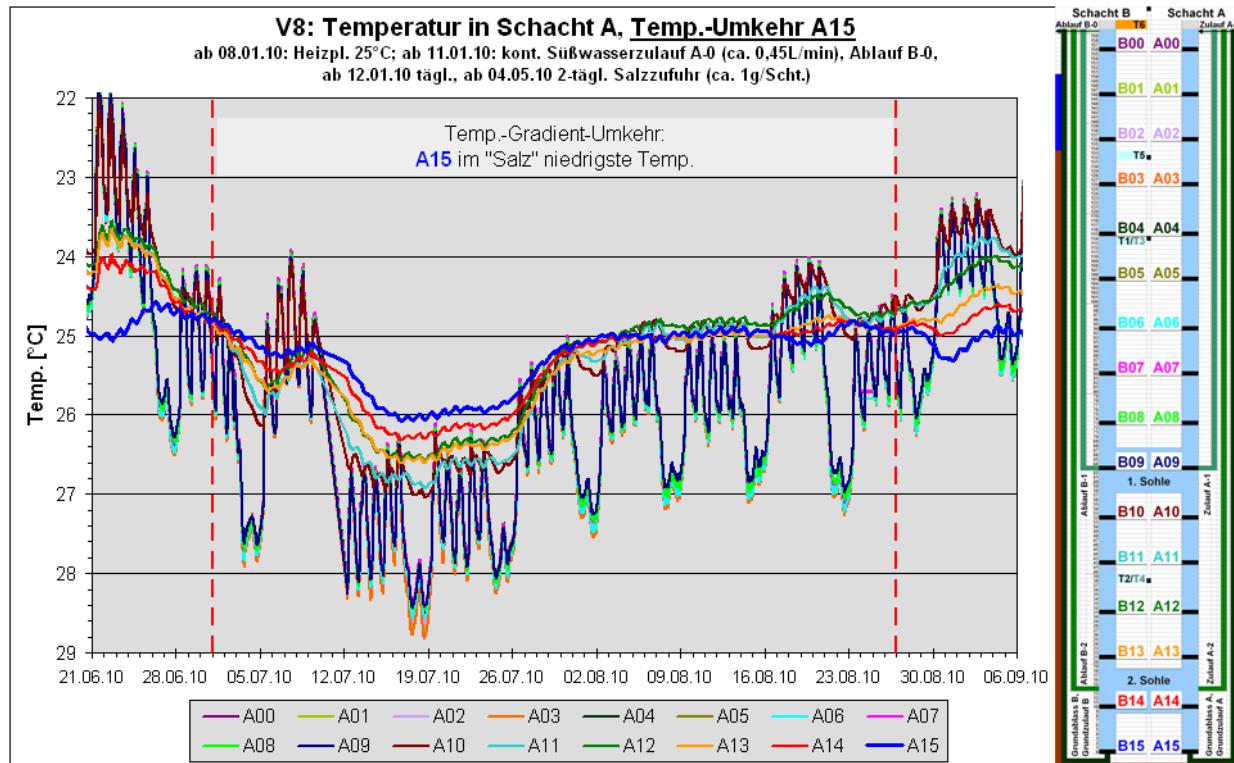


Abbildung 80: V8: Temperatur in Schacht A (Ausschnitt)

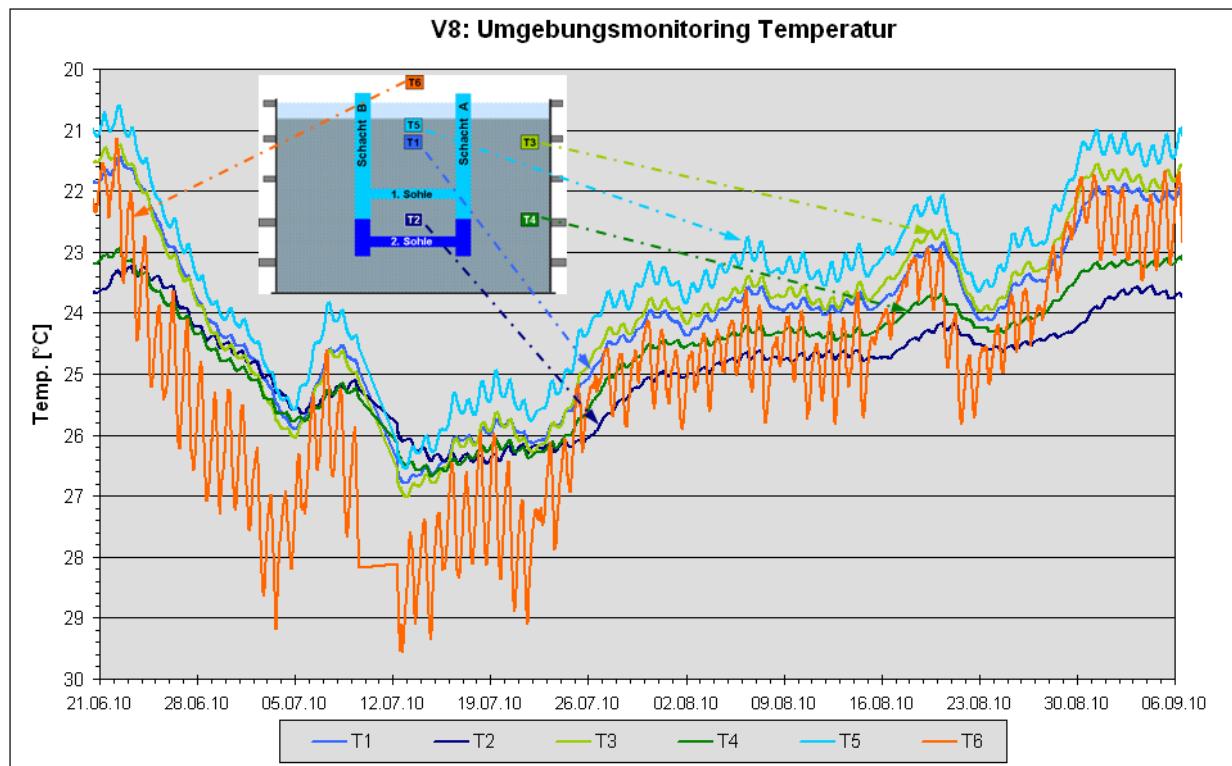


Abbildung 81: V8: Umgebungsmonitoring (Ausschnitt)

Mit Beginn dieser inversen Schichtung kommt es nun im Tiefsten (Pos. 13-15) zu einer Zunahme der Mineralisation (Abbildung 75), bedingt durch die stetige Salzzufuhr und das nicht mehr vorhandene Bestreben des Wassers, nach oben aufzusteigen weil es nun kühler als das darüber liegende Wasser ist. Diese Tendenz hält auch nach Wiederherstellung „normaler“ Temperaturverhältnisse noch eine Weile an, bis dann die bereits mehrfach beschriebene sukzessive Aussüßung im unteren Abschnitt beginnt.

Die rhythmischen Temperaturschwankungen wurden bereits bei den anderen Zuströmversuchen V1 und V5-V7 beobachtet. Sie hängen mit der unterschiedlich langen Verweildauer des zuströmenden Wassers im Leitungsnetz zusammen und wurden in Kapitel 4.2.4.1 (V1) näher erläutert.

Aufgrund der anstehenden Räumung der Halle musste der Versuch vor der vollständigen Vermischung abgebrochen werden.

## 4.3 FEFLOW-Berechnungen

### 4.3.1 Grundlagen und Ausgangsdaten

Die Schichtungsversuche V2 (Kap. 4.2.4.2) und V4 (Kap. 4.2.4.6) wurden mit einem numerischen Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodell untersucht. Ziel der Untersuchungen war eine Verbesserung des Verständnisses der physikalischen Prozesse, wobei besonderes Augenmerk auf die Temperatureinflüsse an den Rändern des Versuchsstandes und die Wärmebewegung im Sand-Wasser-Gemisch gelegt wurde. Die Versuche V2 und V4 wurden gewählt, weil dort nur die Aufheizung als Versuchsrandbedingung eine Rolle spielte (kein Zufluss) und diese über die Zeit konstant gehalten wurde. Als Simulator wurde das Programm Paket FEFLOW der Firma DHI-WASY GmbH verwendet, das auf der Finite-Elemente-Methode basiert. Das numerische Grundwassermodell bildet die porösen, von Wasser durchströmten Partien des Versuchsstandes (also im Wesentlichen das Sand-Wasser-Gemisch) ab. Die offene Wasserbewegung und den damit verbundenen Wärmetransport innerhalb der Rohrleiter kann ein numerisches Grundwassermodell nur ungenau berechnen, da diese Modelle eine laminare Porenströmung gemäß dem Gesetz von Darcy als Grundlage verwenden. Aus diesem Grund wird die Rohrleiter (sie repräsentiert Schächte und Strecken, also die Grubenbaue) in diesem Modell als quasi von Wasser nicht durchströmbarer (kleine Durchlässigkeitsbeiwerte) und Wärme nicht leitender Körper berücksichtigt.

Wie sich im Laufe der CFD-Modellierungen der Versuche V2 und V4 (Kap. 4.4) zeigte, wären zur besseren Einschätzung die Wärmerandbedingungen an der Außenfläche der Rohrleiter Temperaturdaten für das gesamte Sand-Wasser-Gemisch hilfreich. Die FEFLOW-Simulationen sollten somit außer einer Verbesserung des Verständnisses der physikalischen Prozesse die Temperaturverteilung im Sand-Wasser-Gemisch als Modell-eingangsgröße für die CFD-Modellierungen liefern. Abschließend ging es um die Klärung der Frage, ob es zusätzlich zur Wärmekonduktion, also der Wärmeleitung durch Matrix und Fluid, auch noch zu einer nach oben gerichteten Wasserbewegung (Wärmetransport über die Strömung eines Fluids (Konvektion): Aufstieg wärmerer Wässer in Folge geringerer Dichte) kommt, die die Wärmeausbreitung ausgehend von der Heizplatte im Vergleich zur reinen Wärmekonduktion beschleunigt.

Die Ausmaße des im numerischen Modell abgebildeten durchströmten Körpers, d. h. das Sand-Wasser-Gemisch, entsprechen dem Inneren des

Versuchsstandes (LxBxH: 280x180x180 cm). Das numerische Modell besteht aus 36 Elementenschichten mit einem Knotenabstand (Mächtigkeit der Modellschichten) von 5 cm. Die Versuchsrandbedingungen wurden entsprechend den Daten der Technikumsversuche V2 und V4 festgelegt und in das Modell übertragen. Die Diskretisierung, die Materialeigenschaften und die Randbedingungen des Modells sind für beide Versuche im Wesentlichen identisch. Der Unterschied liegt, wie in den Versuchen selbst, in der unterschiedlichen Aufheiztemperatur der Heizplatten von konstant 25 °C (V2) bzw. 30 °C (V4), die jeweils als Randbedingung 1. Art (feste Temperatur) berücksichtigt wurde.

Die Außenwände des Behälters wurden mit einer Randbedingung 3. Art (feste Temperatur mit Wärmeleitkoeffizient) belegt. Es wurde eine Mächtigkeit von 2,5 cm und eine Wärmeleitfähigkeit von 0,35 J/m/s/K zu Grunde gelegt, so dass sich ein Wärmeleitkoeffizient von 14 W/m<sup>2</sup>/K ergibt.

Die Außentemperatur, zu verstehen als Temperatur im Technikum, wurde für den Versuch V2 auf 16,5 °C festgesetzt<sup>4</sup>. Diese Temperatur wurde auch als Starttemperatur für den gesamten abgebildeten Körper angesetzt. Die volumetrische Wärmekapazität der Außenwände des Behälters wurde mit einem Wert von 1.995.000 J/m<sup>3</sup>/K angenommen. An der Oberfläche, d. h. an der obersten Knotenschicht (freie Oberfläche der dünnen Wasserschicht über dem Sand-Wasser-Gemisch) wurde eine Randbedingung 3. Art mit einer Temperatur von 16,5 °C und einem Wärmeleitkoeffizienten von 5 W/m<sup>2</sup>/K angesetzt.

Bei dem vorliegenden numerischen Modell handelt es sich um ein Grundwasserströmungsmodell, mit dem sowohl der Wärmetransport über die Strömung eines Fluids (Konvektion) als auch über die Wärmeleitung durch eine Matrix und das Fluid (Konduktion) simuliert werden kann. Der Matrix als auch dem Fluid wurden die folgenden Parameter zugewiesen, die zusätzlich in Tabelle 2 zusammengestellt sind.

Die Matrix (Sand/Kies) wurde mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2 J/m/s/K und das Fluid (Wasser) mit einer von 0,6 J/m/s/K belegt. Darüber hinaus wurde der Matrix eine volumetrische Wärmekapazität von 2.650.000 J/m<sup>3</sup>/K und dem Fluid eine von 4.177.567 J/m<sup>3</sup>/K zugewiesen.

---

<sup>4</sup> Wie bereits mehrfach erwähnt, wurde erst mit dem Versuch V3 ein Temperatur-Umgebungsmonitoring eingerichtet. Die relative kühle Labortemperatur entstammt der Überlegung, dass das Technikum im Wesentlichen unbeheizt war und der Versuch im Januar/Februar durchgeführt wurde.

Die effektive Porosität der Matrix liegt bei 0,15 und der Durchlässigkeitsbeiwert bei  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Die Rohrleiter kann technisch bedingt im Modell nur rechteckig abgebildet werden. Die Ummantelungslängen von „Schacht“ und „Strecke“ als Rechtecke im Modell betragen jeweils 40 cm und sind kleiner (PVC-U-Vollrohr „Schacht“: Kreisumfang ca. 50 cm) bzw. größer (PVC-U-Vollrohr „Strecke“: Kreisumfang ca. 34,5 cm) als die realen Ummantelungslängen im Versuchsstand. Diese Differenzen wurden im Modell durch eine entsprechende Vergrößerung (Schacht: 43,8 W/m<sup>2</sup>/K) bzw. Verkleinerung (Strecke: 40,3 W/m<sup>2</sup>/K) des Wärmeleitkoeffizienten ausgeglichen. Darüber hinaus können die Schächte und Strecken des Versuchsstands im Modell nicht als wassergefüllter Hohlraum abgebildet werden. Um ein Strömen vom Fluid aus der Rohrleiter in die umgebende Matrix zu verhindern, wurde der Rohrleiter ein sehr kleiner Durchlässigkeitsbeiwert ( $1 \cdot 10^{-12}$  m/s) zugewiesen.

Im Versuchsstand wurde, wie in Kapitel 4.2.3 (Aufbau Technikumsversuch) erläutert, in den Schächten eine Messsensorik installiert, die in vorgegebenen Zeitintervallen die Temperatur in unterschiedlichen Wassertiefen registriert. Diese Temperaturen über die Zeit wurden den Modellschächten an entsprechender Stelle vorgegeben. Alle weiteren Parameter können der Tabelle 2 entnommen werden. Im Versuchsstand steht die Rohrleiter auf PE-Stützen auf den Heizplatten (sie sind in Abbildung 26, S. 66, unterhalb der Rohrleiter zu erkennen). Diese Stützen wurden im Modell im Laufe der Modellanpassungen abgebildet.

Tabelle 2: Eingangsparameter

Fluid (Wasser)		Sand-Wasser-Gem.	Rohrleiter
volumetrische Wärmekapazität	J/m <sup>3</sup> /K	4.177.567	4.177.567
spezifische Wärmekapazität	J/kg/K	4.182	4.182
Wärmeleitfähigkeit	J/m/s/K	0,6	0,6
Dichte (bei 16°C)	kg/m <sup>3</sup>	998,94	998,94
Matrix (Sand)			
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	2*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-12</sup>
effektive Porosität	-	0,15	0,15
volumetrische Wärmekapazität	J/m <sup>3</sup> /K	2.650.000	2.650.000
spezifische Wärmekapazität	J/kg/K	1.000	1.000
Wärmeleitfähigkeit	J/m/s/K	2	2
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	2.650	2.650
Longitudinale Dispersivität	m	0,01	0,01
Transversale Dispersivität	m	0,001	0,001
spezifischer Speicherkoeffizient	1/m	3,3 * 10 <sup>-6</sup>	3,3 * 10 <sup>-6</sup>
speicherwirksamer Hohlraumanteil	-	0,2	0,2

#### 4.3.2 Simulationen zu Schichtungsversuch V2

Zunächst wurde der Versuch V2 in einer ersten **Variante0** über 20 Tage simuliert. Der Technikumsversuch lief über einen Zeitraum von 21 Tagen (Durchmischung). Die Abbildung 82 zeigt die Temperaturverteilung nach 20 Tagen Simulationszeit. Es handelt sich um einen Vertikalschnitt mittig durch das Modell und somit mittig durch die Rohrleiter. Im Modell ist die Temperatur unten und in der Mitte am höchsten. Die Rohrleiter wird kaum aufgeheizt. Sie gibt sehr viel Wärme an das Sand-Wasser-Gemisch ab und von dort wiederum geht über die Außenwände ein großer Teil der Wärme verloren. Der Wärmetransport in der Rohrleiter kann, wie zuvor schon erläutert, selber nicht simuliert werden. Aber die Temperaturzuflüsse werden wegen der gemessenen Temperaturen in der Rohrleiter berücksichtigt.

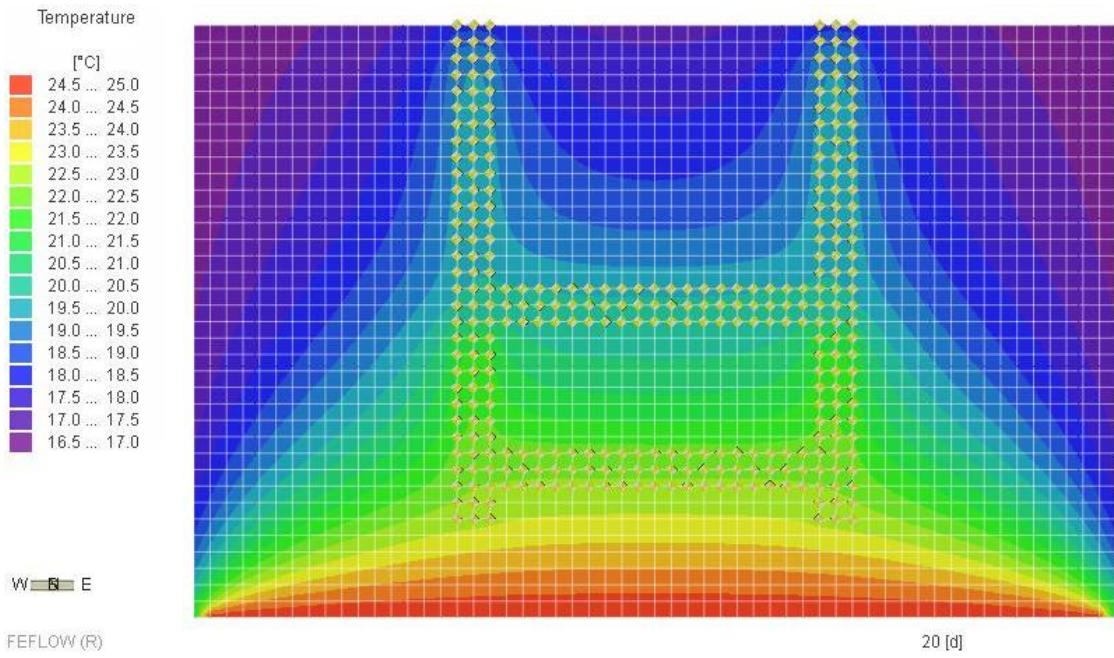


Abbildung 82: V2 – Variante0: Temperaturverteilung nach 20 Tagen

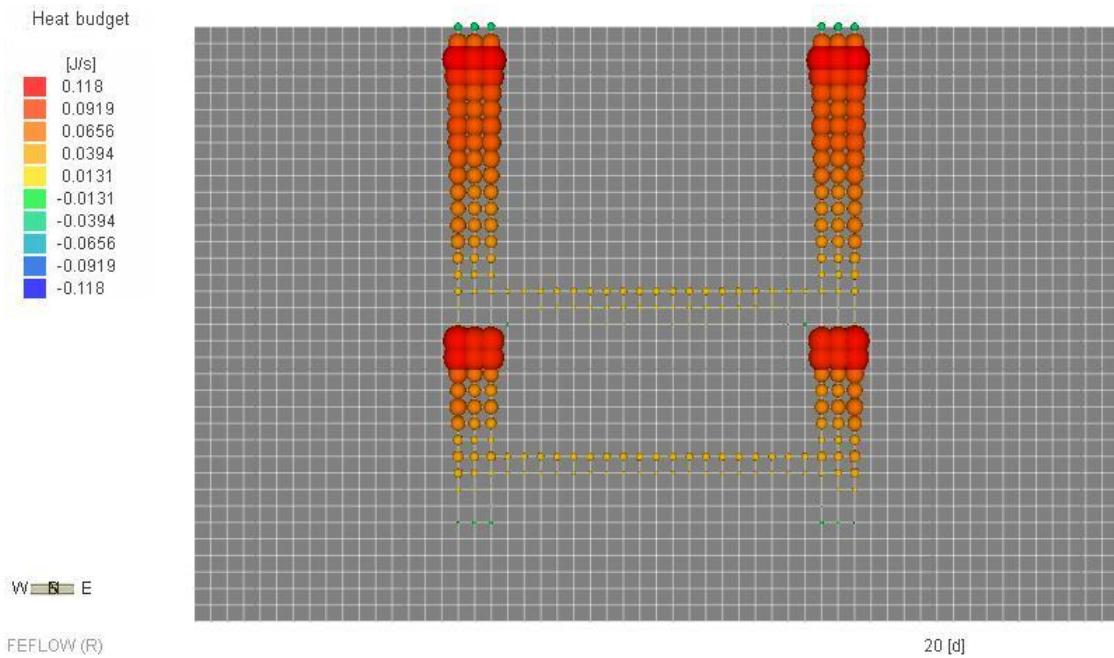


Abbildung 83: V2 – Variante0: Wärmestrom (Heat budget) nach 20 Tagen

Die Abbildung 83 zeigt den Wärmestrom (Heat budget) an der Rohrleiter nach 20 Tagen Simulationszeit. Positiver (gelb-roter) Wärmestrom bedeutet, dass die Rohrleiter Wärme an das Sand-Wasser-Gemisch abgibt und negativer (grün-blauer) Wärmestrom bedeutet, dass die Rohrleiter Wärme aufnimmt. Es ist zu erkennen, dass die Rohrleiter fast überall Wärme an das Sand-Wasser-Gemisch abgibt. Ein Aufwärmen der Rohrleiter ist ledig-

lich am unteren und oberen Ende zu erkennen. Die Bilanz ist somit nicht ausgeglichen und die Simulation erscheint nicht sehr plausibel. Wir gehen davon aus, dass wesentliche Teilprozesse noch nicht berücksichtigt sind.

Auf Grund des nicht zufriedenstellenden Ergebnisses der ersten Simulationsrechnung wurden drei weitere Varianten gerechnet, in denen verschiedene Parameter angepasst wurden. Im Folgenden wird nur auf die letzte Simulation, die **Variante3** eingegangen.

In Variante0 wurden die PE-Stützen nicht mit abgebildet. Diese stellen jedoch die direkte Verbindung zwischen den Heizplatten und der Rohrleitung dar und unterscheiden sich, entsprechend der PE-Außenwand, in den Materialeigenschaften von Sand-Wasser-Gemisch. Sie wurden in Variante3 durch einen kleinen Durchlässigkeitsbeiwert und eine geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität berücksichtigt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Eingangsparameter PE-Stützen

Fluid (Wasser)		PE-Stützen
volumetrische Wärmekapazität	J/m <sup>3</sup> /K	4.177.567
spezifische Wärmekapazität	J/kg/K	4.182
Wärmeleitfähigkeit	J/m/s/K	0,6
Dichte (bei 16°C)	kg/m <sup>3</sup>	998,94
<hr/>		
Matrix (Sand)		
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	1*10 <sup>-10</sup>
effektive Porosität	-	0,15
volumetrische Wärmekapazität	J/m <sup>3</sup> /K	1.995.000
spezifische Wärmekapazität	J/kg/K	2.100
Wärmeleitfähigkeit	J/m/s/K	0,35
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	950
<hr/>		
Longitudinale Dispersivität	m	0,01
Transversale Dispersivität	m	0,001
spezifischer Speicherkoefizient	1/m	3,3 * 10 <sup>-6</sup>
speicherwirksamer Hohlraumanteil	-	0,01

Um die Wärmebewegung innerhalb der Rohrleiter auf ein Mindestmaß zu reduzieren und die Wärmewirkung nach außen zu untersuchen, wurden die Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit der „Matrix“ in der Rohrleitung verkleinert. Ein weiterer Parameter, der verkleinert wurde, ist der speicherwirksame Hohlraumanteil der Rohrleiter. Darüber hinaus wurde die

Wärmeleitfähigkeit der Matrix des Sand-Wasser-Gemisches halbiert. Der Tabelle 4 können die Parameter entnommen werden.

Tabelle 4: Veränderung einiger Eingangsparameter von Variante0 zu Variante3

Fluid (Wasser)		Sand-Wasser-Gem.		Rohrleitung	
		Variante0	Variante3	Variante0	Variante3
volumetrische Wärmekapazität	J/m <sup>3</sup> /K	4.177.567	4.177.567	4.177.567	4.177.567
spezifische Wärmekapazität	J/kg/K	4.182	4.182	4.182	4.182
Wärmeleitfähigkeit	J/m/s/K	0,6	0,6	0,6	0,6
Dichte (bei 16°C)	kg/m <sup>3</sup>	998,94	998,94	998,94	998,94
<b>Matrix (Sand)</b>					
Durchlässigkeitsbeiwert	m/s	2*10 <sup>-4</sup>	2*10 <sup>-4</sup>	1*10 <sup>-12</sup>	1*10 <sup>-12</sup>
effektive Porosität	-	0,15	0,15	0,15	0,15
volumetrische Wärmekapazität	J/m <sup>3</sup> /K	2.650.000	2.650.000	2.650.000	0,1
spezifische Wärmekapazität	J/kg/K	1.000	1.000	1.000	1.000
Wärmeleitfähigkeit	J/m/s/K	2	1	2	0,001
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	2.650	2.650	2.650	2.650
Longitudinale Dispersivität	m	0,01	0,01	0,01	0,01
Transversale Dispersivität	m	0,001	0,001	0,001	0,001
spezifischer Speicherkoefizient	1/m	3,3 * 10 <sup>-6</sup>			
speicherwirksamer Hohlraumanteil	-	0,2	0,2	0,2	0,01

Die Abbildung 84 zeigt die Temperaturverteilung von Variante3 nach 20 Tagen. In Analogie zur Variante0 geht auch hier ein Großteil der Wärme über die Außenwände verloren. Der Einbau der PE-Stützen und die Änderung der Parameter haben keine Verbesserung erzielt. Auch aus Abbildung 85 wird deutlich, dass die erläuterten Änderungen keine nennenswerten Auswirkungen auf den Wärmestrom haben. Die Rohrleiter gibt immer noch sehr viel Wärme ab, so dass die Bilanz nicht ausgeglichen ist.

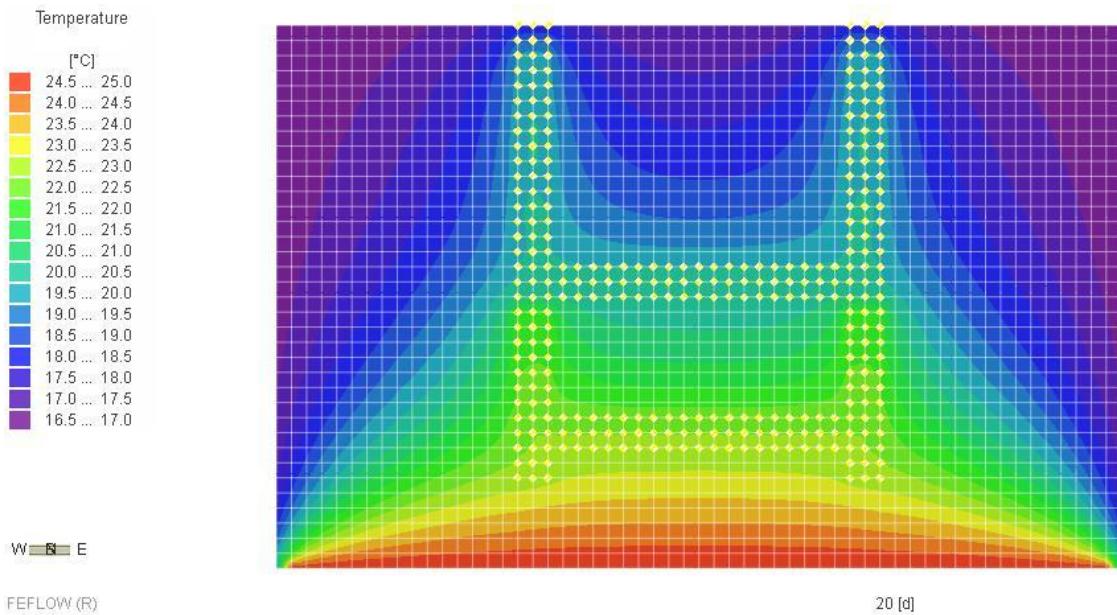


Abbildung 84: V2 – Variante3: Temperaturverteilung nach 20 Tagen

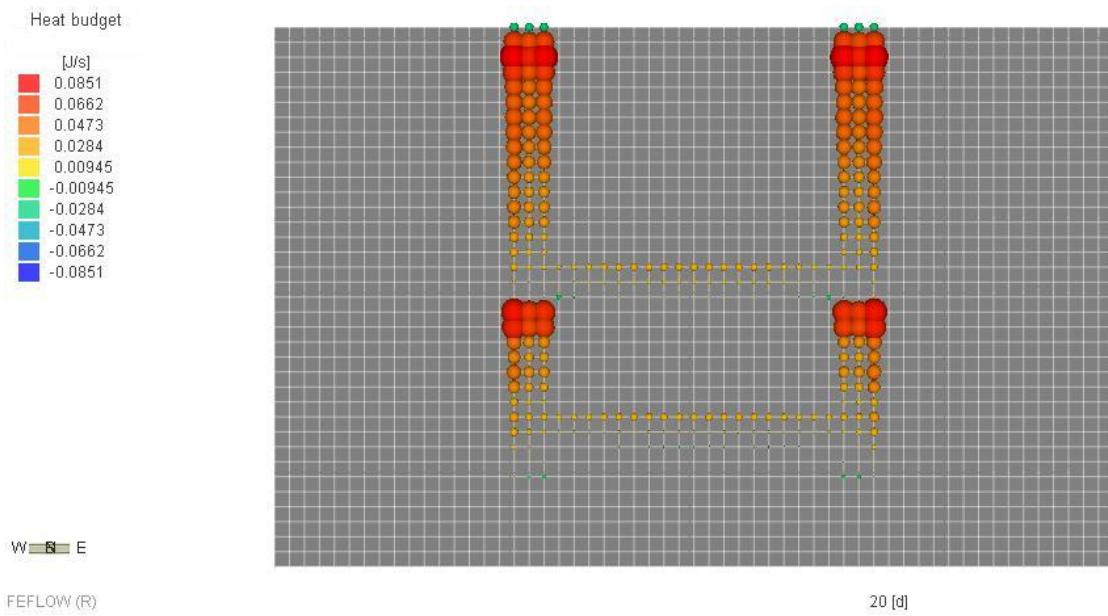


Abbildung 85: V2 – Variante3: Wärmestrom (Heat budget) nach 20 Tagen

Dadurch waren die Möglichkeiten der Modellanpassungen zunächst erschöpft. Die größte Unsicherheit lag in der Beurteilung der Temperaturentwicklung im Sand-Wasser-Gemisch. Bei dem Versuch V2 waren noch keine Temperaturfühler (Kontrollpunkte) außerhalb der Rohrleiter installiert, so dass ein direkter Abgleich der Simulationsergebnisse mit Messwerten nicht möglich war. Aus diesem Grund wurden die numerischen Untersuchungen an dem Versuch V2 beendet und der Versuch V4, bei

dem Temperaturfühler im Sand-Wasser-Gemisch installiert waren, wurde näher untersucht (Kap. 4.3.3).

#### 4.3.3 Simulationen zu Schichtungsversuch V4

Die erste Variante des Versuchs V4 ist die **Variante4**, die auf der Variante3 des Versuchs V2 (Kapitel 4.3.2) aufbaut. Im Vergleich zu dem Versuch V2 wurde im Versuch V4 die Aufheiztemperatur der Heizplatten von 25 °C auf 30 °C erhöht, was zu einer schnelleren Durchmischung führte bei ansonsten gleichen Abläufen. Die Wärmeleitfähigkeit der Matrix wurde wieder von 1 J/m/s/K auf 2 J/m/s/K erhöht, um eine stärkere Aufheizung des oberen Teils zu bewirken. Des Weiteren wurde an der freien Oberfläche, d. h. an der obersten Elementschicht, ein Wärmeleitkoeffizient von 5 W/m<sup>2</sup>/K angesetzt, um den Wärmeverlust an der freien Oberfläche des Technikumstands, der zu einer Abkühlung der obersten Partien des Sand-Wasser-Gemisches führt, zu berücksichtigen.

Bei dem Versuch V4 war neben der Messsensorik in den Schächten auch eine Überwachung der Temperatur im Sand-Wasser-Gemisch sowie der Raumtemperatur („Umgebungsmonitoring“ T1–T6) installiert. Die Start- und Außentemperatur wurde im Modell auf 22,5 °C festgelegt, so wie sie im Versuch ermittelt wurde. Entsprechend dem „Umgebungsmonitoring“ im Versuch wurden an den gleichen Stellen im Modell fünf Kontrollpunkte gesetzt, so dass ein Vergleich der aufgezeichneten mit den vom Modell berechneten Temperaturen möglich war. Die Varianten des Versuchs V4 wurden über 10 Tage Simulationszeit berechnet (im Versuch selbst kam es nach 13 Tagen zur Durchmischung).

Abbildung 86 zeigt die Temperaturverteilung von Variante4 nach 10 Tagen Simulationszeit und die Lage der Kontrollpunkte. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das Sand-Wasser-Gemisch im Gegensatz zu den Varianten aus Versuch V2 stärker aufheizt. Dies liegt an der erhöhten Aufheiztemperatur der Heizplatten. Weiterhin geht aber über die Außenwände ein großer Teil der Wärme verloren. Bei der Betrachtung des Wärmestroms (Abbildung 87) wird deutlich, dass die Rohrleiter viel weniger Wärme an das Sand-Wasser-Gemisch abgibt und vor allem im Bereich der oberen „Strecke“ Wärme annimmt. Die Bilanz ist annähernd ausgeglichen, so dass im weiteren Verlauf auf eine Darstellung des Wärmestroms verzichtet wird.

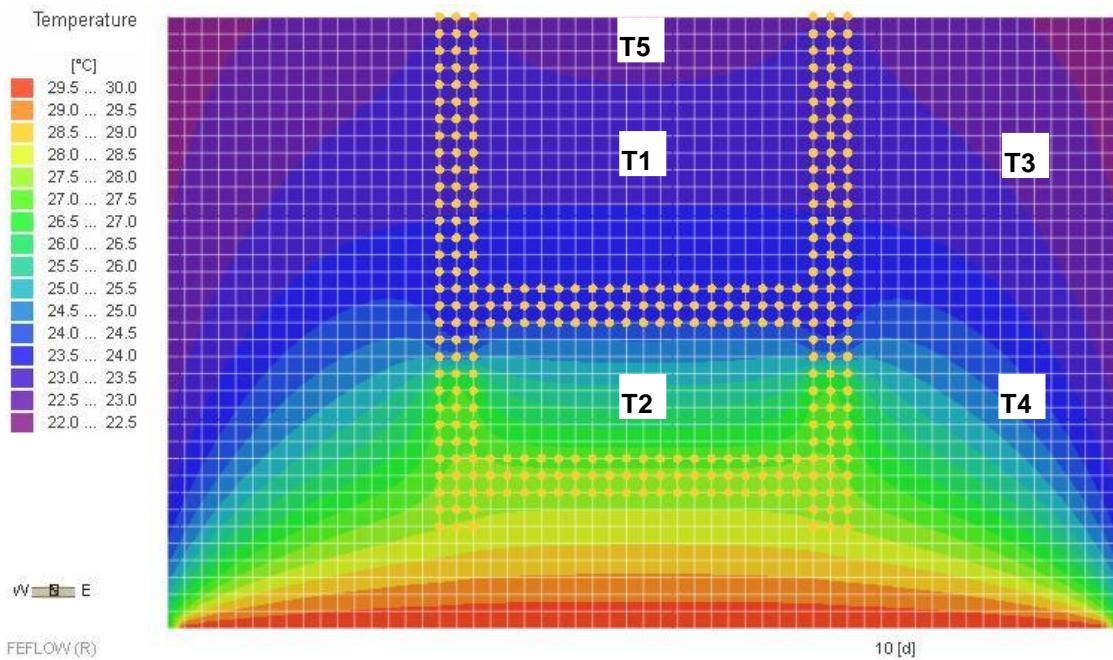


Abbildung 86: V4 – Variante4: Temperaturverteilung nach 10 Tagen und Position „Umgebungsmonitoring“

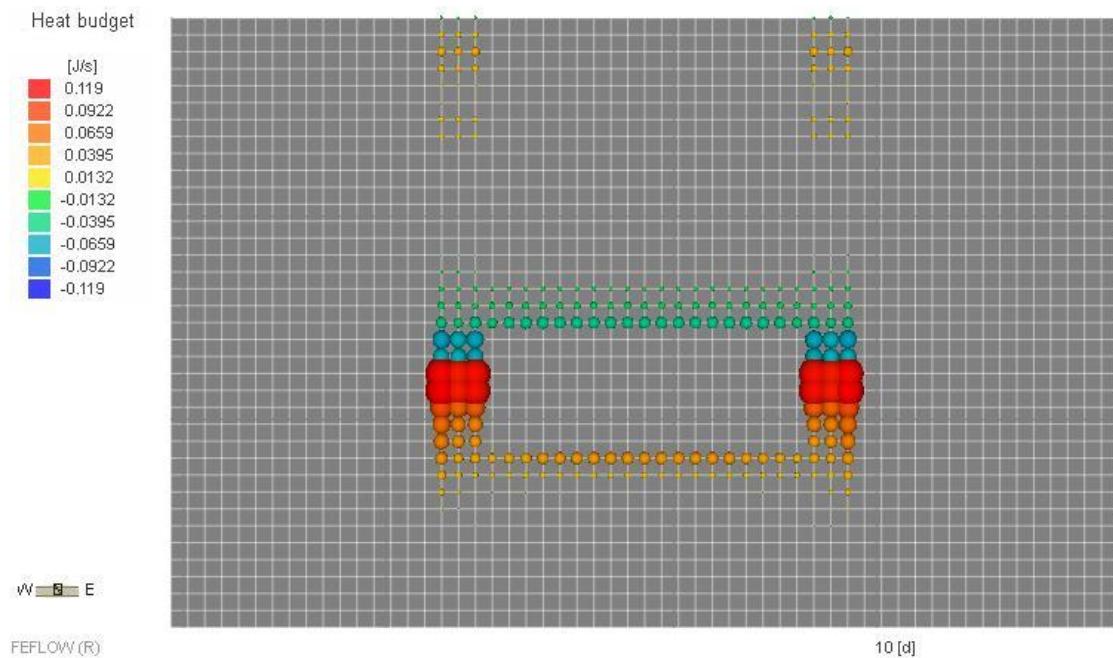


Abbildung 87: V4 – Variante4: Wärmestrom (Heat budget) nach 10 Tagen

Abbildung 88 zeigt den Temperaturverlauf über 10 Tage Simulationszeit an den fünf Kontrollpunkten im Modell; zum Vergleich ist in Abbildung 89 das „Umgebungsmonitoring“ aus dem Versuch V4 dargestellt. Zudem sind in Tabelle 5 die Temperaturen an den Kontrollpunkten aus dem Versuch und dem Modell zusammenfassend gegenüber gestellt.

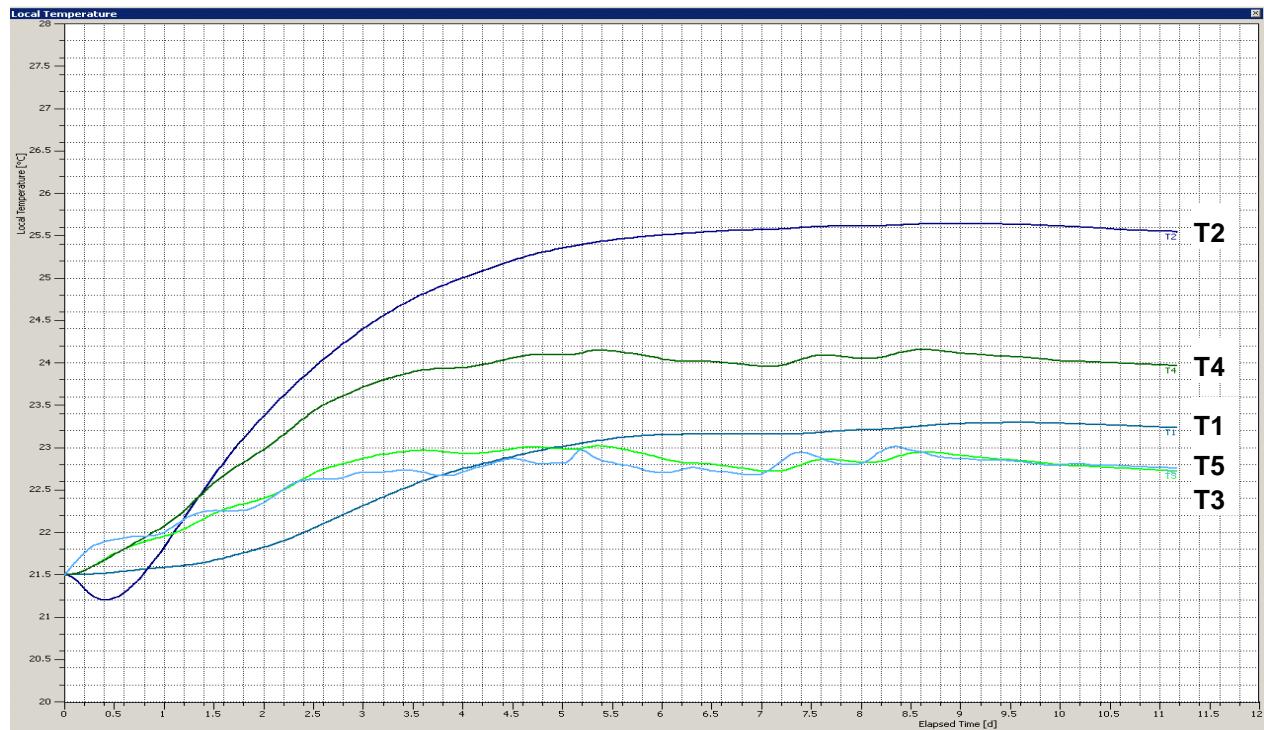


Abbildung 88: V4 – Variante4: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d)

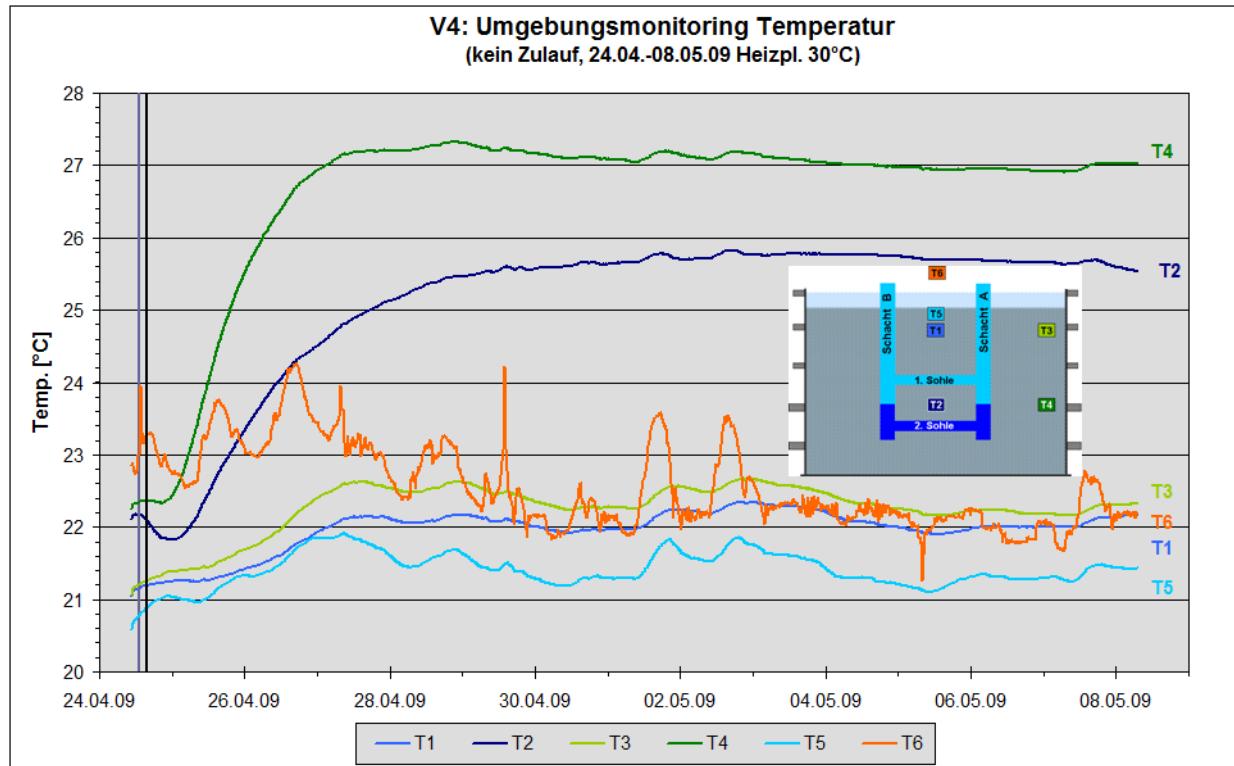


Abbildung 89: V4: reales Umgebungsmonitoring Temperatur (°C)

Tabelle 5: V4 – Variante4: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten

Kontroll- punkt	~ Temperatur (°C)	
	Versuch	Modell
T1	22	23,2
T2	25,75	25,5
T3	22,25	22,7
T4	27	24
T5	21,25	22,75

Wie auch im Versuch sinkt die Temperatur am Punkt T2 zu Beginn und steigt im weiteren Verlauf steil an. Im Modell wird an T2 nach 10 Tagen eine Temperatur von ca. 25,5 °C erreicht, im Versuch beläuft sich die Temperatur nach 10 Tagen auf 25,75 °C. An Punkt T4 ist die Temperatur im Modell deutlich geringer als im Versuch. Auffällig ist, dass die Punkte T2 und T4 im unteren Teil des Modells liegen. Die übrigen Punkte weisen eine höhere Temperatur als im Versuch auf.

Auf Grund der im Vergleich zum Versuch geringen Temperaturen an den Punkten T2 und T4 wurde in **Variante9** der Wärmeleitkoeffizient des PE-Behälters von 14 auf 0,4375 J/m<sup>2</sup>/s/K verkleinert, so dass der Wärmeverlust über die Außenwände verringert wird. Nach unserer Einschätzung ist die Verringerung der Wärmeabfuhr plausibel und wird durch die am Behälter angebrachten umlaufenden Stahlträger hervorgerufen (vgl. Abbildung 24, S. 65). Diese der Stabilisierung des Behälters dienenden Träger behindern zum einen das gradlinige Aufsteigen von Luft entlang des Behälters. Sie führen zu einer gewissen Verwirbelung der Luft mit einem reduzierten Kontakt zur Behälterwandung. Zum anderen bewirken sie durch die „Verdickung“ der Wandung eine bessere Isolierung. Beides führt dazu, dass weniger Wärme abgeführt wird, als wenn diese Träger nicht vorhanden wären. Der ursprüngliche Wärmeleitkoeffizient entspricht dem einer glatten Auswandung. Zudem wurde die Wärmeleitfähigkeit der Matrix von 2 auf 4 J/m/s/K verdoppelt, so dass die Wärmeausbreitung im Sand-Wasser-Gemisch erhöht wird. Ebenso wurde der Wärmeleitkoeffizient an der freien Oberfläche von 5 auf 10 W/m<sup>2</sup>/K verdoppelt, um eine Abkühlung im oberen Bereich zu erzielen.

Die Abbildung 90 zeigt, dass die oben erläuterten Änderungen eine deutliche Verbesserung der Wärmeausbreitung und somit eine Annäherung an die Ergebnisse des Versuchs hervorgerufen haben. Die Wärme breitet sich von unten gleichmäßig nach oben hin aus und über die Außenwände wird eine deutlich verringerte Wärmemenge abgegeben.

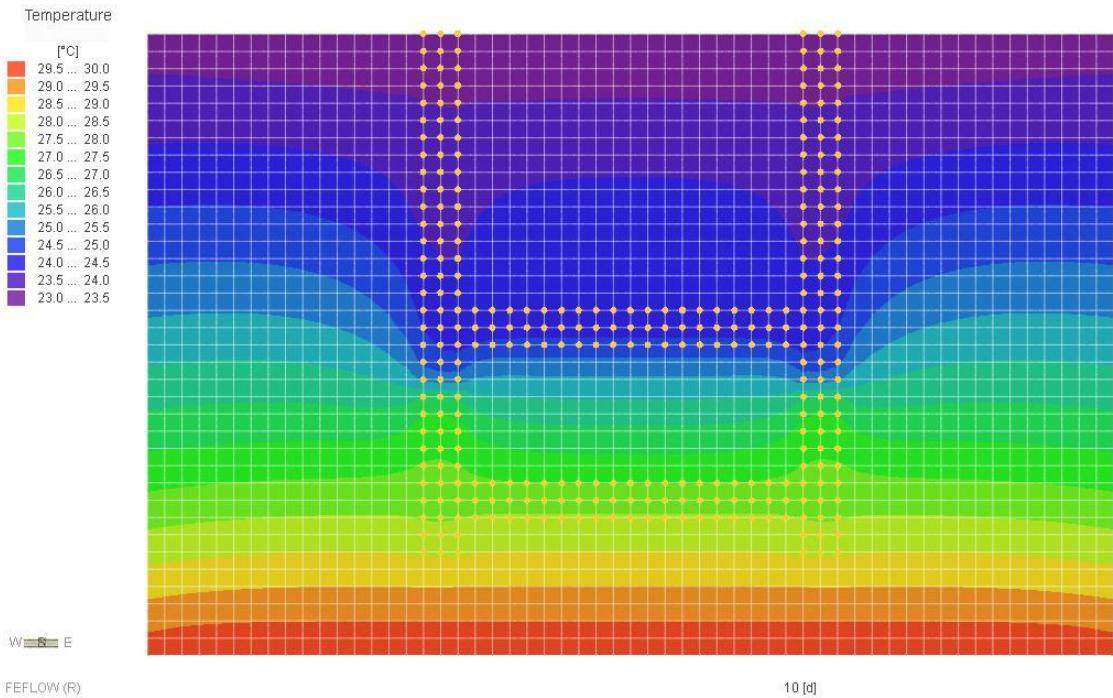


Abbildung 90: V4 – Variante9: Temperaturverteilung nach 10 Tagen

Aus Abbildung 91 und Tabelle 6 wird ersichtlich, dass die oben erläuterten Änderungen in Variante9 zu einem Anstieg der Temperatur an den Punkten T4 und T2 geführt hat. Durch die genannten Änderungen sind an den beiden Punkten annähernd die Temperaturen des Versuchs erreicht worden. An den Punkten T1, T3 und T5 ist die Temperatur aber ebenfalls weiter gestiegen und im Vergleich zum Versuch weiterhin deutlich zu hoch.



Abbildung 91: V4 – Variante9: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d)

Tabelle 6: V4 – Variante9: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten

Kontrollpunkt	~ Temperatur (°C)	
	Versuch	Modell
T1	22	24
T2	25,75	26,3
T3	22,25	24,2
T4	27	26,6
T5	21,25	23,2

Um die Temperatur im oberen Bereich (T1, T3, T5) zu senken, wurde der freien Oberfläche, d. h. der obersten Elementschicht, in **Variante 10.2** eine Porosität von 100 % zugewiesen. Damit wird die ca. 5 cm mächtige Wasserfläche auf dem Sand-Wasser-Gemisch abgebildet, von der permanent Wasser verdunstet. Die Verdunstung wurde während der Versuche durch Wasserzugabe kompensiert, so dass Informationen über die Verdunstungsraten vorlagen. Durch Ansetzen einer entsprechenden Verdunstungskälte, die im Modell durch eine Wärmeverlustrate an der obersten Elementschicht berücksichtigt wird, wird eine Abkühlung im oberen Be-

reich erzielt. Es wurde ein Wert von 169,7 J/s angesetzt. Im Modell wurde dies durch die Randbedingung 4. Art mit einem Wert von 0,080464675 J/s pro Knoten umgesetzt.

Die Abbildung 92 und die Tabelle 7 zeigen die Temperaturen an den Kontrollpunkten T1-T5 nach einer Simulationszeit von 10 Tagen. Die erläuterten Parameteränderungen haben dazu geführt, dass sich das Sand-Wasser-Gemisch weniger stark aufheizt. Der Punkt T5 erreicht nach 10 Tagen lediglich eine Temperatur von 17,4 °C, was deutlich unter der im Versuch ermittelten Temperatur liegt.



Abbildung 92: V4 – Variante10.2: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d)

Tabelle 7: V4 – Variante10.2: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten

Kontroll- punkt	~ Temperatur (°C)	
	Versuch	Modell
T1	22	20,2
T2	25,75	25,4
T3	22,25	19,6
T4	27	24,9
T5	21,25	17,4

Auf Grund der nun im Vergleich zu den Messwerten zu geringen Temperaturen wurde in der **Variante10.4** die Wärmeverlustrate an der obersten Elementschicht auf 85 J/s (0,0430303461 J/s pro Knoten) herunter gesetzt, wodurch eine Verringerung der Abkühlung an der freien Wasseroberfläche erreicht wird.

Die Halbierung der Wärmeverlustrate führt wie erwartet zu einem Anstieg der Temperatur im Sand-Wasser-Gemisch im Vergleich zur Variante10.2 (Abbildung 93, Tabelle 8). Besonders deutlich wird dies an Punkt T5. In Variante10.2 werden hier lediglich 17,4 °C, in Variante10.4 hingegen 20,75 °C erreicht. Auch an Punkt T4 konnte das Delta zum Ist-Zustand mit 1,2 °C gegenüber Variante10.2 ( $\Delta$  2,1 °C) praktisch halbiert werden.

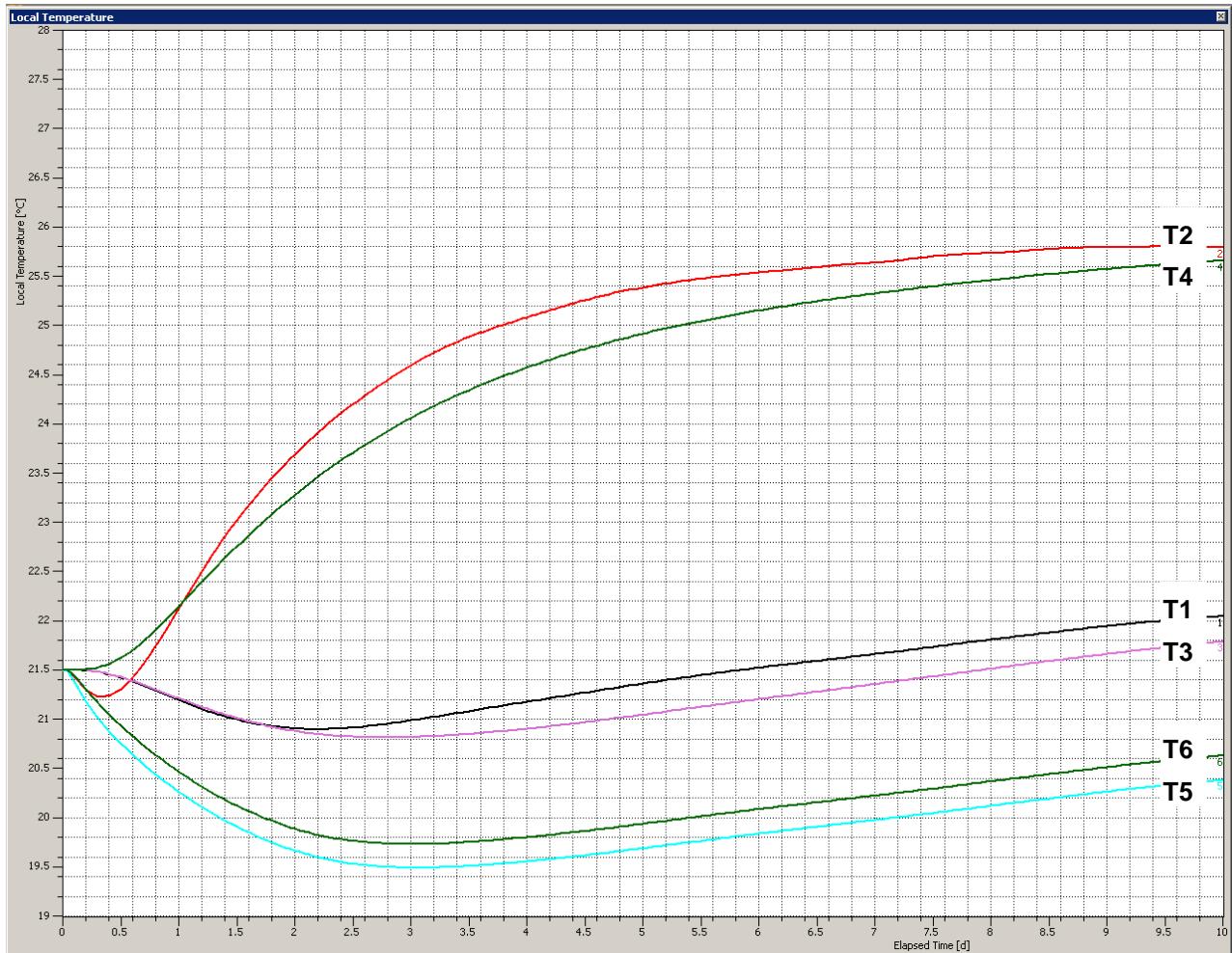


Abbildung 93: V4 – Variante10.4: „Umgebungsmonitoring“ Temperatur (°C) über die Zeit (d)

Tabelle 8: V4 – Variante10.4: Vergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten

Kontrollpunkt	~ Temperatur (°C)	
	Versuch	Modell
T1	22	22,3
T2	25,75	25,9
T3	22,25	22,1
T4	27	25,8
T5	21,25	20,75

Tabelle 9: V4 – Variantenvergleich der Temperaturen aus Versuch und Simulation nach 10 Tagen an den Kontrollpunkten

Kontroll- punkt	°C	Δ (°C) gegenüber Versuch			
	Versuch	Var4	Var9	Var10.2	Var10.4
T1	22	1,20	2,00	-1,80	0,30
T2	25,75	-0,25	0,55	-0,35	0,15
T3	22,25	0,45	1,95	-2,65	-0,15
T4	27	-3,00	-0,40	-2,10	-1,20
T5	21,25	1,50	1,95	-3,85	-0,50

Die Variante 10.4 erreicht bei fast allen Kontrollpunkten die besten Übereinstimmungen (Tabelle 9) und annähernd die Temperaturen, die im Versuch ermittelt wurden. Insgesamt ergibt sich also eine recht präzise und plausible Nachrechnung der Wärmeausbreitung im Sand-Wasser-Gemisch, die eine gute Grundlage für weitere CFD-Berechnungen darstellt.

## 4.4 CFD-Modellrechnungen

### 4.4.1 Grundlagen und Ausgangsdaten

Die offene, turbulente und dichteabhängige Wasserbewegung in der Rohrleiter des Versuchsstandes sollte mit numerischen Modellen nachgerechnet werden. Nach dem Stand der Technik wird dafür ein Computational-Fluid-Dynamic-Modell (CFD-Modell) verwendet, das nach dem Finite-Volumen-Verfahren (FV) die die Strömung beschreibende Navier-Stokes-Gleichung berechnet. Wie bei anderen numerischen Verfahren liegt den CFD-Modellen eine Aufteilung des zu berechnenden Fluid-Körpers in einzelne Teilkörper zu Grunde. Hervorzuheben ist, dass für CFD i. Allg. sehr geringe Knotenabstände (im cm-Bereich) erforderlich sind. Dies ist auf die Abbildung der unterschiedlich großen Turbulenzballen zurückzuführen. Verwendet wurde der Simulator CFX von der Firma ANSYS. Bei den Modellrechnungen wird der Versuchsstand 2-dimensional in einem Vertikalschnitt mittig durch die Rohrleiter abgebildet.

Die zur Berechnung verwendete Modellgeometrie basiert auf dem in Abbildung 94 dargestellten grundsätzlichen Aufbau des Versuchsstandes.

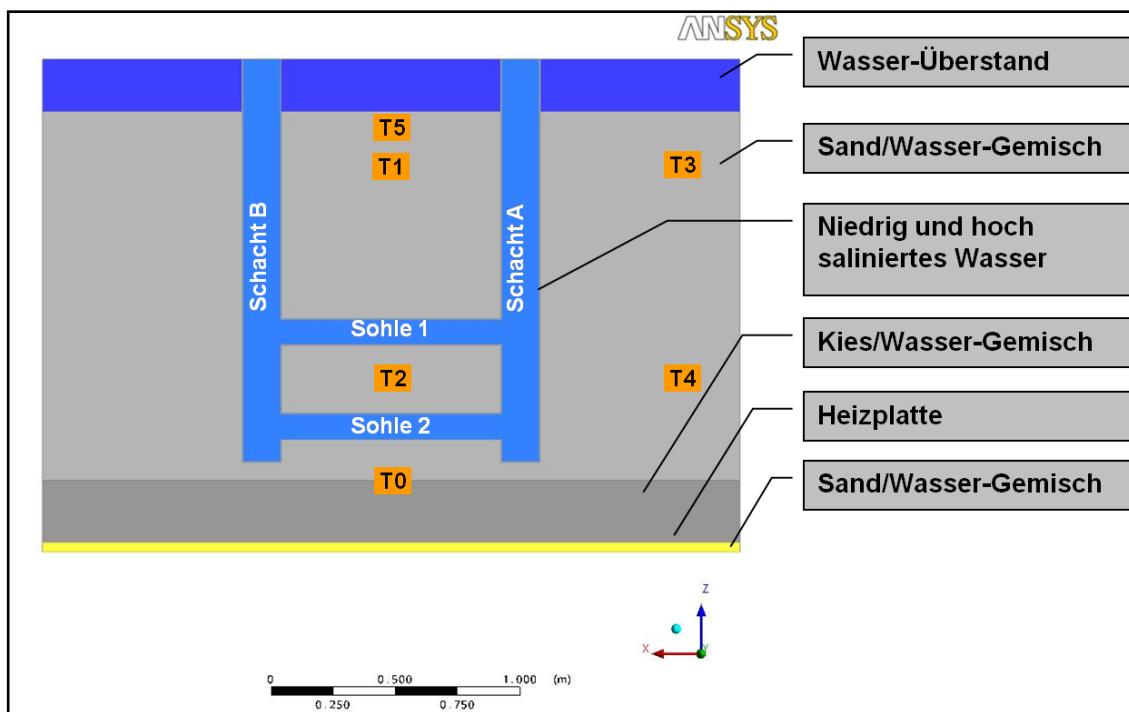


Abbildung 94: Modellgeometrie „Versuchsstand“ im CFD-Modell

Als Grundlage zur Analyse der Temperatur-, Strömungs- und Konzentrationsverhältnisse sind die nachstehend in Tabelle 10 aufgeführten Randbedingungen und Modellparameter verwendet worden. Die Temperatur-, Strömungs- und Konzentrationsverhältnisse im Versuchsstand werden für 2 Versuche mit jeweils 2 Varianten modelliert. Die Betrachtungsfälle unterscheiden sich hinsichtlich der Knotenabstände (1,0 cm und 3,3 cm in der Rohrleiter), einzelner Modellparameter wie Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität sowie hinsichtlich der Umgebungstemperatur, der Ausgangssalzkonzentration und des Zulaufes von Frischwasser. Für den Schichtungsversuch V5 wurden die instationären Randbedingungen abgebildet (Außentemperatur über die Zeit). Abbildung 95 zeigt die Ergebnisse der Temperaturmessung in der Technikumshalle, d. h. die Temperaturen über die Zeit, die in V5 angesetzt wurden. Versuchsweise wurde für beide Modelle eine unrealistisch große Wärmeleitfähigkeit des Sand-Wasser-Gemischs angesetzt. Hiermit sollte eine möglicherweise auftretende Wasserströmung im Sand-Wasser-Gemisch berücksichtigt werden.

Tabelle 10: Übersicht über die Modellrandbedingungen

V a r i a n t e	Temperatur in °C		Zulauf in l/min	Salz- konzentration in mg/l		Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)		Spez. Wärmekapazität in J/(kg·K)	
	Umgebung	Heizplatte		Min.	Max.	Sand/ Wasser	Kies/ Wasser	Sand/ Wasser	Kies/ Wasser
1.1 (V2)	16	25	0	500	14000	100	100	4000	2000
1.2 (V2)	16	25	0	400	8750	2,4	1,8	2500	2400
2.1 (V5)	Messwerte gemäß DMT	25	0,6	500	14000	100	100	4000	2000
2.2 (V5)	Messwerte gemäß DMT	25	0,6	400	10000	2,4	1,8	2500	2400

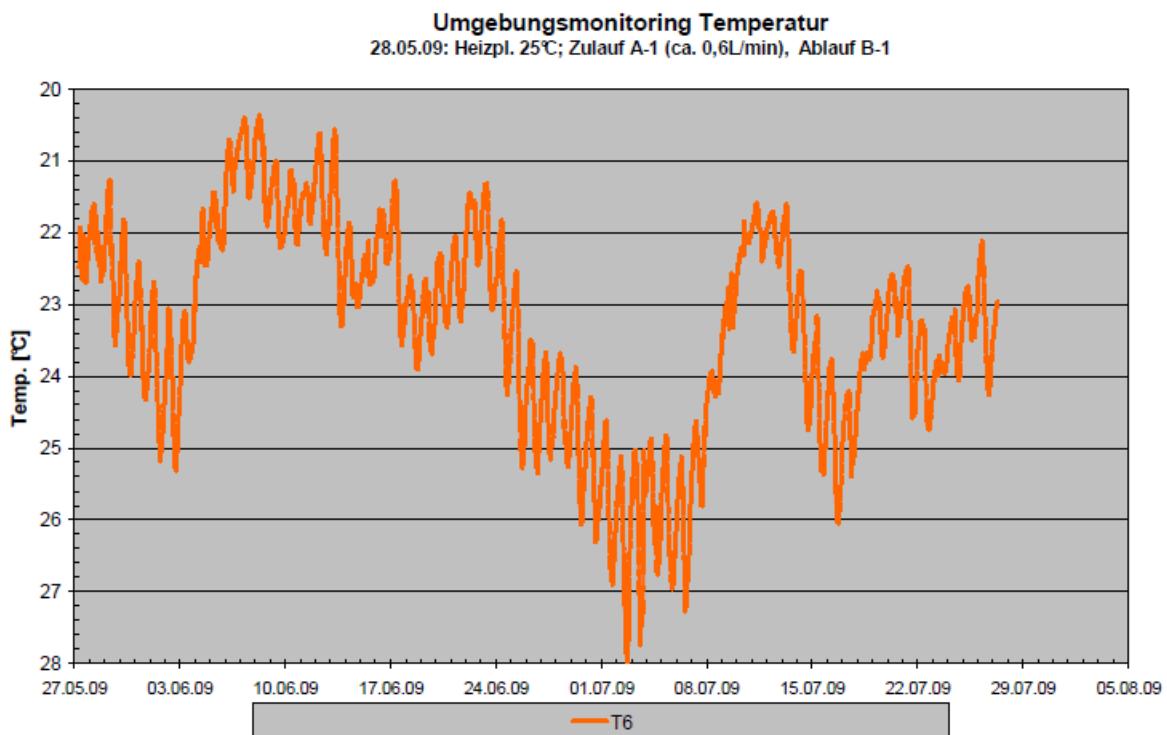


Abbildung 95: Messwerte aus Umgebungsmonitoring - Temperaturen (°C) über die Zeit für Versuch V5

#### 4.4.2 Modellrechnungen zu Schichtungsversuch V2

Der Versuch V2 wurde wie oben erläutert in 2 Varianten (Variante 1.1 und 1.2) gerechnet, die sich in der Variation einzelner Modellparameter unterscheiden (Tabelle 10). Der prinzipielle Aufbau ist jedoch gleich und kann der Abbildung 96 entnommen werden. Die Abmessungen des Modells entsprechen dem PE-Rechteckbehälter. Der untere Bereich der Rohrleiter ist mit Salzwasser erfüllt (roter Bereich) und der obere Bereich mit Süßwasser (blauer Bereich), so dass eine Unterschichtung bis etwa zur Mitte zwischen den beiden Sohlen vorherrscht. Die Temperatur der Heizplatte wurde konstant mit 25 °C angesetzt. Die Außentemperatur beträgt 16 °C. In V2 wurde kein Zulauf berücksichtigt. Für jede Variante wurden jeweils die Temperatur und die Salzkonzentration ausgewertet und nachfolgend dargestellt.

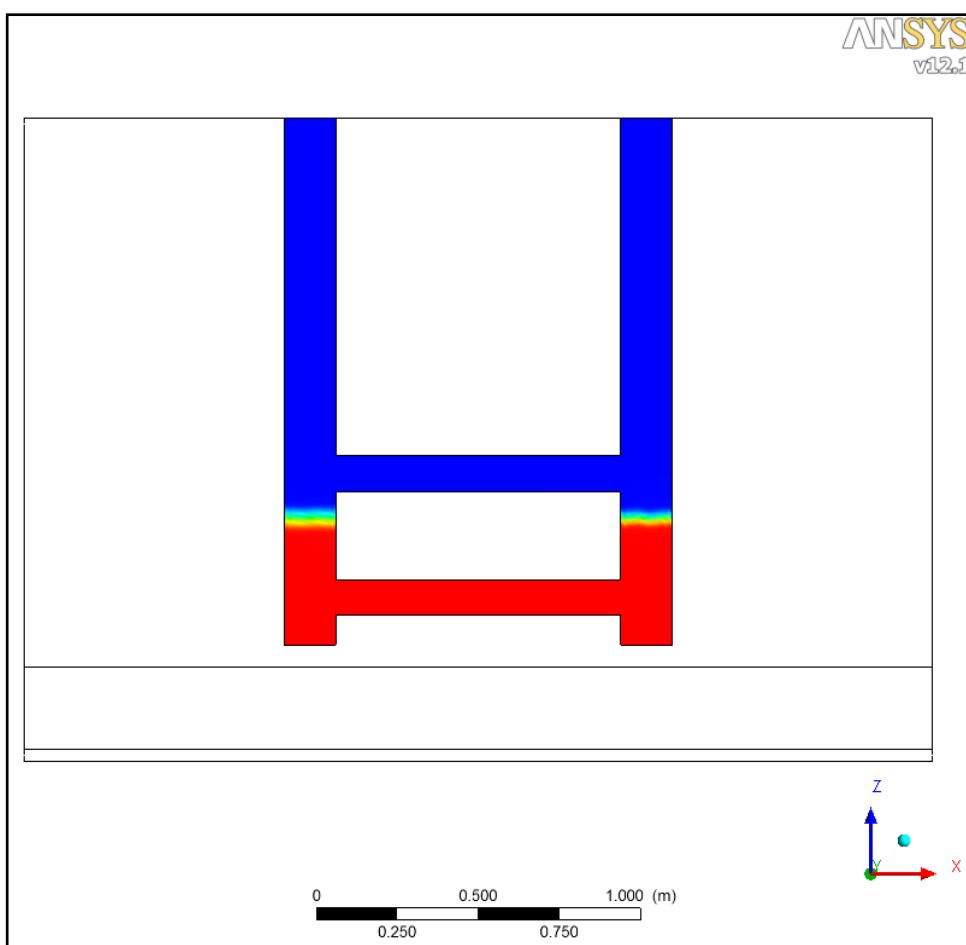


Abbildung 96: Salzkonzentrations-Anfangsbedingungen – Versuch V2

Mit Variante 1.1 wurde zuerst eine Studie zur Auswirkung der Diskretisierung auf das Rechenergebnis durchgeführt. Es wurde eine Rechnung mit

einem Knotenabstand in den Sohlen und den Schächten von 1,0 cm (19.384 Gitterelementen) und eine zweite Rechnung mit einem Knotenabstand von 3,3 cm (3.734 Gitterelemente) durchgeführt. In Abbildung 97 ist links die mit dem Modell errechnete Salzkonzentration über die Zeit mit einem Knotenabstand von 1,0 cm dargestellt und rechts eine Darstellung der Diskretisierung. In Analogie dazu kann der Abbildung 98 die errechnete Salzkonzentration mit einem Knotenabstand von 3,3 cm entnommen werden. Der geringere Knotenabstand zeigt im Allgemeinen bessere Modellergebnisse, so dass im Folgenden nur noch Berechnungen mit einem Knotenabstand von 1,0 cm durchgeführt wurden.

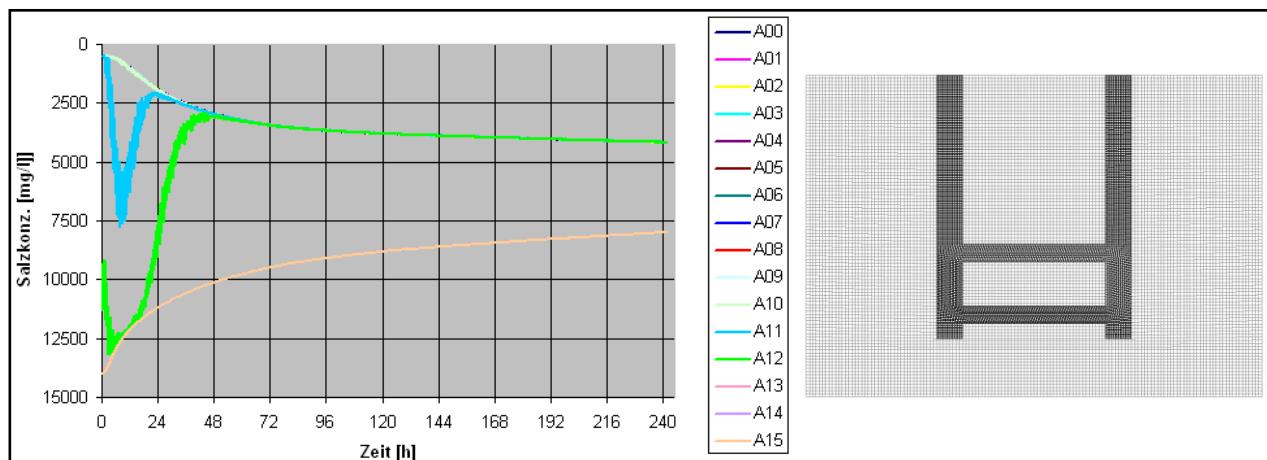


Abbildung 97: V2 Variante 1.1 - links: Salzkonzentration Schacht A; rechts: Diskretisierung 1,0 cm

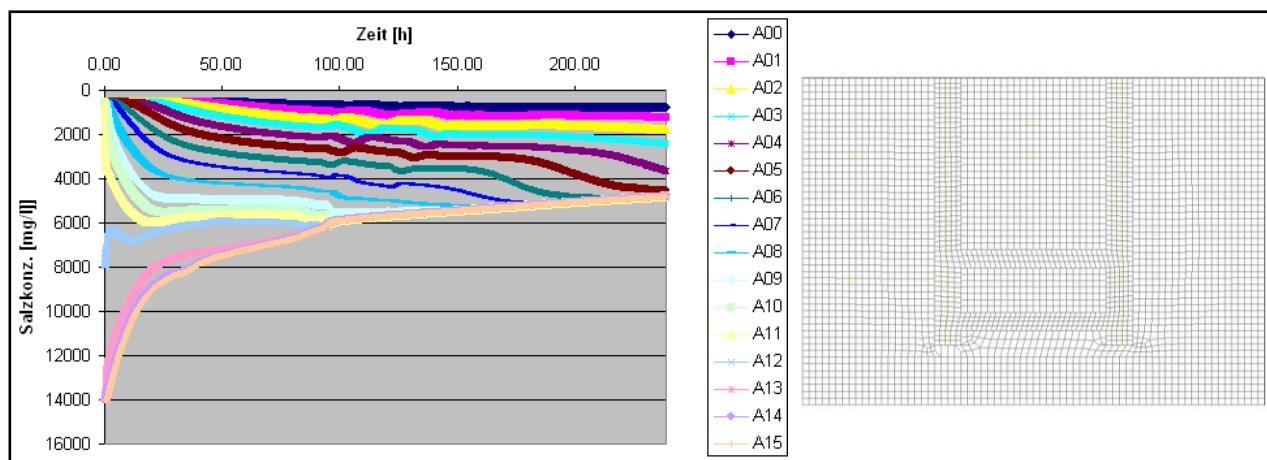
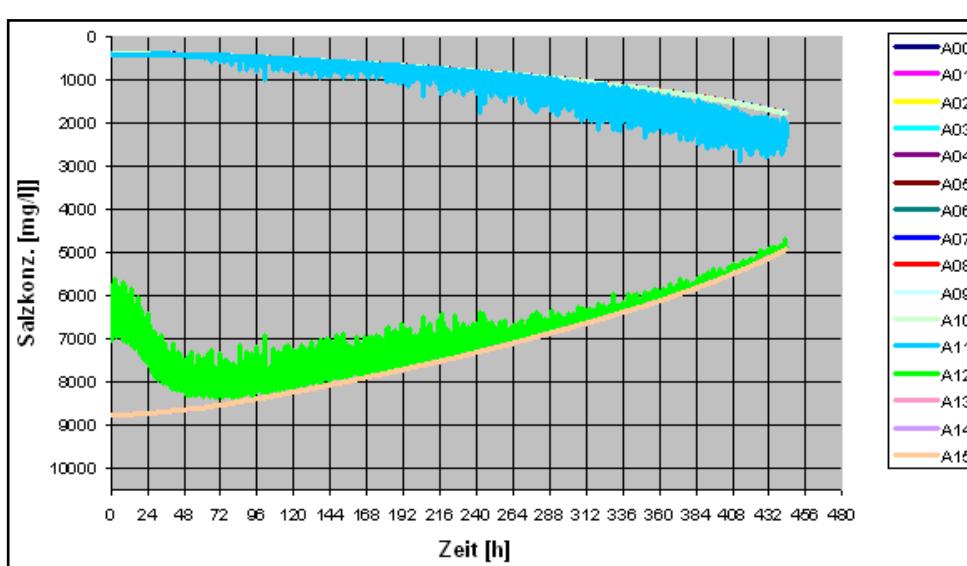
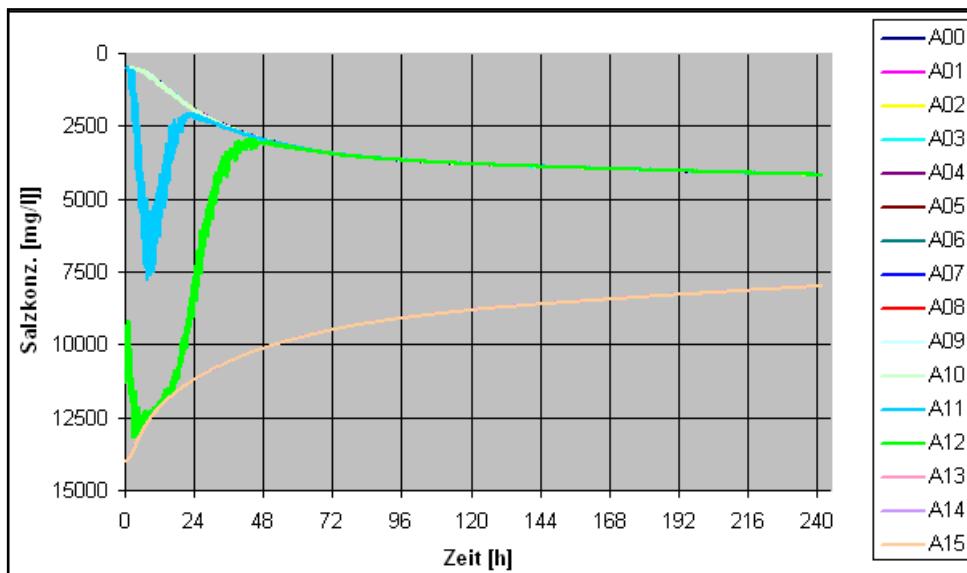


Abbildung 98: V2 Variante 1.1 - links: Salzkonzentration Schacht A; rechts: Diskretisierung 3,3 cm

Abbildung 99 und Abbildung 100 zeigen nun die Salzkonzentration der Varianten 1.1 und 1.2, beide mit einer Diskretisierung von 1,0 cm. Im Vergleich mit der elektr. Leitfähigkeit der Messwerte (Abbildung 101) zeigen

die Ganglinien der Variante 1.1 qualitativ sowie quantitativ zwischen höher und niedrig mineralisierten Schichten einen ähnlichen Verlauf (Der Startpunkt der Simulationen liegt am rechten Ende des dunkelgrauen Bereiches in Abbildung 101, das Ende der Simulationen wird durch die beiden gestrichelten roten Linien markiert). Das sprunghafte Verhalten im Bereich der Messsonde A12 konnte durch die Simulation nur in Variante 1.1 näherungsweise nachgebildet werden. Die Zurücknahme der Salzkonzentration im Modell auf max. 8.750 mg/L (Var. 1.2) in der Rohrleiter führt zu einer größeren Diskrepanz von Modellwerten zu Messwerten für die tiefen Partien der Rohrleiter.



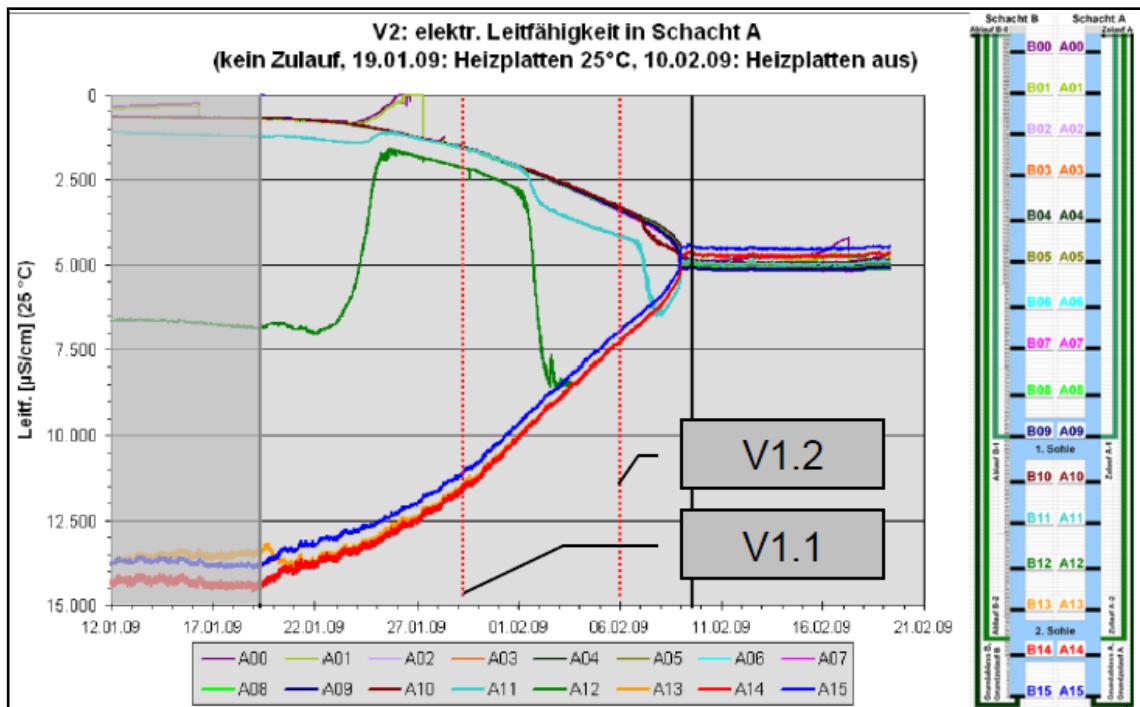


Abbildung 101: Messwerte zu V2 – elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

Abbildung 102 zeigt die Temperatur in Schacht A der Variante 1.1. Im Vergleich zu den Messwerten (Abbildung 104) wird deutlich, dass die überhöhte Wärmeleitfähigkeit des „Gebirges“ im Modell zu einer überhöhten Wirkung des Heizplatteneinflusses und zu einer stärkeren Erwärmung des Gesamtsystems führt. Die Variante 1.2 (Abbildung 103) liefert hingegen einen Temperaturunterschied (2,5 °C) zwischen höher und niedrig mineralisierten Schichten, der den Messwerten entspricht. Insgesamt bleibt aber das Gesamtsystem deutlich zu kühl (ca. 23 °C in den tieferen Partien gemessen und nur 19 °C berechnet). Dies ist möglicherweise auf das Fehlen der äußeren PE-Wände in den Modellen zurückzuführen, was u. a. in weiteren Modellrechnungen untersucht wurde.

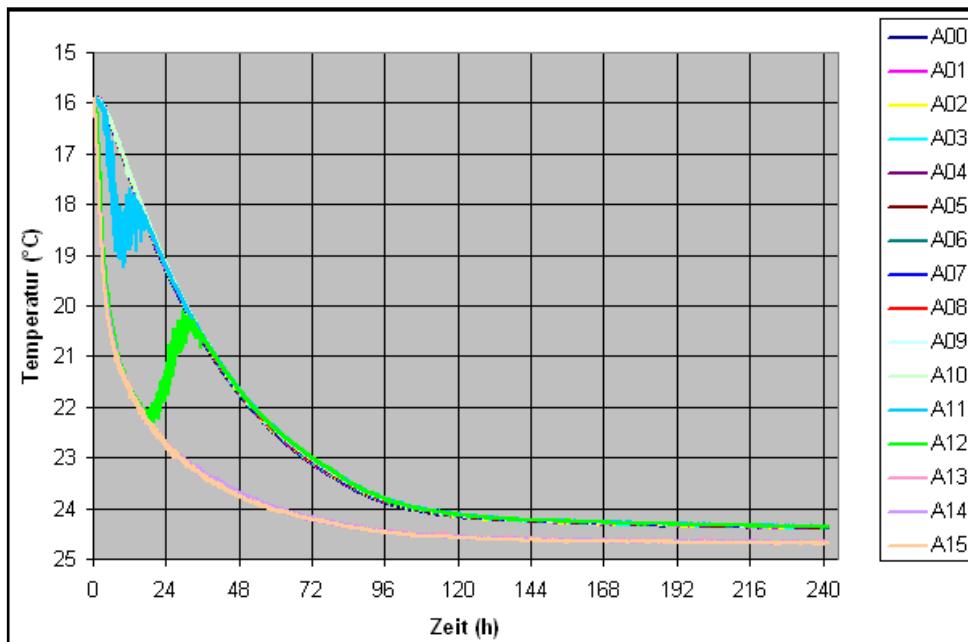


Abbildung 102: V2 Variante 1.1 – Temperatur über die Zeit in Schacht A

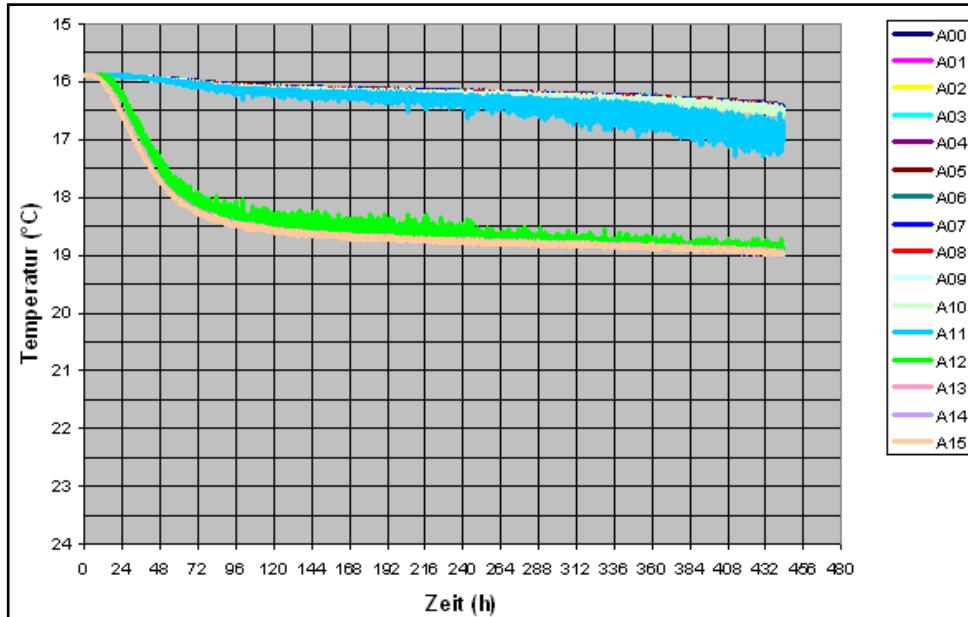


Abbildung 103: V2 Variante 1.2 – Temperatur über die Zeit in Schacht A

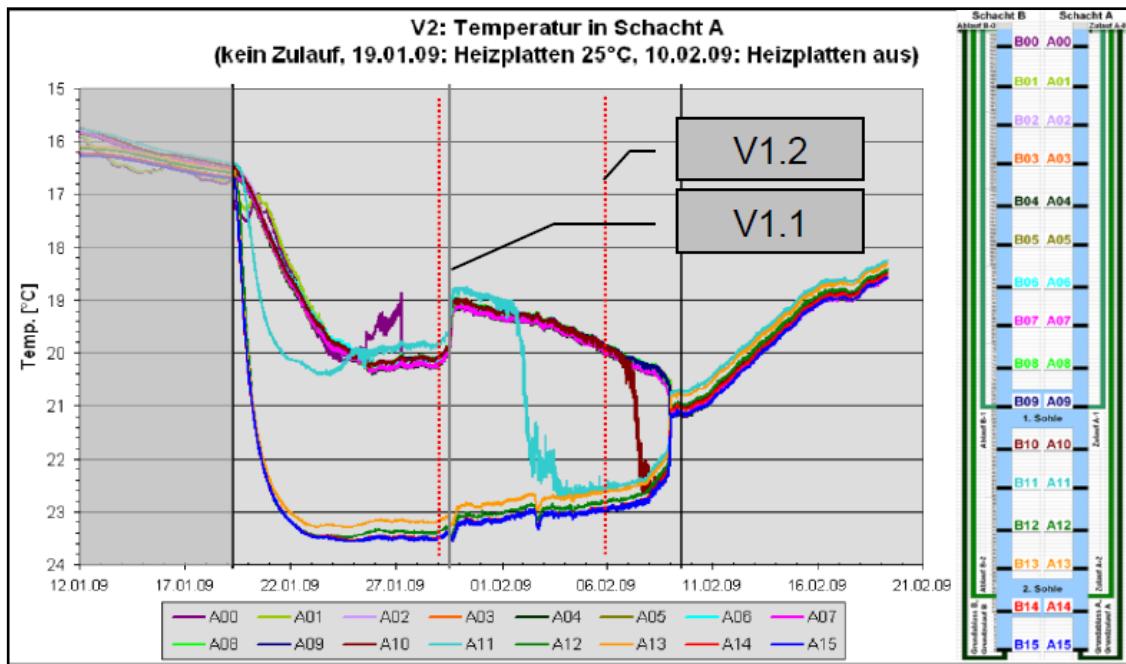


Abbildung 104: Messwerte zu V2 – Temperatur in Schacht A

Zur Klärung des Einflusses der Gitterauflösung auf die Wärmeleitung im Gebirge erfolgte eine instationäre Berechnung des Wärmetransports im Sand-Wasser-Gemisch (Feststoff). Dazu wurden drei der Höhe des Versuchsstandes entsprechenden Feststoffdomains mit unterschiedlicher Gitterauflösung abgebildet. Für die Außenwände und die oberen Flächen der Domains wurden adiabatische Randbedingungen angenommen. Als Ausgangstemperatur der Domains wurden 16,5 °C und für die Heizplatte wurde eine konstante Temperatur von 25 °C angesetzt. Entlang der Domains wurden im Abstand von 0,2 m Monitoringpunkte festgelegt. Ergebnis dieser Studie ist, dass der errechnete Wärmetransport für die betrachteten Gitterauflösungen annähernd identisch ist. Der Einfluss der gewählten Gitterknotenabstände im Sand-Wasser-Gemisch ist somit für das Modell vernachlässigbar. Der absolute Temperaturmesswert auf Höhe des Messpunktes A15 unterscheidet sich von der Testrechnung um ca. 3 °C. Diese Abweichung könnte auf zu niedrige Wärmeleitfähigkeiten im Modell oder auf die Ausprägung eines konvektiven Wärmetransports innerhalb des Sand-Wasser-Gemisches zurückgeführt werden. Die Klärung des bestimmenden Einflusses ist durch die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten im Sand-Wasser-Gemisch und/oder eine detaillierte Aufzeichnung der Wärmeverteilung möglich.

In einer weiteren Modellrechnung zu Versuch V2 wurde dann der Einfluss von isolierenden Materialien auf die Temperaturverteilung durch Abbildung

der Schachtwandung und der Außenwand des Versuchsstandes betrachtet. Zur Verringerung der Rechenzeit sind die Modelle jeweils lediglich durch ein Gitterelement in der Tiefenebene gekennzeichnet. In Abbildung 105 ist der grundsätzliche Aufbau des Versuchsstandes veranschaulicht.

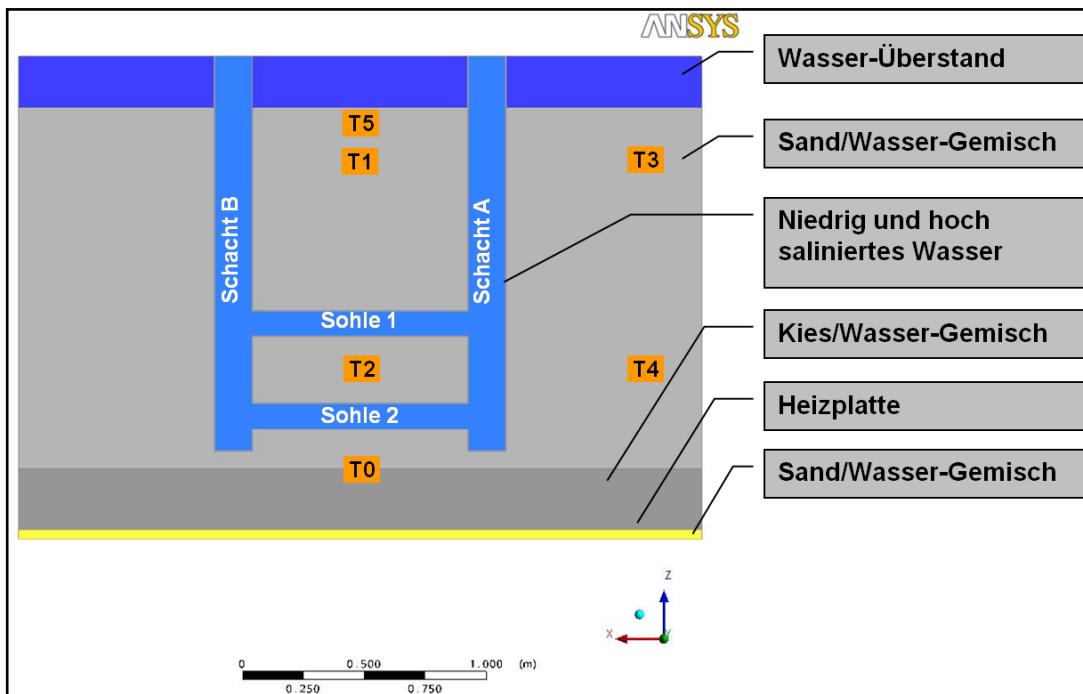


Abbildung 105: Veranschaulichung Versuchsstand

Grundlage zur Analyse der Temperatur-, Strömungs- und Salinitätsverhältnisse sind die nachstehend in Tabelle 11 aufgeführten Randbedingungen des Versuchs V2. Die Variante 1 baut auf den bisherigen Modellen von V2 auf. Zusätzlich zu den bisher durchgeföhrten Betrachtungen erfolgt die Berechnung unter Berücksichtigung isolierend wirkender Schachtwände und Außenplatten des Versuchsstandes.

Tabelle 11: Übersicht über die Modellrandbedingungen

V a r i a n t e	Temperatur in °C		Zulauf in l/min	Salz- konzentration in mg/l		Gitter- elemente	Kantenlänge in cm		Modellgröße
	Umgebung	Heizplatte		Min.	Max.		Fluid	Gebirge	
	1 (zu V2)	16,5	25,0	0	400	8.750	25.221	1,0	2,0

Mit der Variante 1 sollte der Einfluss von isolierenden Materialien durch Abbildung der Schachtwandung und der Außenwand des Versuchsstandes auf die Temperaturverteilung untersucht werden. Es wurde der nach oben offener PE-Rechteckbehälter mit einer Wandstärke von 2,5 cm und die PVC-Vollrohre mit einer Wandstärke von 0,4 cm im Schachtbereich und mit 0,3 cm im Streckenbereich abgebildet (Abbildung 106).

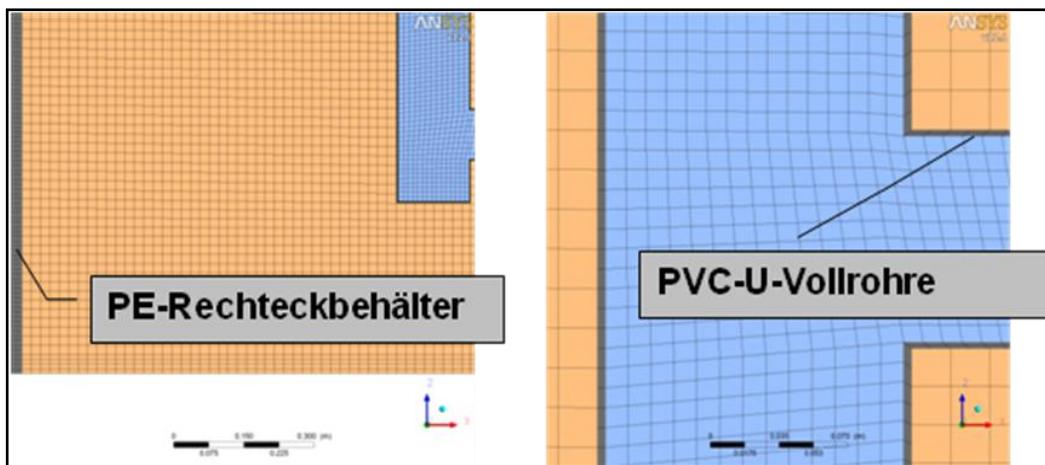


Abbildung 106: Versuchsstand – Gitterauflösung

Die Gegenüberstellung der Modellergebnisse (Abbildung 107) mit den Messwerten (Abbildung 108, hellgrauer Bereich) zeigt, dass die Aufwärmung im Versuch wesentlich schneller erfolgt als im Modell. Die Temperaturdifferenz zwischen höher und niedrig mineralisierten Wässern ist im Modell und im Versuch mit ca. 3 °C vergleichbar. Die absolute Temperaturerhöhung fällt im Modell im Vergleich zu den Messwerten zu gering aus (Differenz von ca. 4 °C).

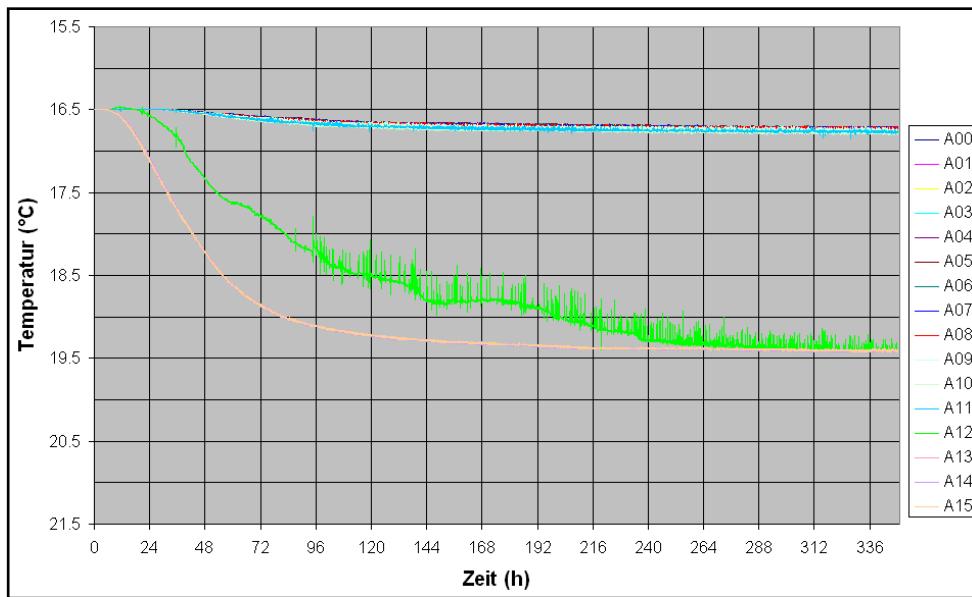


Abbildung 107: Variante 1 – Temperatur über die Zeit in Schacht A

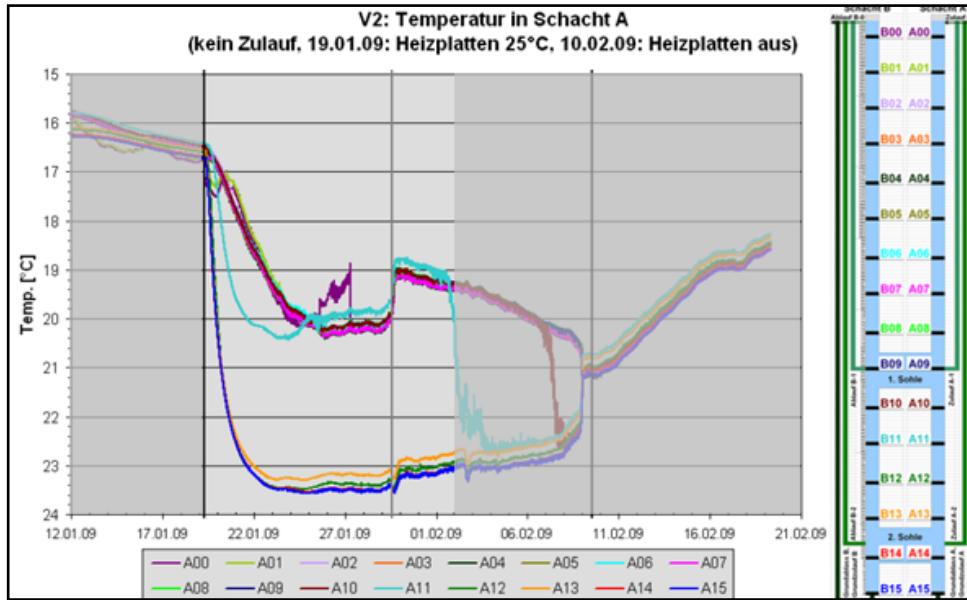


Abbildung 108: Messwerte zu V2 – Temperatur in Schacht A

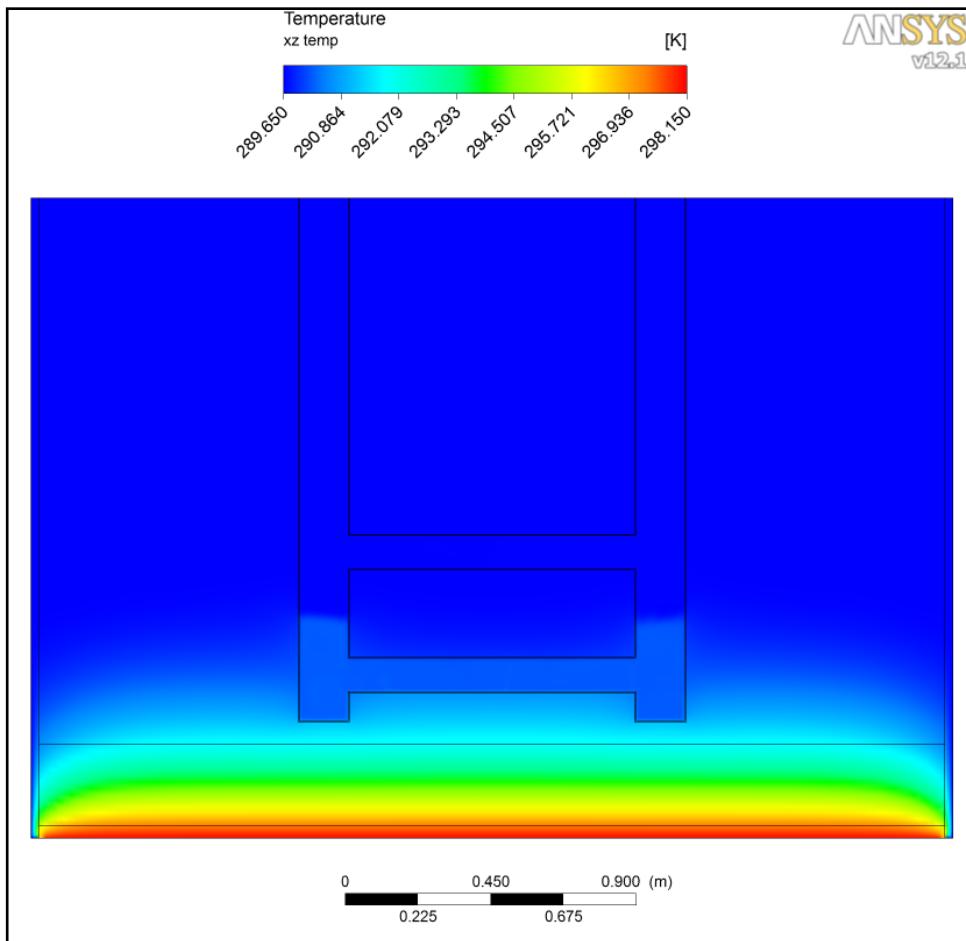


Abbildung 109: Variante 1 – Temperaturverteilung zum Zeitpunkt 24 h

Abbildung 109 zeigt die Temperaturverteilung der Variante 1 zum Zeitpunkt 24 h. Es ist zu erkennen, dass die Erwärmung des Gebirges von der Heizplatte aus geht. Im Bereich der Außenwände ist ein Wärmeverlust erkennbar. Die Temperaturerhöhung im Bereich der höher mineralisierten Wässer erfolgt aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit schneller.

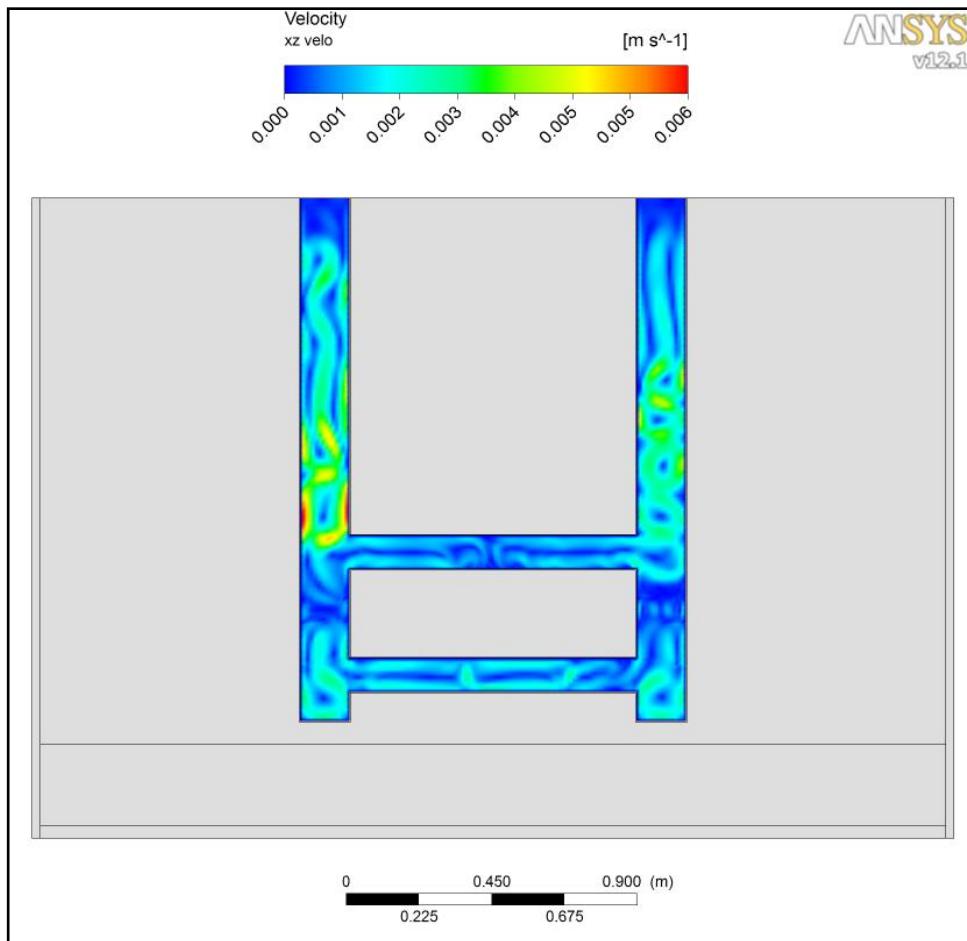


Abbildung 110: Variante 1 – Geschwindigkeitsverteilung zum Zeitpunkt 120 h

In Abbildung 110 ist die Geschwindigkeitsverteilung zum Zeitpunkt 120 h in den Schächten und Sohlen abgebildet. Über die gesamte Schachtlänge ist eine Bewegung zu erkennen. Knapp über der oberen Sohle sind die höchsten Geschwindigkeiten mit max. 0,006 m/s zu verzeichnen. An der Grenze zwischen höher und niedrig mineralisiertem Wasser ist offensichtlich eine sehr geringe Wasserbewegung. Dort sind auch kaum Wirbel zu erkennen. Dies ist sicher auch ein Hinweis auf die Stabilität der Grenzschicht.

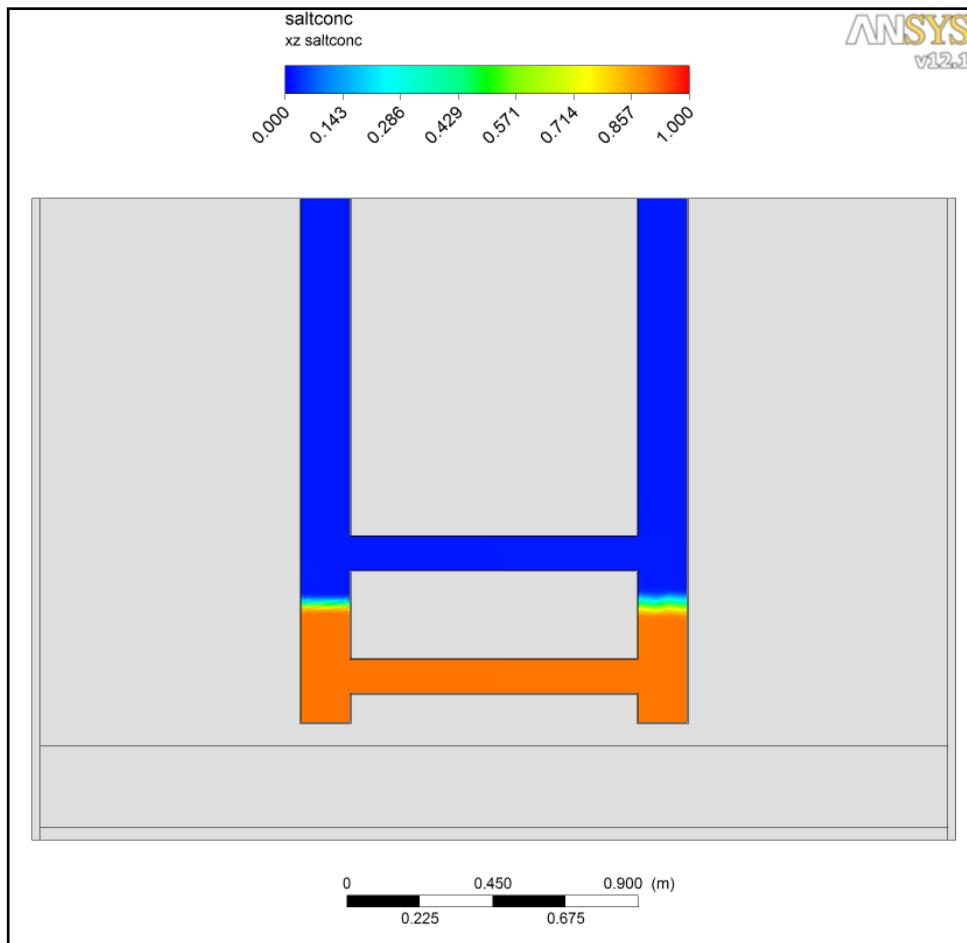


Abbildung 111: Variante 1 – Salinität zum Zeitpunkt 348 h

Die Salinität in der Rohrleitung zum Zeitpunkt 348 h ist in Abbildung 111 dargestellt. Im unteren Viertel der Rohrleitung und somit auch in der unteren Sohle befinden sich die höher mineralisierten Wässer. Die Schichtgrenze zwischen höher- und niedrig-mineralisiertem Wasser verläuft annähernd konstant mittig zwischen der oberen und unteren Sohle. Eine langsame Tendenz zur Aussüßung kann aber erkannt werden.

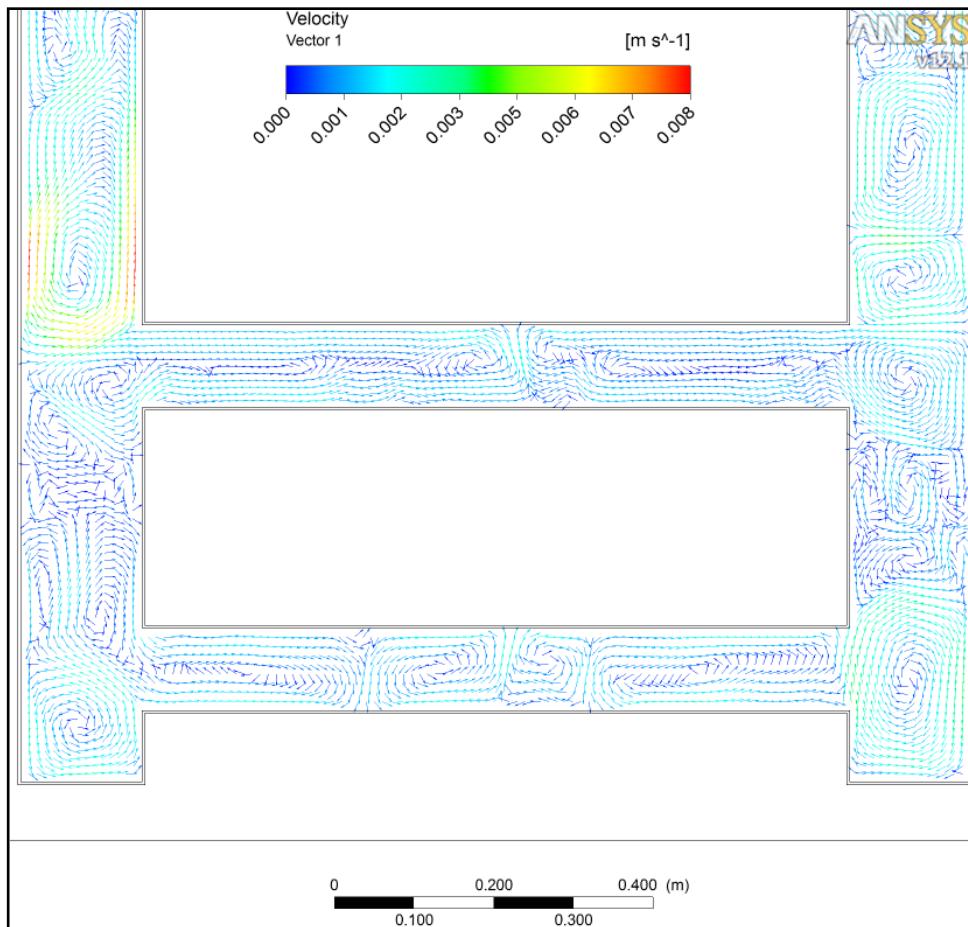


Abbildung 112: Variante 1 – Strömungsvektoren zum Zeitpunkt 348 h

In Abbildung 112 sind Strömungsvektoren in den Schächten und Sohlen zum Zeitpunkt 348 h dargestellt. Im gesamten Fluidbereich kommt es zur Ausbildung von wirbelartigen Kreisströmungen. Darüber hinaus führt der Dichteunterschied zwischen höher und niedrig mineralisiertem Wasser zur Ausbildung von grenzschichtartigen Strömungsverhältnissen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Modellierung der isolierend wirkenden PE-Platten und Schachtwandungen des Versuchsstandes lediglich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Modellergebnisse hat. Hinsichtlich der Temperaturverläufe ist ein quantitativ vergleichbarer Verlauf der Modellergebnisse zu den Messwerten unabhängig von der Abbildung der Isolierungen feststellbar. Zur quantitativen Annäherung an die im Versuch ermittelten Temperaturverläufe ist zu überlegen, welche Randbedingungen des Versuchsstandes nicht exakt erfasst wurden und somit nicht durch das Modell berücksichtigt werden können. Weiterhin kann die Abweichung der Modell- von den Versuchsergebnissen auf ver-

schiedene Arten des Wärmetransports, wie z. B. das Auftreten von Konvektion im Sand-Wasser-Gemisch, die durch das bestehende Modell nicht berücksichtigt werden, zurückgeführt werden. Zur Erfassung und Quantifizierung dieser Effekte wäre eine Anpassung des Versuchsaufbaus notwendig. Hierbei sollte die Temperaturverteilung im Bereich des Sand-Wasser- sowie Kies-Wasser-Gemischs mit dem Fluidbereich entsprechenden Güte erfasst werden. Im Besonderen gilt dies für die Temperaturverteilung über die Modellhöhe. Hierzu wurde u.a. die im vorhergehenden Kapitel 4.3 dokumentierten Modellrechnungen mit FEFLOW durchgeführt.

#### 4.4.3 Modellrechnungen zu Schichtungsversuch V5

Auch der Versuch V5 wurde in 2 Varianten (Variante 2.1 und 2.2) gerechnet, die sich in der Festlegung einzelner Modellparameter unterscheiden (vgl. Tabelle 10, S. 136). Der prinzipielle Aufbau ist jedoch gleich und kann der Abbildung 96 (S. 137) entnommen werden. Der untere Bereich der Rohrleiter ist wieder mit Salzwasser (roter Bereich) und der obere Bereich mit Süßwasser (blauer Bereich) erfüllt, so dass eine Unterschichtung bis etwa zur Mitte zwischen den beiden Sohlen vorherrscht. Die Temperatur der Heizplatte wurde wieder konstant mit 25 °C angesetzt. Bei dem Schichtungsversuch V5 wurde zwar die anfänglich konstante Heiztemperatur von 25 °C nach 32 Tagen in Stufen von 1 °C alle 7 Tage bis auf 30 °C erhöht, die Simulationen erreichten diesen Zeitpunkt jedoch nicht - insofern ist das Ansetzen einer konstanten Heiztemperatur in den Simulationen richtig (vgl. Abbildung 119, S. 155). Anders als bei V2 wurde in V5 auf Höhe der oberen Sohle ein Süßwasserzulauf mit einer Rate von 0,6 L/min in Schacht A und ein entsprechender Ablauf in Schacht B berücksichtigt. Die Außen- und Zulauftemperatur wurde analog dem Umgebungsmonitoring angesetzt. Für jede Variante wurden jeweils die Temperatur und die Salzkonzentration ausgewertet und nachfolgend dargestellt.

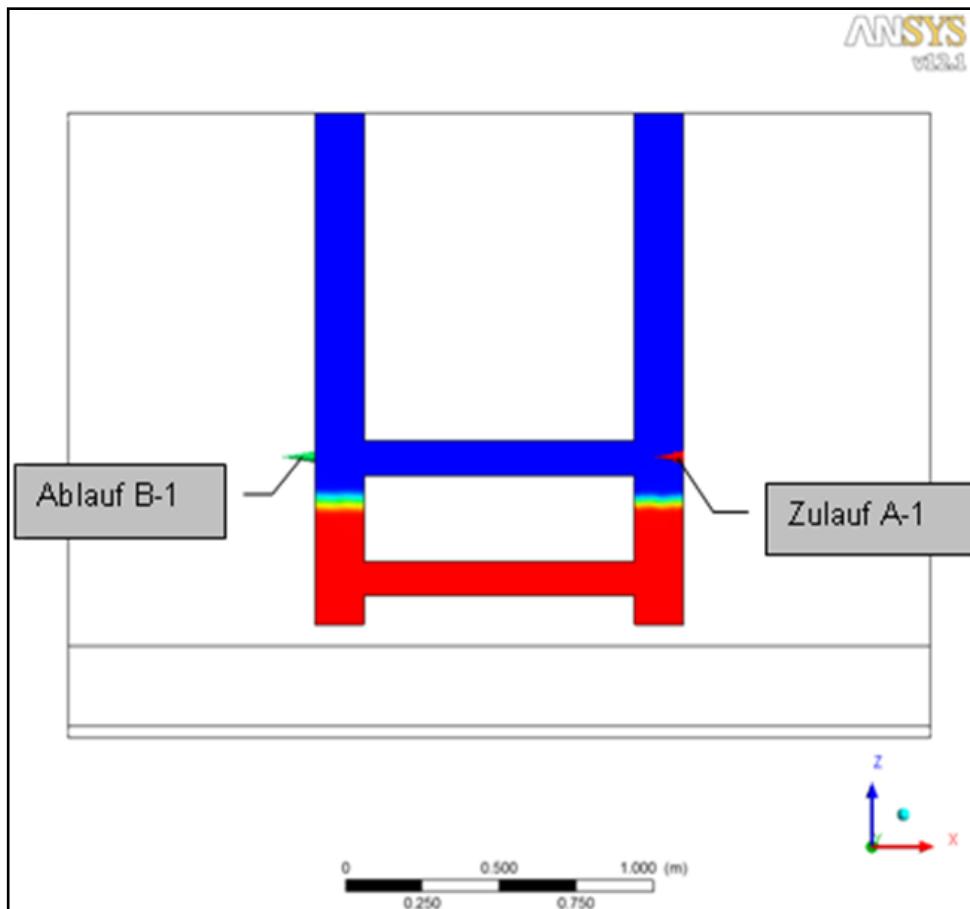


Abbildung 113: Randbedingungen – Versuch V5

Abbildung 114 und Abbildung 115 zeigen die Salzkonzentration der Varianten 2.1 und 2.2. Beide Varianten zeigen qualitativ ähnliche Verläufe der Ganglinien im Vergleich zu den Messwerten (Abbildung 116), jedoch erfolgt die Vermischung im Modell bei beiden Varianten zu früh. Die Abweichung ist ggf. auf die durch die 2D-Modellierung hervorgerufene Abbildung des Zulaufs über die gesamte „Schachtbreite“ zurückzuführen. Dies zieht einen hohen Einfluss des Impulses auf die Schichtung nach sich. Durch eine 3D-Modellierung wäre eine weitere Annäherung möglich.

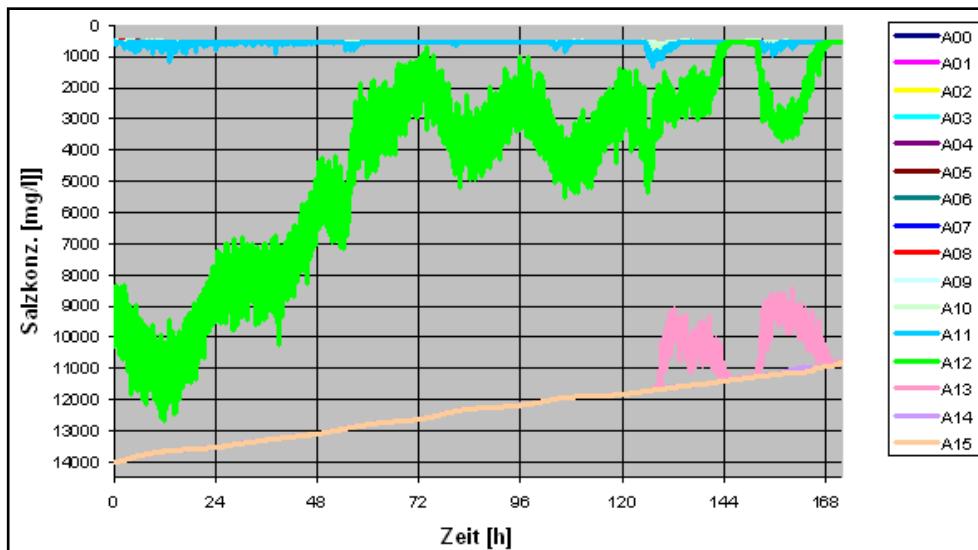


Abbildung 114: V5 Variante 2.1 – Salzkonzentration über die Zeit in Schacht A

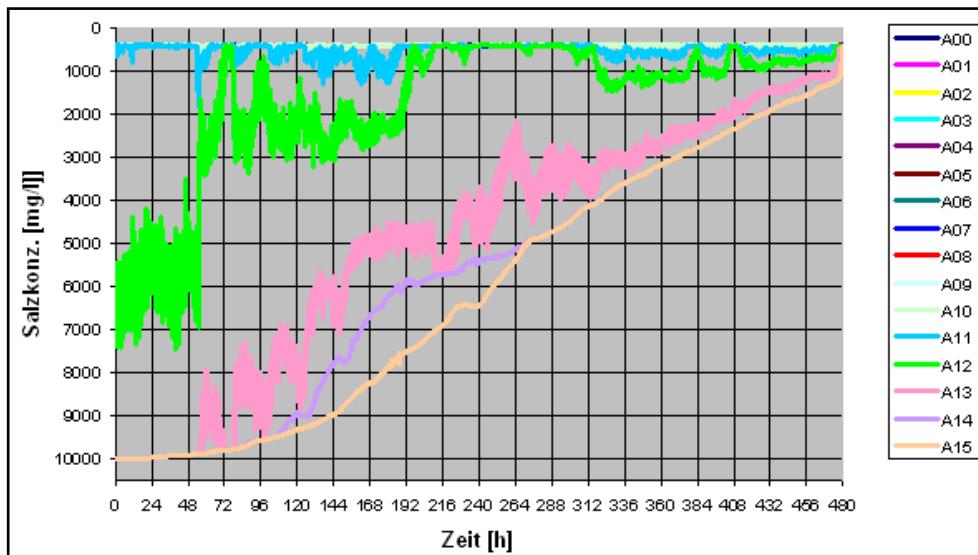


Abbildung 115: V5 Variante 2.2 – Salzkonzentration über die Zeit in Schacht A

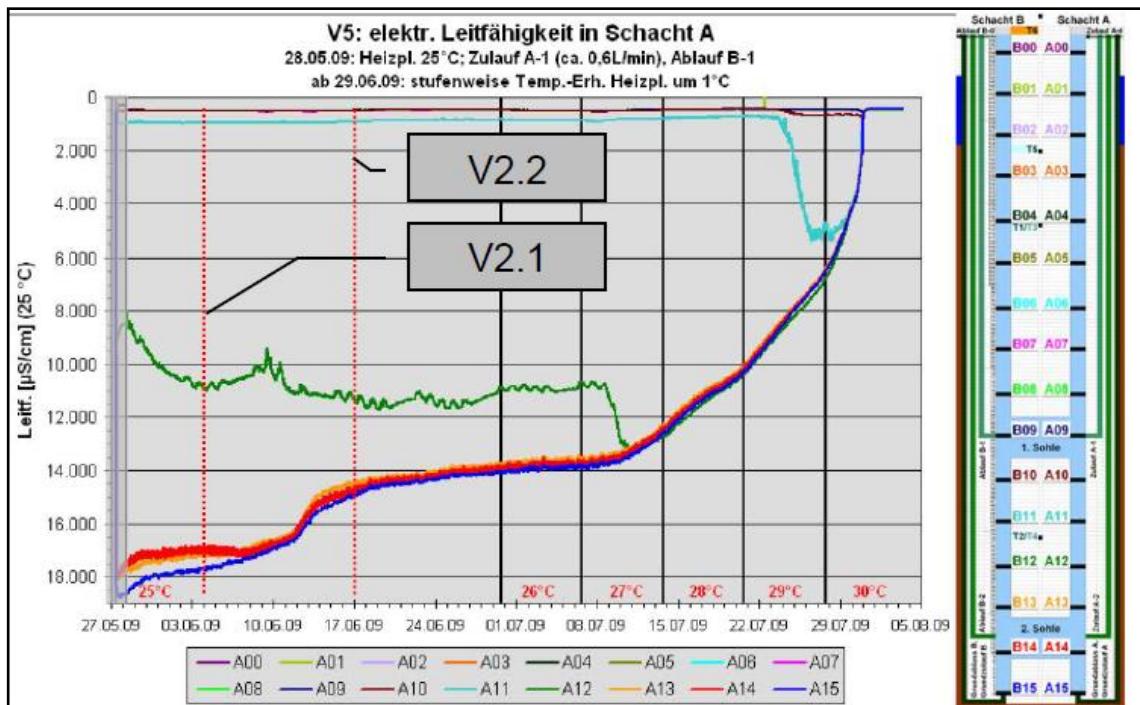


Abbildung 116: Messwerte zu V5 – elektr. Leitfähigkeit in Schacht A

Abbildung 117 und Abbildung 118 zeigen die vom Modell berechneten Temperaturen im Schacht A in den Varianten 2.1 und 2.2. Sie zeigen in den Ganglinien einen annähernd identischen Lauf mit den Messwerten (Abbildung 117, Abbildung 119). In Variante 2.2 machen sich die Einflüsse der kälteren Umgebungstemperatur im Vergleich zu den Einflüssen der Heizplatte etwas bemerkbar. Dies führt insbesondere für die tieferen Partien der Rohrleiter zu einer geminderten Erwärmung und kann ggf. durch die Abbildung isolierender PE-Außenwände beschränkt werden.

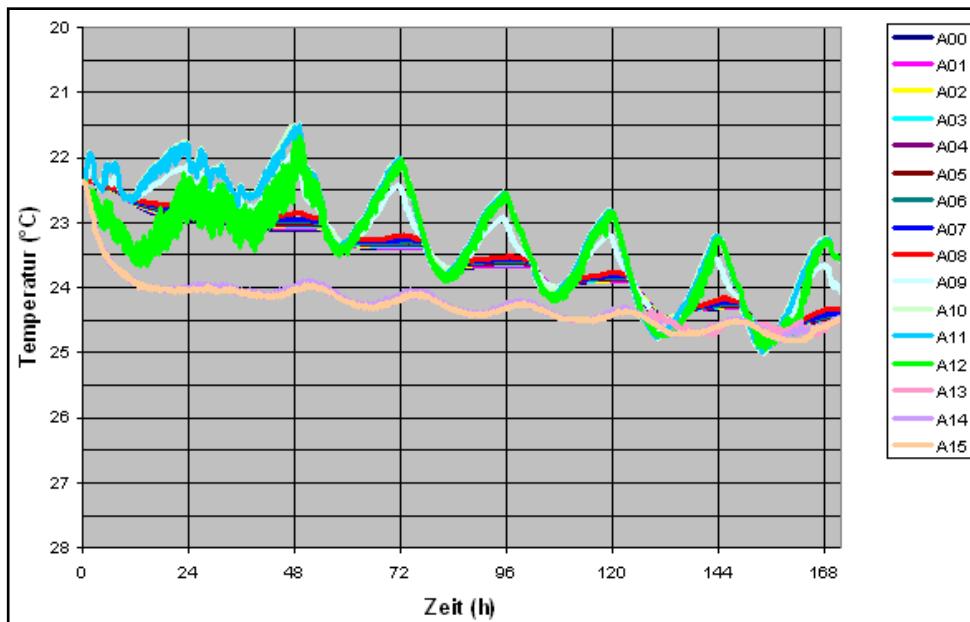


Abbildung 117: V5 Variante 2.1 – Temperatur über die Zeit in Schacht A

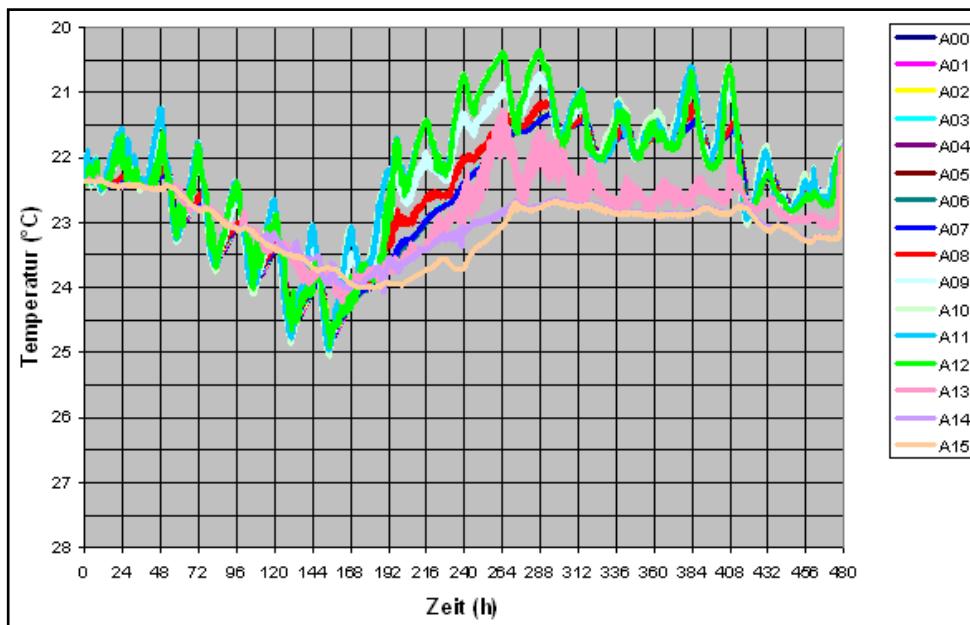


Abbildung 118: V5 Variante 2.2 – Temperatur über die Zeit in Schacht A

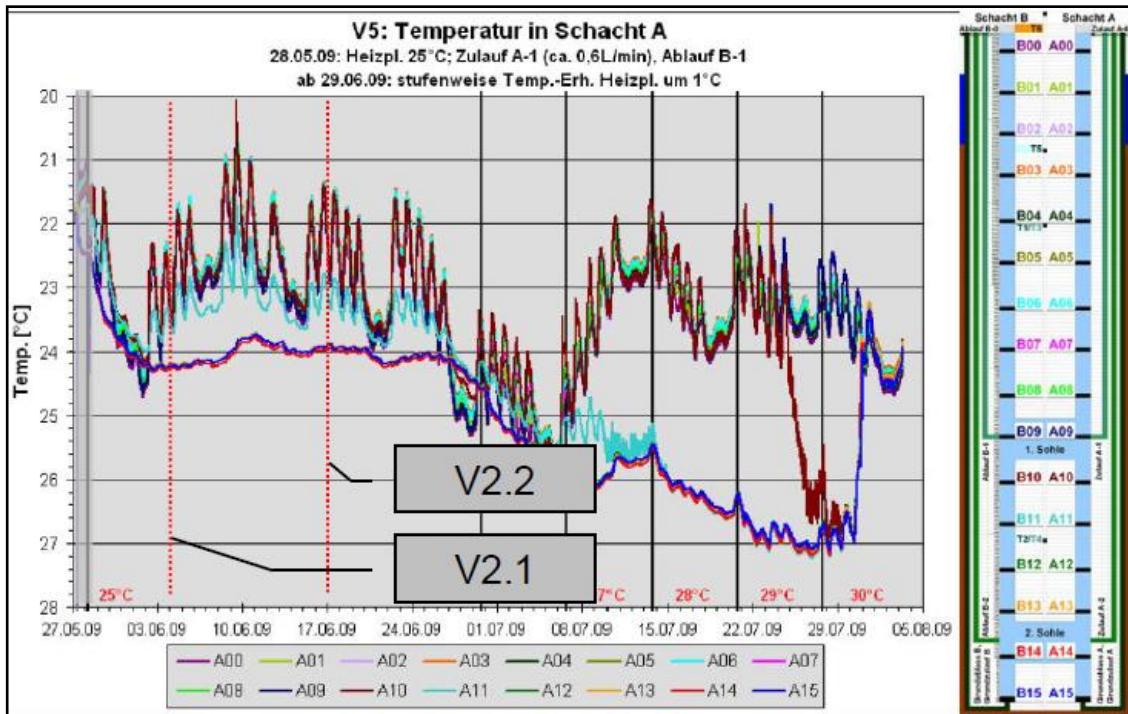


Abbildung 119: Messwerte zu V5 – Temperatur in Schacht A

## 4.5 Umsetzung ins Boxmodell

Das physikalische Modell (neuer Technikumsversuch) wurde mittels Boxmodell nachgebildet. Einige der Versuchsdurchführungen wurden nachträglich mittels Boxsimulations abgebildet. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden erläutert.

### 4.5.1 Ausgangsdaten und Modellaufbau

Die modelltechnischen Maße für die Simulation lehnen sich eng an die Vorüberlegungen für den Technikumsversuch an (Abbildung 120):

- Der Innendurchmesser der Schächte (Vollrohr) beträgt 178 mm (0,178 m).
- Dies entspricht einer Fläche von  $0,024885 \text{ m}^2$ .
- Für das Quadrat der Box ergibt das eine Seitenlänge von je 0,158 m.
- Die Schachthöhe beträgt 1,6 m, unterteilt in 16 Boxen (Scheiben) mit je 0,1 m Höhe.

- Das Hohlraumvolumen je Box/Scheibe beträgt  $0,0024964 \text{ m}^3$  ( $0,158 \text{ m} \cdot 0,158 \text{ m} \cdot 0,1 \text{ m}$ ).
- Der Leakage-Faktor ist mit dem Wert 0, der  $k_f$ -Wert mit  $1\text{e-}9 \text{ m/s}$  und die Porosität mit  $1\text{e-}6$  belegt.
- Die Boxen (Schächte) sind vertikal mit 15 Verbindungen vom Typ 3 (Rohr) verbunden (Rauigkeit 5 mm, Koeff. 1 = 0,1973 / Koeff. 2 = 0,5).
- Die horizontalen Verbindungen (2 Strecken) sind ebenfalls als Verbindungstyp 3 (Rohr) nachgebildet, sie liegen im z-Niveau 0,15 m (15. Modellscheibe) und 0,65 m (10. Modellscheibe) und werden 0,8 m lang abgebildet (Rauigkeit 5 mm, Koeff. 1 = 0,0446 / Koeff. 2 = 0,5).
- Der Wasserspiegel ist im rechten Schacht mit 1,60 m als Festpotential vorgegeben.
- Die Speisungsmenge im linken Schacht beträgt 1 L/min ( $0,001 \text{ m}^3/\text{min}$ ) oder 10 L/min ( $0,01 \text{ m}^3/\text{min}$ ).

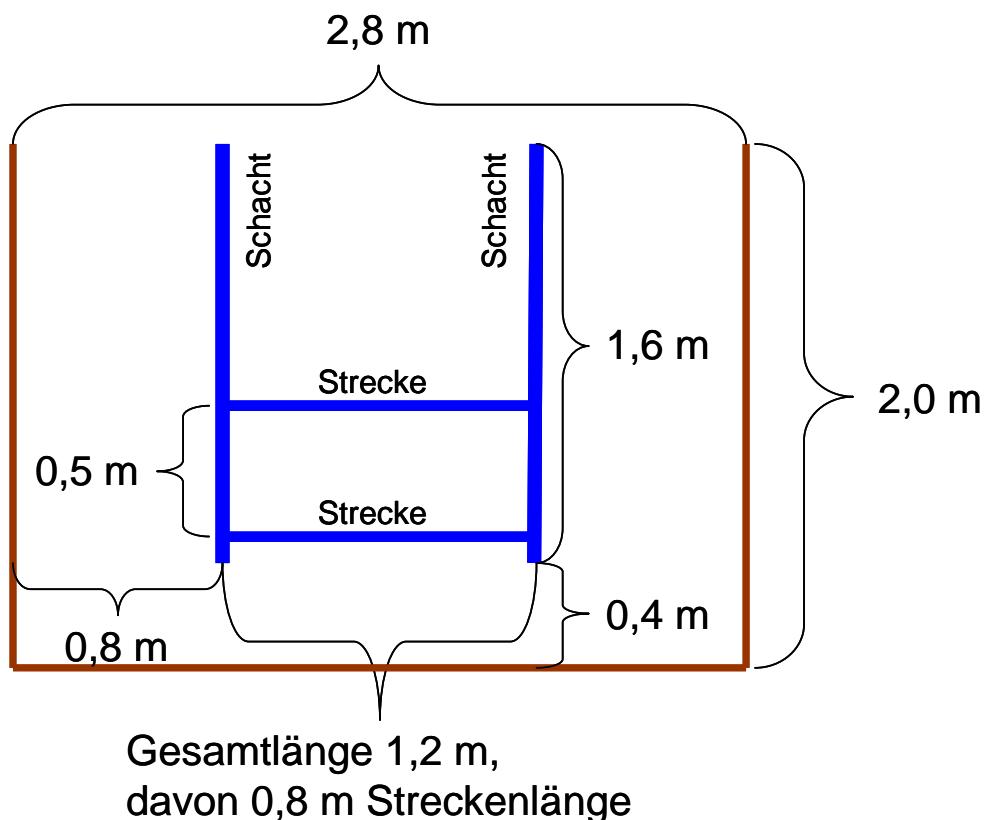


Abbildung 120: Prinzipieller Aufbau neuer Technikumsversuch (Seitenansicht)

Abbildung 121 und Abbildung 122 zeigen schematisch den prinzipiellen Modellaufbau in zwei verschiedenen Ansichten. Die Wasserspiegel werden in „m NN“ angegeben, wobei „NN“ die Unterkante der untersten Scheibe ist.

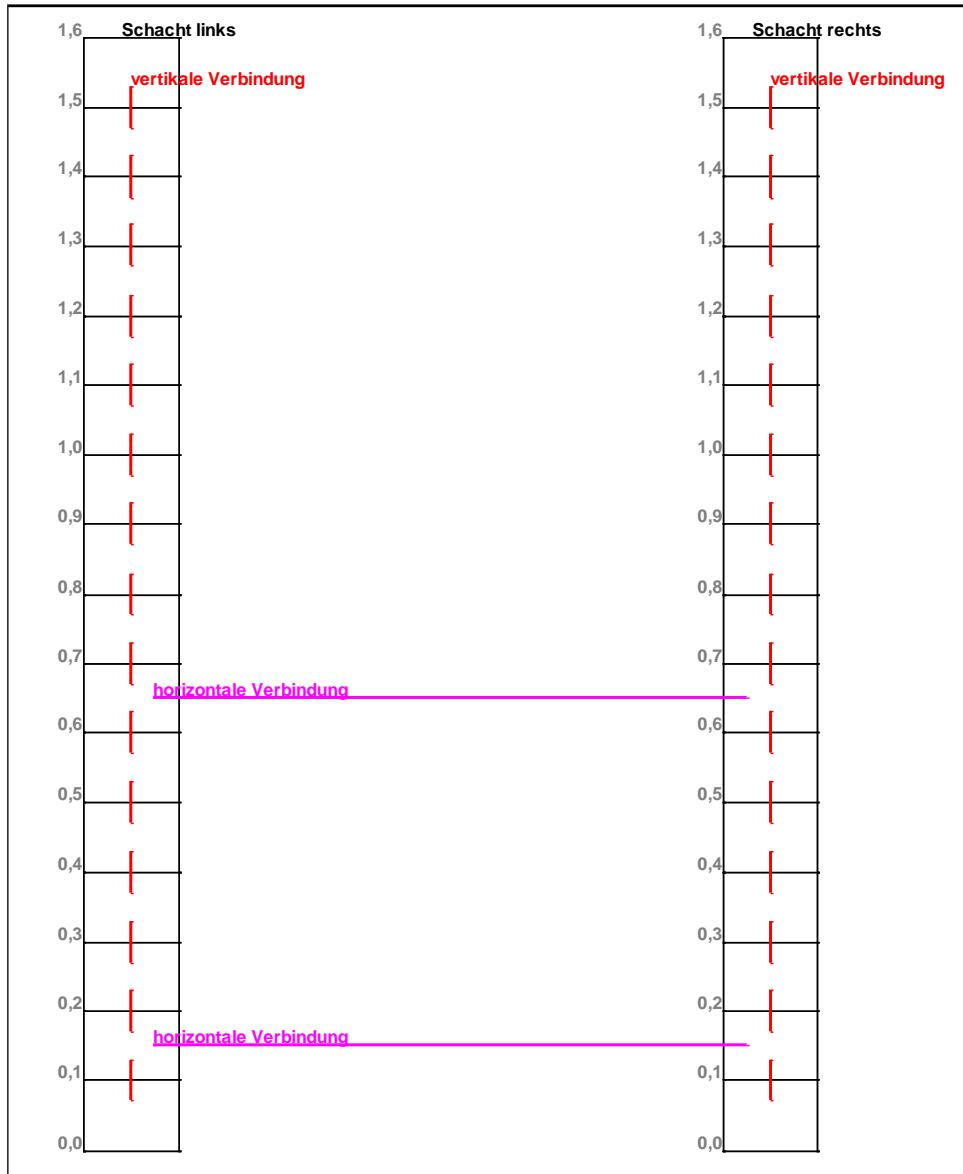


Abbildung 121: Seitenansicht Boxmodell - 16 Scheiben (Höhenangaben in m)

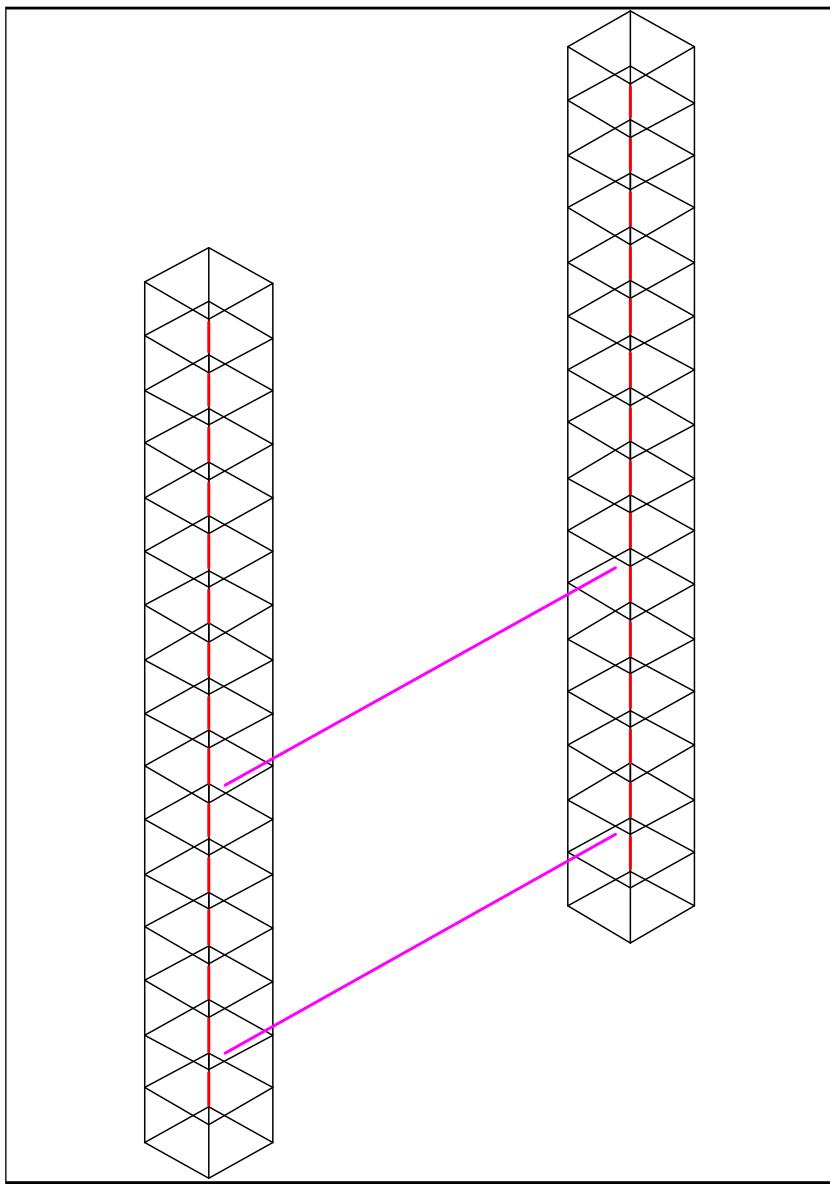


Abbildung 122: Perspektivische Ansicht Boxmodell - 16 Scheiben

#### 4.5.2 Voruntersuchungen

##### 4.5.2.1 Strömungsmodell – stationärer Zustand

Ermittlung der Koeffizienten für die Verbindungen Typ 3:

Annahme einer Rauhigkeit von 5 mm in den Rohren, Berücksichtigung der Rohrkrümmung:

### 15 vertikale Verbindungen (Gesamtlänge 1,6 m):

Koeffizient 1 = 0,1973 / Koeffizient 2 = 0,5 (NW 178 mm, L = 0,10666667 m)

### 2 horizontale Verbindungen:

Koeffizient 1 = 0,0446 / Koeffizient 2 = 0,5

Streckenlänge 0,8 m (Nennweite der Rohrleitung 103 mm, 2 Stahlbögen mit je 1 m [stellvertretend für Rauhigkeit/Krümmungen]) → Neue Streckenlänge 0,8 m + 2 m = 2,8 m

Die Abbildung 123 zeigt als Beispiel die Koeffizientenberechnung für die horizontalen Verbindungen.

**Z Form1**

**Rohrdurchströmung**

Durchmesser D [mm]	103		
Länge [m]	2.8		
Spiegeldifferenz dh [m]	3.908e-5		
Rauhigkeit ks [m]	0.005		
Rauhigkeitsbeiwert k-st [m <sup>1/3</sup> ]			
Stollen in rohem Felsausbruch: 28 - 35	90.0		
Stahlrohr: 90			
L1	0.0446 (L2 = 0,5)	L1_Strickler	0.0654
LW [m <sup>2</sup> ]	4.2665	LW_Strickler	6.2513
Q [m <sup>3</sup> /s]	1.667E-04		
Q [m <sup>3</sup> /min]	1.000E-02	Q_Strickler [m <sup>3</sup> /min]	1.466E-02

Abbildung 123: Beispiel Koeffizientenberechnung - horizontale Verbindungen

Tabelle 12 und Tabelle 13 zeigen einen Vergleich zwischen den berechneten Wasserspiegeln im Boxmodell mit unterschiedlichen Einleitmengen (1 L/min und 10 L/min). Jeweils im Anschluss einer Tabelle werden die fließenden Volumenströme für die obere und untere horizontale Verbindung ausgewiesen.

Tabelle 12: Wasserspiegel und Differenzen im stationären Zustand (Einspeisungsmenge 1 L/min)

Scheibe	Wasserspiegel [mNN] und berechnete Differenzen [m]				
	WSP	Differenz	WSP	Differenz	Differenz links - rechts
	Schacht links	Schacht links	Schacht rechts	Schacht rechts	
1	1,60001678		1,60001667		0,00000011
2	1,60001678	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000011
3	1,60001678	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000011
4	1,60001678	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000011
5	1,60001678	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000011
6	1,60001678	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000011
7	1,60001677	0,00000001	1,60001667	0,00000000	0,00000010
8	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
9	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
10	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
11	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
12	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
13	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
14	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
15	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010
16	1,60001677	0,00000000	1,60001667	0,00000000	0,00000010

Volumenstrom obere Strecke: **0,50242 L/min**

Volumenstrom untere Strecke: **0,49758 L/min**

Tabelle 13: Wasserspiegel und Differenzen im stationären Zustand (Einspeisungsmenge 10 L/min)

Scheibe	Wasserspiegel [mNN] und berechnete Differenzen [m]				
	WSP	Differenz	WSP	Differenz	Differenz
	Schacht links	Schacht links	Schacht rechts	Schacht rechts	
1	1,60017791		1,60016667		0,00001124
2	1,60017783	0,00000008	1,60016674	-0,00000008	0,00001109
3	1,60017776	0,00000008	1,60016682	-0,00000008	0,00001094
4	1,60017768	0,00000008	1,60016690	-0,00000008	0,00001079
5	1,60017761	0,00000008	1,60016697	-0,00000008	0,00001063
6	1,60017753	0,00000008	1,60016705	-0,00000008	0,00001048
7	1,60017745	0,00000008	1,60016712	-0,00000008	0,00001033
8	1,60017738	0,00000008	1,60016720	-0,00000008	0,00001018
9	1,60017730	0,00000008	1,60016728	-0,00000008	0,00001002
10	1,60017722	0,00000008	1,60016735	-0,00000008	0,00000987
11	1,60017720	0,00000002	1,60016737	-0,00000002	0,00000983
12	1,60017719	0,00000002	1,60016739	-0,00000002	0,00000979
13	1,60017717	0,00000002	1,60016741	-0,00000002	0,00000976
14	1,60017715	0,00000002	1,60016743	-0,00000002	0,00000972
15	1,60017713	0,00000002	1,60016745	-0,00000002	0,00000968
16	1,60017713	0,00000000	1,60016745	0,00000000	0,00000968

Volumenstrom obere Strecke: **5,02420 L/min**

Volumenstrom untere Strecke: **4,97580 L/min**

Die Wasserspiegel der beiden Schächte zeigen nur minimale Unterschiede auf. Ebenso verteilt sich der Volumenstrom ohne Dichteschichtungseffekte fast gleichmäßig auf beide Strecken. Das der „Volumenstrom untere Strecke“ geringfügig kleiner ist, lässt sich dadurch erklären, dass der Strömungsweg durch den tiefen Bereich etwas länger ist und ein leichter Zusatzwiderstand durch die Schächte bis zum Erreichen der unteren Strecke hinzukommt. Die Verzehnfachung der Einspeisungsmenge führt zur entsprechenden Erhöhung der Volumenströme ohne die Anteile beider Strecken zu verändern. Die gewählten Koeffizienten sind somit passend für das Modell.

#### 4.5.2.2 Testen der Durchbruchskurve

Es soll ein Vergleich zwischen analytischer und modelltechnischer Lösung aufgezeigt werden. Folgende Ausgangsparameter werden für die Modellrechnung angenommen:

- bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 1 L/min
- Einspeisung Sulfat 1 mg/L im linken Schacht

##### Analytische Lösung:

Einleitmenge  $Q = 0,001 \text{ m}^3/\text{min}$  (1 L/min)

Schachtlänge = 1,60 m (1,45 m bis zur unteren Strecke bzw. Verbindung)

Schachtfläche = 0,025 m<sup>2</sup>

Zeit = Volumen / Volumenstrom  $(t = V / Q)$

Schachtvolumen = Schachtlänge • Schachtfläche  $(V = l \cdot A)$

$$\text{Gl. 4-1: } V_{\text{ges}} = 2 \cdot 1,60 \text{ m} \cdot 0,025 \text{ m}^2 = 0,08 \text{ m}^3 \\ \text{(2 Schächte, Gesamtlänge)}$$

$$\text{Gl. 4-2: } V_{\text{wirk}} = 2 \cdot 1,45 \text{ m} \cdot 0,025 \text{ m}^2 = 0,0725 \text{ m}^3 \\ \text{(2 Schächte, Länge bis Beginn untere Strecke)}$$

Das Volumen unterhalb der unteren Strecke wird bei der Berechnung der Durchbruchszeit nicht mit berücksichtigt. Somit ergibt sich für die Variante, dass das Wasser nur durch die untere Strecke fließen kann, die folgende Lösung:

$$\text{Gl. 4-3: } t = 0,0725 \text{ m}^3 / 0,001 \text{ m}^3/\text{min} = \underline{72,5 \text{ min}}$$

##### Modellergebnis:

Vergleich der Varianten mit 2 Verbindungen oben und unten, mit nur einer Verbindung oben und nur einer Verbindung unten.

Das Modellergebnis (Abbildung 124) zeigt, dass bei der Variante „Verbindung unten“ (blaue Kurve) das berechnete Ergebnis hinreichend reprodu-

ziert werden kann. Das Ergebnis der analytischen Lösung wird durch die gestrichelte schwarze Linie dargestellt.

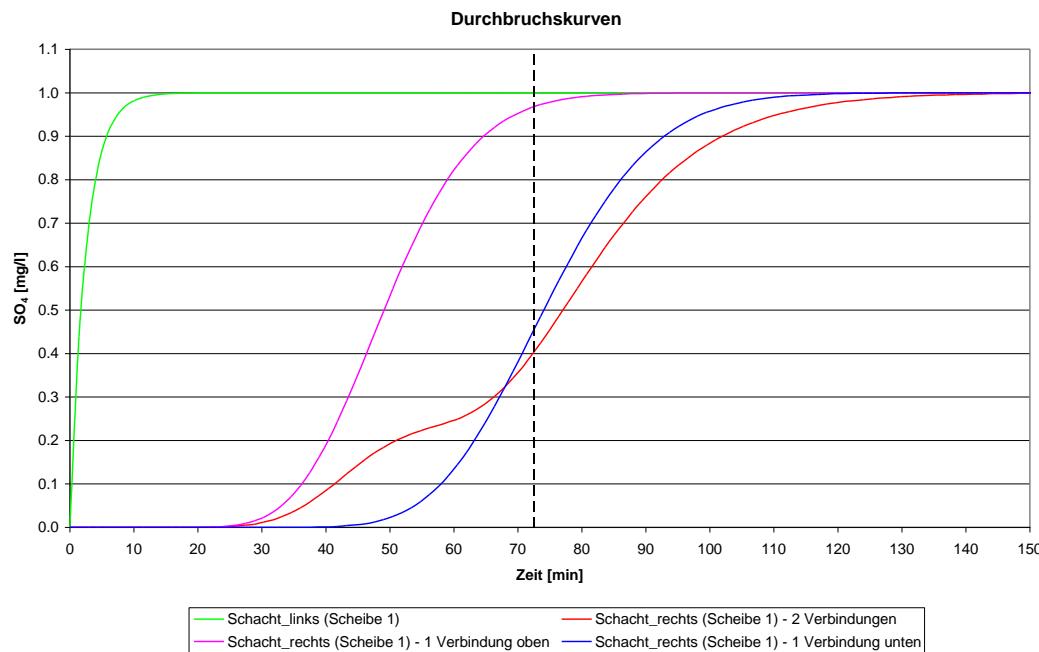


Abbildung 124: Durchbruchskurven (analytische Lösung: gestrichelte schwarze Linie)

#### 4.5.2.3 Dichteströmung

Im Folgenden werden fünf Varianten berechnet:

- Var. 0: Basistest instationäre Rechnung mit unterschiedlicher Dichte im linken und rechten Schacht ohne Stofftransport
- Var. 1: Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte ohne Stofftransport
- Var. 2: Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte mit Stofftransport
- Var. 3: Instationäre Rechnung mit gleicher Dichte in den Modellscheiben 1 bis 12 und erhöhter Dichte in den Modellscheiben 13 bis 16
- Var. 4: Schrittweise Veränderung der Dichteunterschiede im oberen und unteren Teil des Modells, beginnend mit gleicher Dichte

#### 4.5.2.3.1 Variante 0

Basistest instationäre Rechnung mit unterschiedlicher Dichte im linken und rechten Schacht ohne Stofftransport.

Es soll die Wirkung unterschiedlicher Konzentrationen im linken und rechten Schacht auf den Wasserspiegel im Modell untersucht werden. Dafür wurden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

- 1. bis 16. Modellscheibe linker Schacht: 0 mg/L Chlorid Startkonzentration
- 1. bis 16. Modellscheibe rechter Schacht: 10.0000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- die obere Verbindung wurde entfernt
- Speisungsmenge 0 L/min (im Modell kann nichts fließen)

Tabelle 14, Abbildung 125 und Abbildung 126 zeigen die Ergebnisse.

Tabelle 14: Variante 0: Vergleich Dichte, Wasserspiegel und Differenzen

Modell- scheibe	Dichte [g/l]		h [mNN]		Differenz h [m]
	Schacht links	Schacht rechts	Schacht links	Schacht rechts	
1	999,701	1078,54	1,70706866	1,59999947	0,10706919
2	999,701	1078,54	1,70690461	1,60748320	0,09942141
3	999,701	1078,54	1,70674057	1,61496696	0,09177361
4	999,701	1078,54	1,70657652	1,62245071	0,08412581
5	999,701	1078,54	1,70641247	1,62993446	0,07647801
6	999,701	1078,54	1,70624842	1,63741821	0,06883021
7	999,701	1078,54	1,70608437	1,64490197	0,06118241
8	999,701	1078,54	1,70592033	1,65238572	0,05353461
9	999,701	1078,54	1,70575628	1,65986947	0,04588681
10	999,701	1078,54	1,70559223	1,66735323	0,03823900
11	999,701	1078,54	1,70542818	1,67483698	0,03059120
12	999,701	1078,54	1,70526413	1,68232073	0,02294340
13	999,701	1078,54	1,70510009	1,68980448	0,01529560
14	999,701	1078,54	1,70493604	1,69728824	0,00764780
15	999,701	1078,54	1,70477199	1,70477199	0,00000000
16	999,701	1078,54	1,70460794	1,71225574	-0,00764780

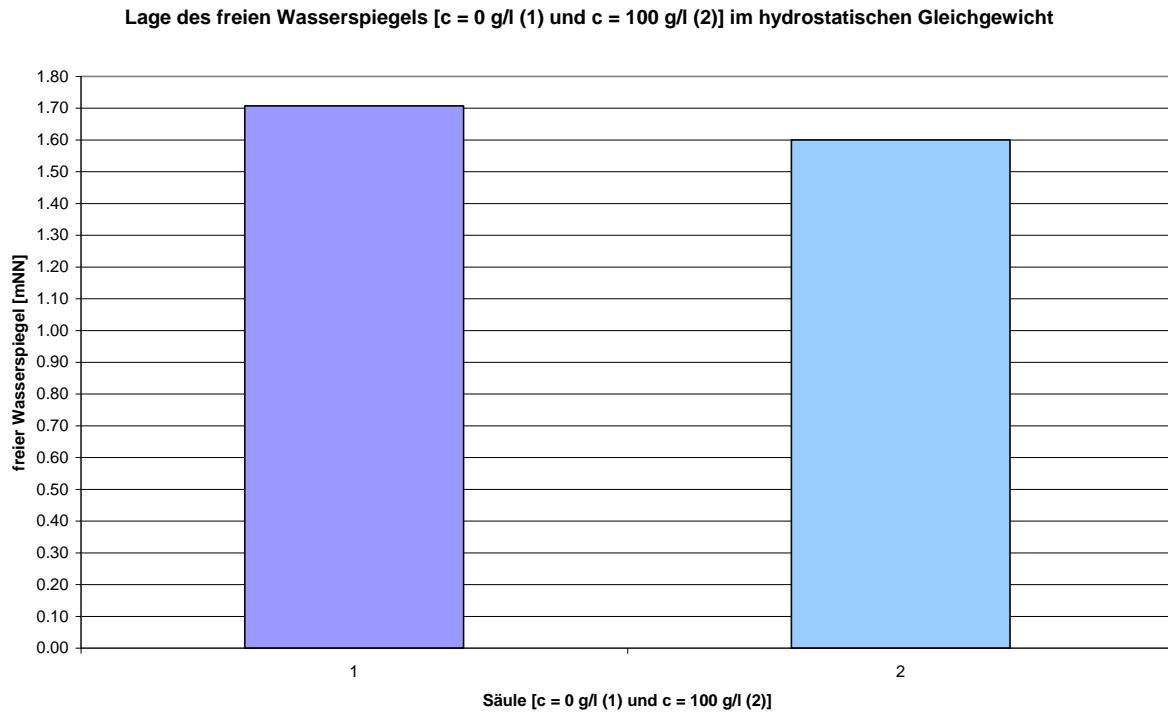


Abbildung 125: Variante 0: Lage freier Wasserspiegel im hydrostatischen Gleichgewicht

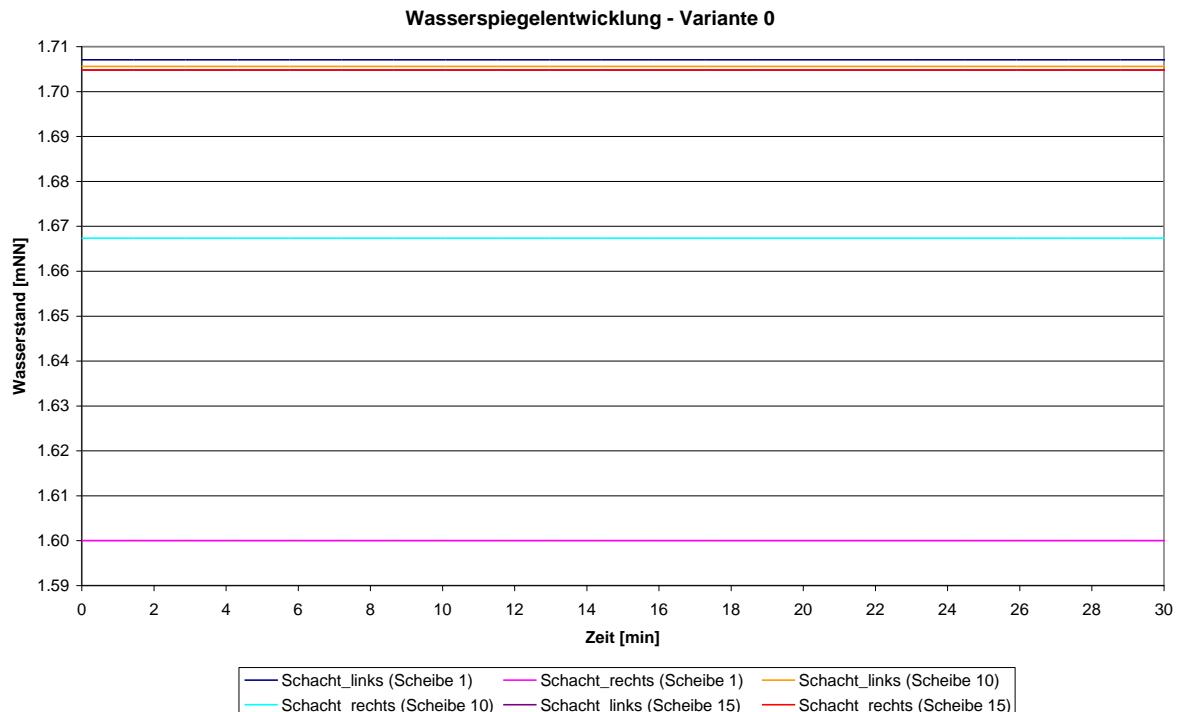


Abbildung 126: Variante 0: Wasserspiegelentwicklung

#### 4.5.2.3.2 Variante 1

Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte ohne Stofftransport:

Bei Variante 1 soll gezeigt werden, dass das Modell die Dichteströmung bilanztreu umsetzen kann. Dazu werden in allen Modellscheiben die gleichen Ausgangskonzentrationen für Chlorid vorgegeben. Es wird nur mit Dichteströmung, aber ohne Stofftransport gerechnet. Es werden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

- 1. bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 1 L/min

Als Ergebnis dieser Modellrechnung kann man festhalten, dass das Modell realistische Ergebnisse liefert (Abbildung 127 bis Abbildung 129).

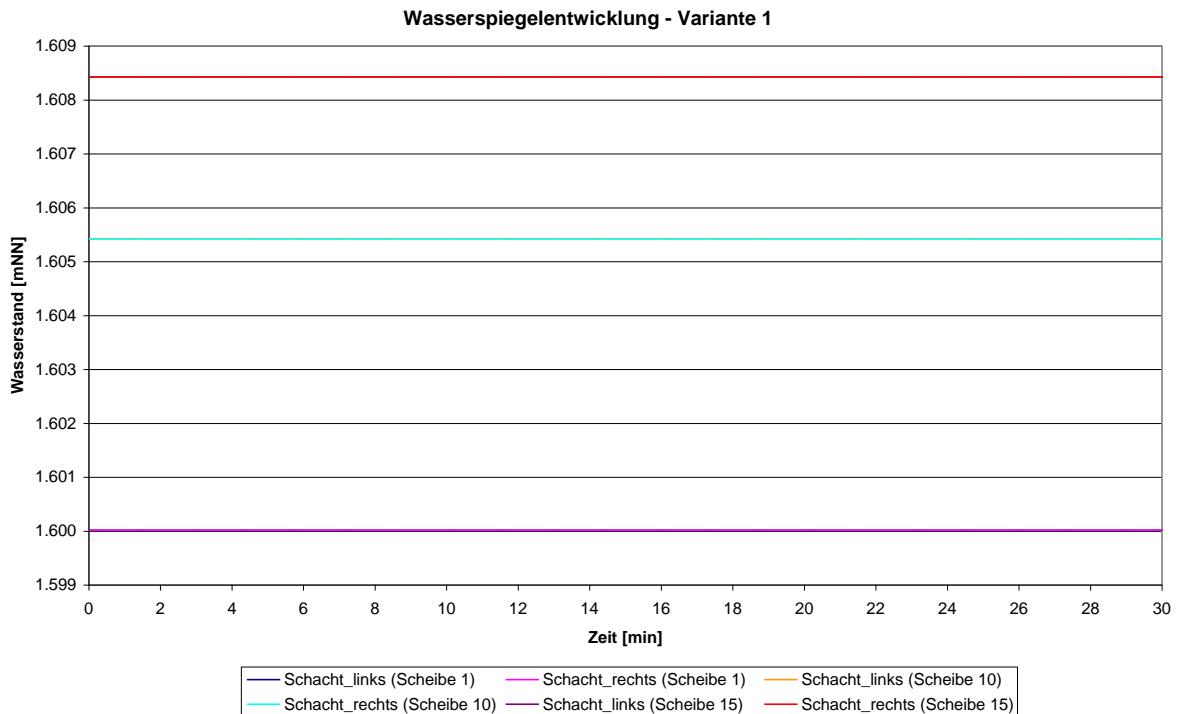


Abbildung 127: Variante 1: Wasserspiegelentwicklung

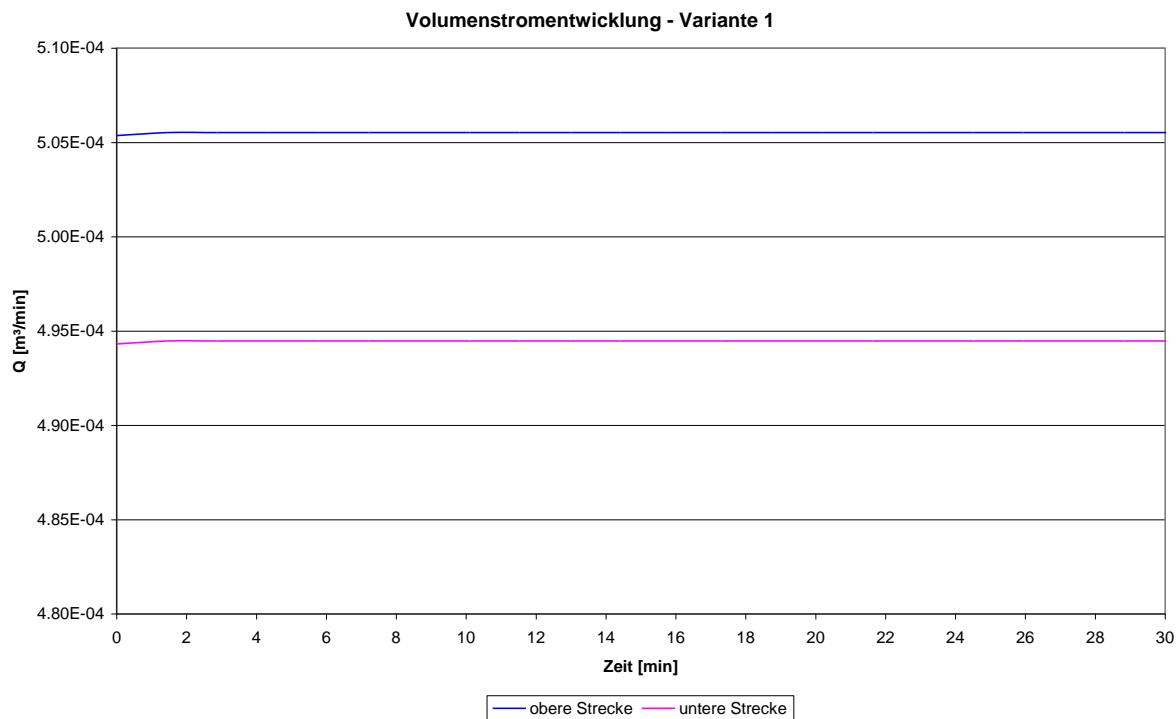


Abbildung 128: Variante 1: Volumenstromentwicklung

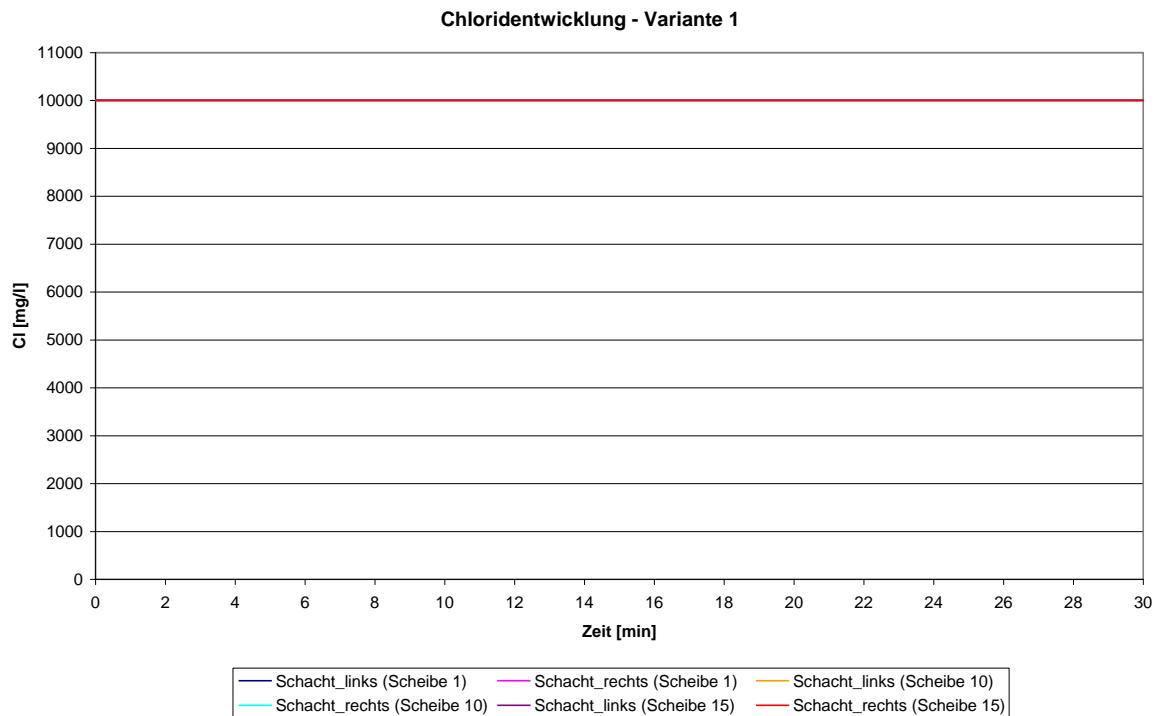


Abbildung 129: Variante 1: Chloridentwicklung

#### 4.5.2.3.3 Variante 2

Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte mit Stofftransport:

Ziel dieser Untersuchung ist es, im Vergleich zur vorhergehenden Variante 1 aufzuzeigen, dass die Dichteströmung mit Stofftransport zum gleichen Modellergebnis wie ohne Stofftransport kommt. Es gelten die gleichen Ausgangsparameter wie bei Variante 1.

- 1. bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 1 L/min

Da Variante 2 die gleichen Ergebnisse wie die Variante 1 erzielt, kann man schlussfolgern, dass das Modell auch mit Stofftransport realistische Ergebnisse erzielt (Abbildung 130 bis Abbildung 132).

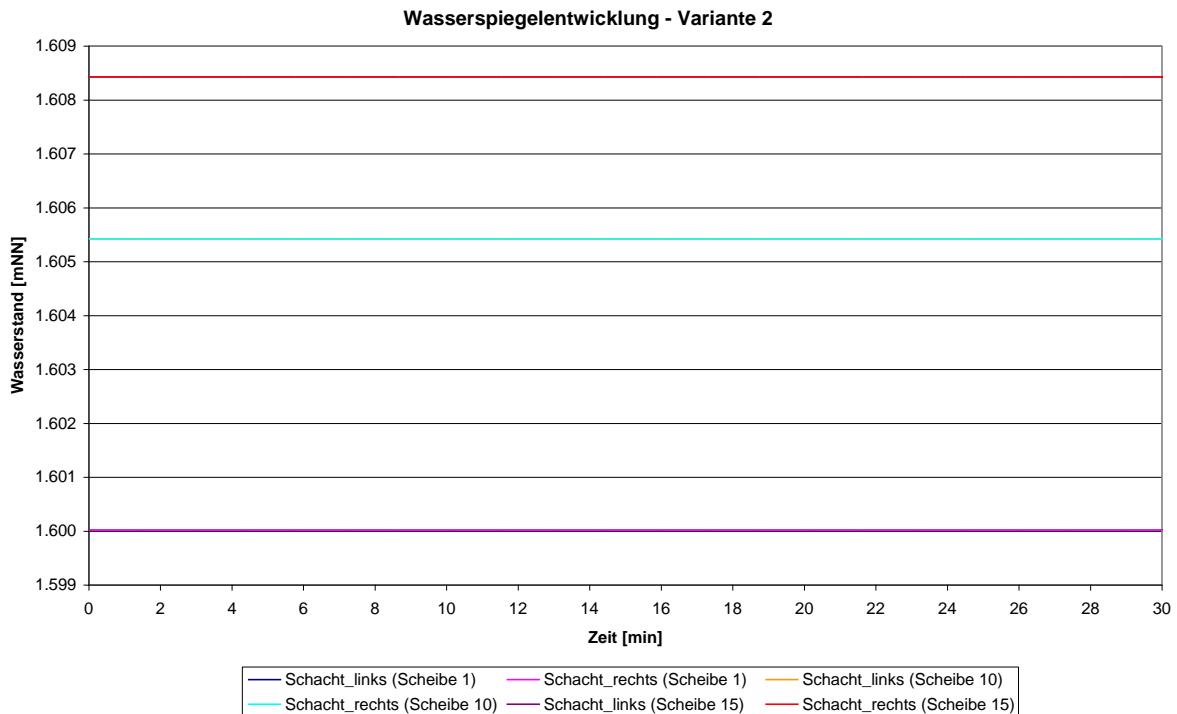


Abbildung 130: Variante 2: Wasserspiegelentwicklung

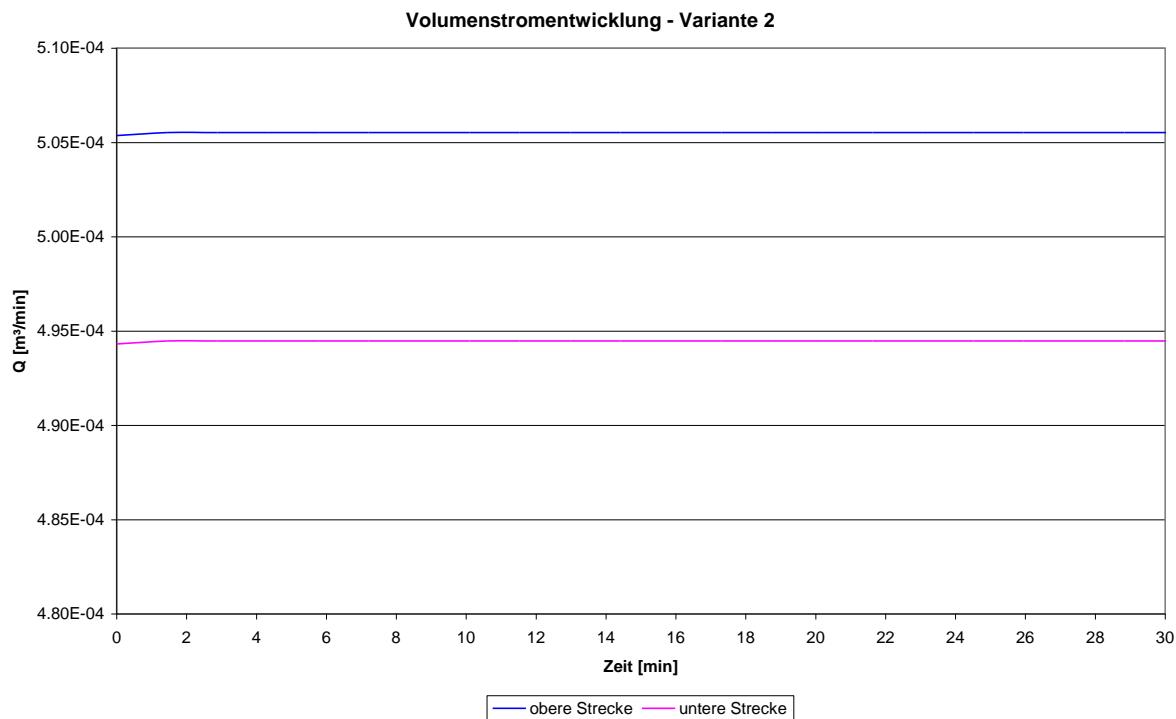


Abbildung 131: Variante 2: Volumenstromentwicklung

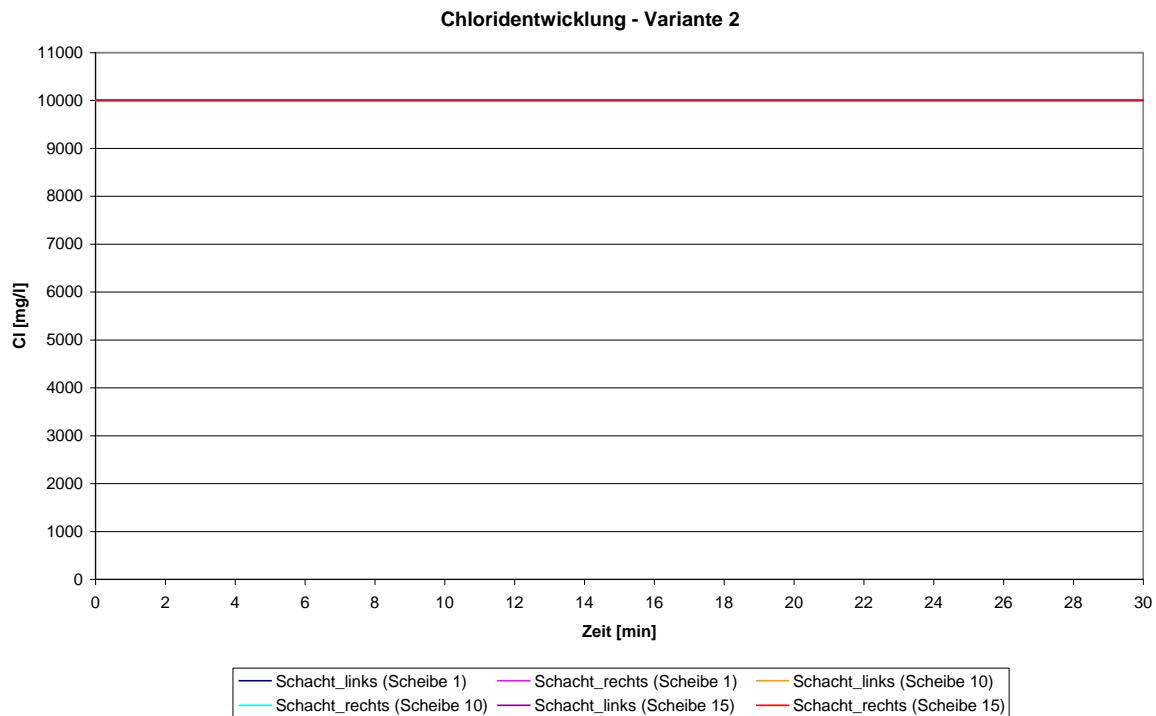


Abbildung 132: Variante 2: Chloridentwicklung

#### 4.5.2.3.4 Variante 3

Instationäre Rechnung mit gleicher Dichte in den Modellscheiben 1 bis 12 und erhöhter Dichte in den Modellscheiben 13 bis 16:

Mit Variante 3 soll die Wirkung unterschiedlicher Konzentrationen im oberen und unteren Teil des Modells untersucht werden. Dafür wurden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

- 1. bis 12. Modellscheibe 1.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- 13. bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 1 L/min

Es zeigt sich, dass bei diesem hohen Dichteunterschied von 9.000 mg/L von Beginn an die gesamte eingespeiste Wassermenge durch die obere Verbindung fließt (Abbildung 134).

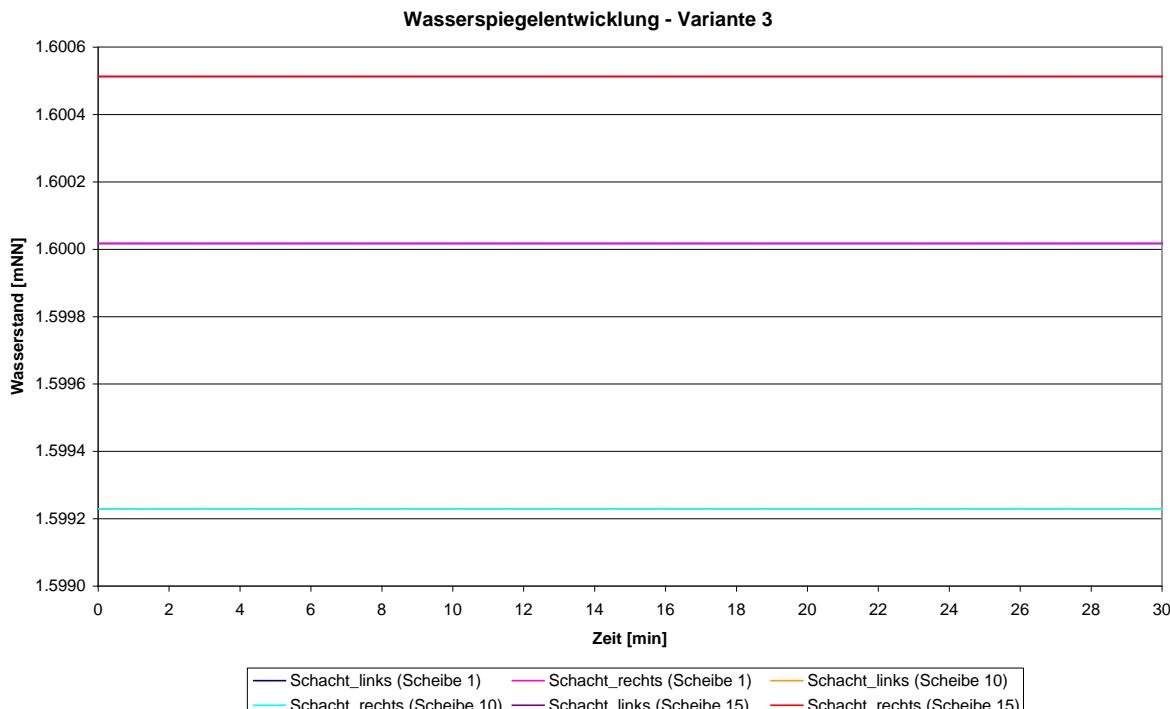


Abbildung 133: Variante 3: Wasserspiegelentwicklung

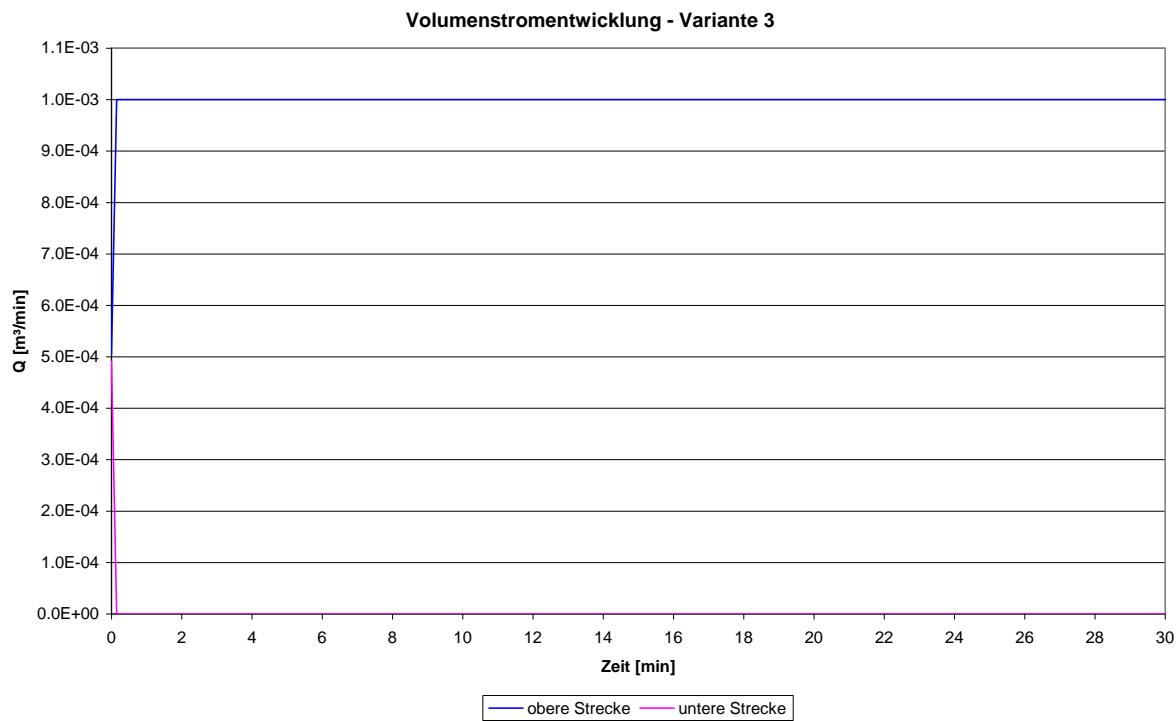


Abbildung 134: Variante 3: Volumenstromentwicklung

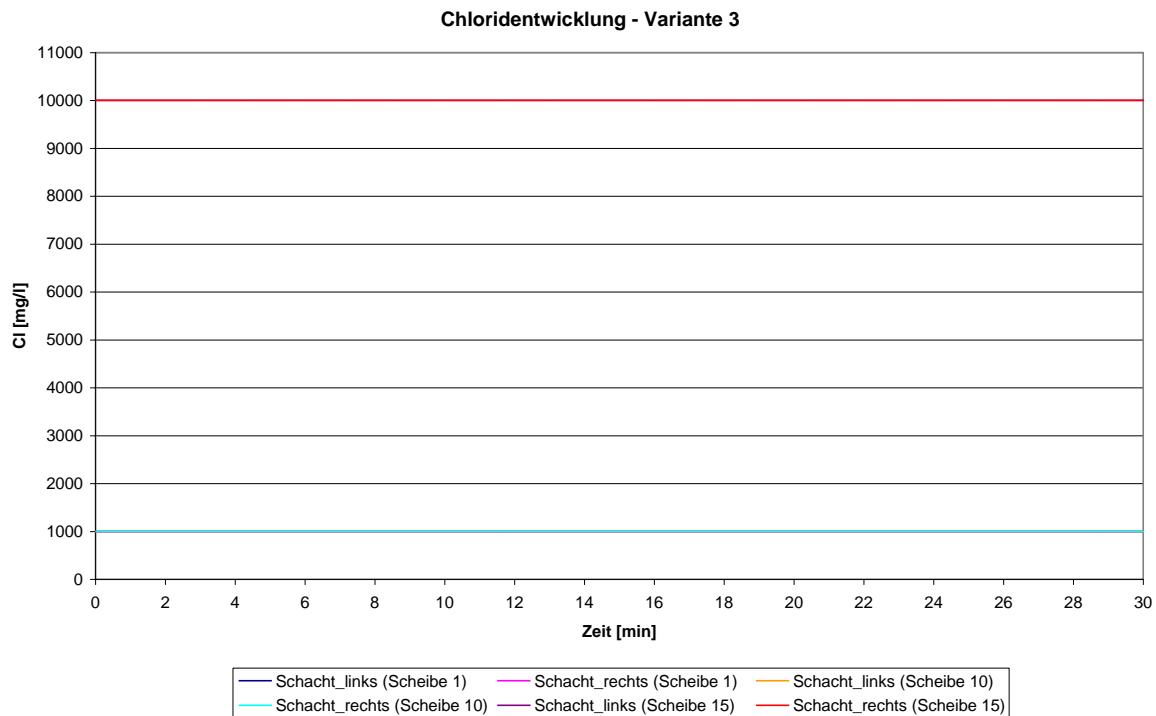


Abbildung 135: Variante 3: Chloridentwicklung

#### 4.5.2.3.5 Variante 4

Die schrittweise Veränderung der Dichteunterschiede im oberen und unteren Teil des Modells, beginnend mit gleicher Dichte, soll aufzeigen, wann der Volumenstrom im Modell umschlägt, d. h. es fließt alles durch die obere Verbindung. Dafür wurden folgende Ausgangsparameter gewählt:

##### 4a) Speisungsmenge 1 L/min:

- 1. bis 12. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Ausgangskonzentration und schrittweise Verringerung der Konzentration
- 13. bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Ausgangskonzentration

Es zeigt sich, dass schon bei einem Dichteunterschied von größer 1,5 mg/L die gesamte eingespeiste Wassermenge von 1 L/min nur noch durch die obere Verbindung fließt, wobei der Umschlag sprunghaft stattfindet (Abbildung 136).

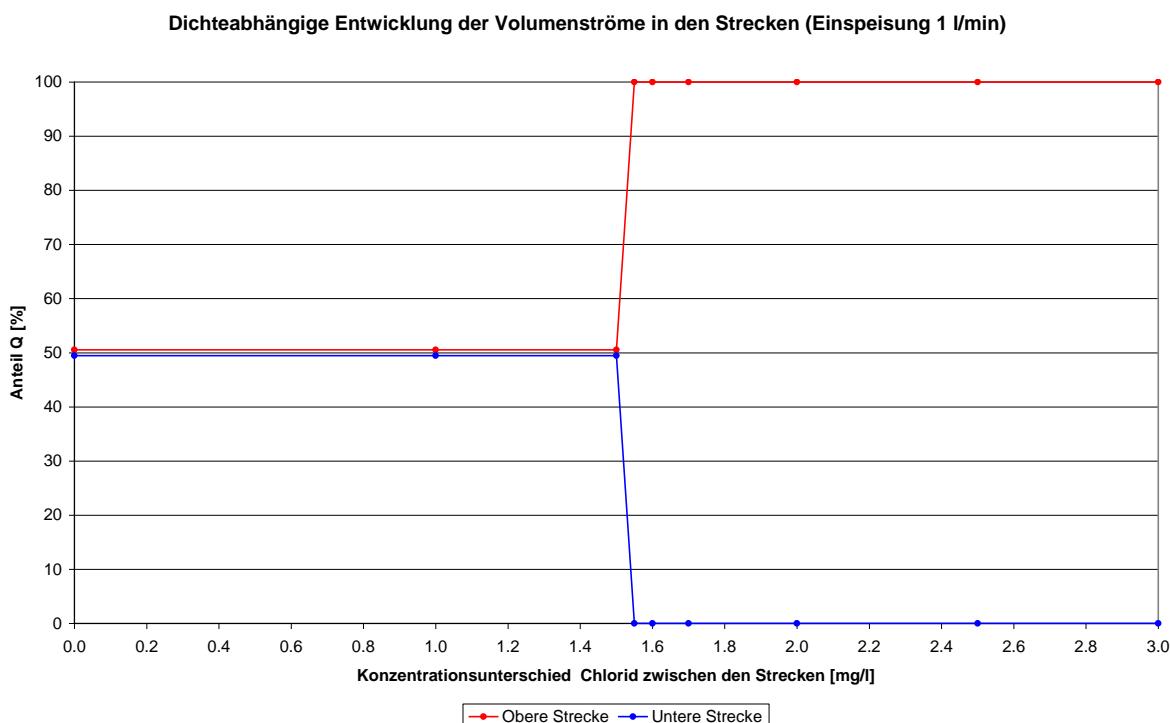


Abbildung 136: Variante 4a: Dichteabhängige Volumenstromentwicklung

#### 4b) Speisungsmenge 10 L/min:

Analog zur Variante 4a mit 1 L/min Speisungsmenge wird zum Vergleich mit 10 L/min mit den gleichen Modellausgangsparametern gerechnet.

Auf Grund der größeren Einspeisungsmenge schlägt der Volumenstrom erst bei einem viel größeren Konzentrationsunterschied (155 – 156 mg/L) zugunsten der oberen Strecke um, wobei auch hier der Umschlag sprunghaft stattfindet (Abbildung 137).

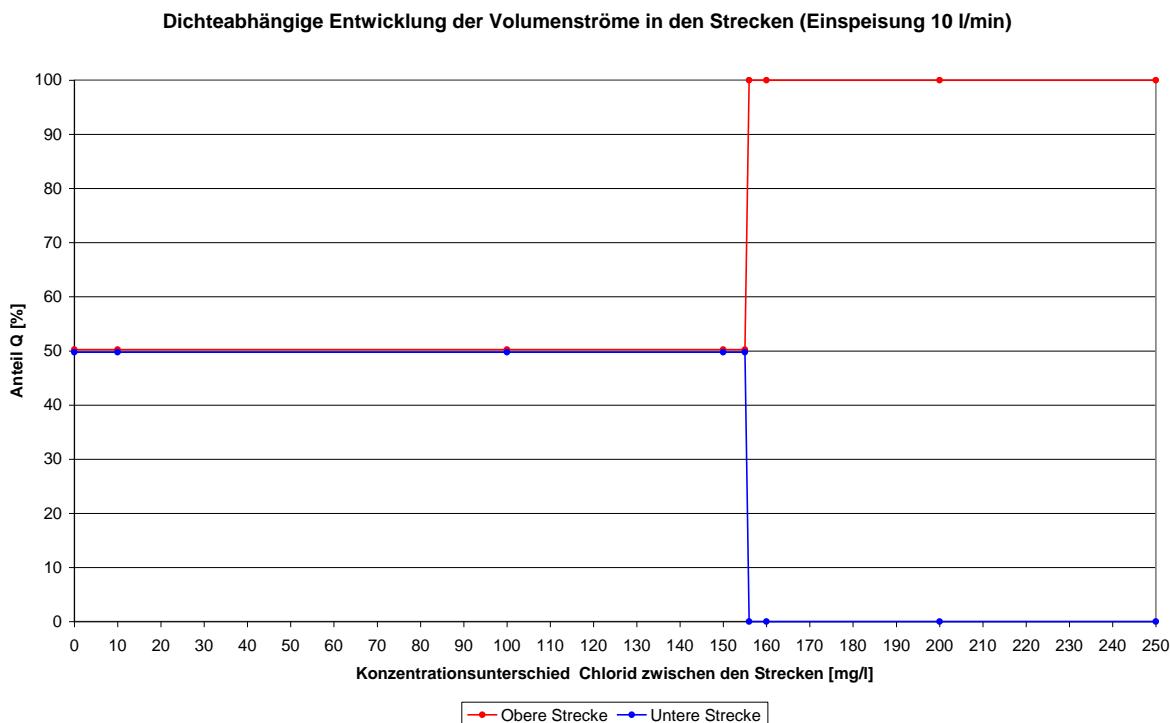


Abbildung 137: Variante 4b: Dichteabhängige Volumenstromentwicklung

#### **4.5.2.4 Modellanpassungen zur temperaturabhängigen Dichteströmung**

Zur Realisierung der temperaturabhängigen Dichteströmung wurde im Modell eine geringfügige Anpassung notwendig. Es erfolgte die modelltechnische Nachbildung des Kastens, indem die Polygone (Schächte) auf die realen Maße des Kastens erweitert wurden. Die Flächenmaße der beiden Boxen, welche die Schächte abbilden, betragen jeweils 1,40 m x 1,80 m. Weiterhin wurde die Unterkante der untersten 16. Modellscheibe um 0,4 m nach unten gesetzt, da der Kasten um diesen Betrag tiefer liegt. Die anderen Höhen der Boxen (je 0,10 m) bzw. weitere Modellparameter wurden nicht verändert.

Es soll die Wirkung der Wärmeunterschiede im Wasser, ohne Wärmeaustausch mit dem Kasten, unter verschiedenen Modellbedingungen in den Schächten untersucht werden.

Modellausgangsparameter:

- 1. bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 0 L/min
- Upwindverfahren ein / Dispersion, Diffusion aus
- obere und untere Verbindung entfernt
- Temperatur Schächte 1. - 14. Modellscheibe 10 °C
- Temperatur Schächte 15. - 16. Modellscheibe 40 °C

Instationäre Rechnung mit gleicher Dichte in allen Modellscheiben ohne Wärmeübergang zwischen Schächten und Kasten (Tabelle 15).

Tabelle 15: Endtemperaturen

Modell-scheibe	Temperatur Schacht_links [°C]	Temperatur Schacht_rechts [°C]
1	10	10
2	10	10
3	10	10
4	10	10
5	10	10
6	10	10
7	10	10
8	10	10
9	10	10
10	10	10
11	10	10
12	10	10
13	10	10
14	10	10
15	40	40
16	40	40

Als Ergebnis dieser Modellrechnung kann festgehalten werden, dass die Temperaturen in den Schächten, wie vorgegeben, erhalten bleiben. Die Dichte in allen Scheiben beträgt 1007,585 g/L. Die Konzentrationen bleiben unverändert mit 10.000 mg/L stehen.

#### 4.5.3 Modellerweiterung Wärmetransport

Innerhalb der Erdkruste nimmt die Temperatur allgemein mit der Tiefe zu. Grund dafür ist der „innere Motor“ der Erde, der in Form des flüssigen Mantel-Materials unter der Kruste fortwährend Wärmeenergie an die Atmosphäre abgibt. Die lotrechte Temperaturzunahme um 1 K mit der Tiefe wird als geothermische Tiefenstufe bezeichnet und beträgt im Ruhrgebiet nach /21/ im Mittel etwa 27 m/K. Der Kehrwert wird geothermischer Gradient genannt und beträgt entsprechend rd. 3,7 K/100 m.

Auch im Bereich des bergbaulich verritzten Gebirges werden die Grubenbaue von unten her aufgeheizt, so dass je nach Bewetterungssituation oder Füllung der Baue mit Wasser entweder eine Erniedrigung oder auch Erhöhung des geothermischen Gradienten bewirkt werden kann. Im Folgenden werden die Modellentwicklungen beschrieben, um den Einfluss der Gebirgstemperatur berücksichtigen zu können.

##### 4.5.3.1 Berücksichtigung der Gebirgstemperatur im Boxmodell

Der Festkörperanteil wird im Boxmodell nicht explizit erfasst. Die Variablen Wasserspiegel oder Wassertemperatur beziehen sich auf den Mittelpunkt der Box, wobei gilt, dass diese Variablen repräsentativ sind als Mittelwert für die gesamte Box. Aufgrund der Größe der üblicherweise verwendeten Boxen ist diese Anforderung nur gültig aufgrund der vielen hydraulischen Verbindungen und Kurzschlüsse innerhalb eines Grubenfeldes infolge der bergmännischen Arbeiten. Praktisch gesprochen heißt das, dass in allen Teilen einer Box der gleiche Wasserspiegel gemessen werden müsste, um die Boxdefinition anwenden zu können. Gibt es Kenntnisse, dass diese Bedingung nicht erfüllt ist, muss die Box weiter unterteilt werden.

Die Temperaturverteilung um ein Streckensystem ist gerade dadurch gekennzeichnet, dass in der Nähe der Strecke ein starker Temperaturgradient vorhanden ist, weil die durchströmbar Zylinderfläche in Richtung Strecke aufgrund der radialsymmetrischen Geometrie immer kleiner wird. Diese Änderung der Temperatur kann nicht mit dem gleichen Konzept der oben beschriebenen repräsentativen Mittelwertbildung in der Box behandelt werden. Würde man aber jetzt eine Box in viele kleine Strömungselemente unterteilen, um die Wärmeanströmung richtig zu beschreiben, ginge das robuste Boxmodellkonzept verloren. Deshalb wurde ein anderer Weg beschritten.

Um eine Strecke wird gedanklich ein Zylinder- bzw. Schalensystem errichtet, innen beginnend mit sehr kleinen Mächtigkeiten der Schalen und nach

außen immer mächtiger werdend (Abbildung 138). Jede dieser Schalen entspricht einem bestimmten Gesteinsvolumen und kann eine variable Temperatur besitzen:

Wärmeleitung (solid):      Wärmetransfer (Grenzfläche solid – liquid):

$$dT/dt = \lambda dT/ds$$

$$Q = wü * \Delta T \text{ (solid-liquid)}$$

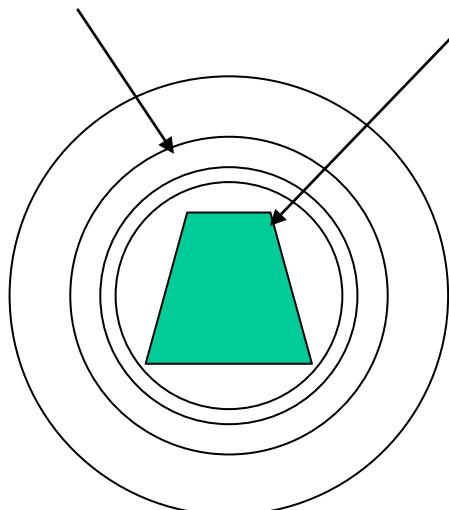


Abbildung 138: Schalenmodell zur Wärmeanströmung um Strecke

Zwischen den Schalen geschieht der Wärmetransport mittels Wärmeleitung, wobei dem Modell der Wärmeleitkoeffizient vorzugeben ist. An der Grenzfläche zwischen der innersten Schale und dem Wasserinhalt der Box findet der Wärmeaustausch als Wärmeübergang über eine Fläche statt. Hierfür ist ein charakteristischer Wärmeübergangskoeffizient für die Strecke, wie z. B. der für Spritzbeton oder Mauerung anzugeben.

Letztlich ist noch die äußere Randbedingung des Ringsystems zu definieren. Es wird angenommen, dass sich der Gesamtwärmeinhalt einer Box nicht durch die über Strecken entzogene oder zugeführte Wärme ändert. Dies ist aufgrund der großen Dimension einer Box und dem dazu vergleichsweise geringen aufgefahrenen Hohlraumvolumen begründbar. Damit ist es möglich, den äußeren Ring mit einer festen Temperatur zu beleben, der der geothermischen Tiefenstufe entspricht.

Da im Boxmodell verschiedene Ringkonfigurationen (Entwicklung der Schalenmächtigkeiten, ausgehend von der innersten Scheibe, Anzahl der Ringsysteme um Strecken, Streckenlänge) pro Box definiert werden können, kann man sich so dem tatsächlichen Grubengebäude trotz dieser abstrakten Vorgehensweise stark annähern.

#### **4.5.3.2 Kalibrierung am Beispiel BW-Ost (Gneisenau-Haus Aden)**

Im Folgenden wird die gemessene Temperaturrentwicklung am Victoria-Annahmedamm des Bergwerkes Ost verglichen mit den Ergebnissen der Box-Simulationen unter verschiedenen Ausgangszuständen.

Es wurden zahlreiche Varianten berechnet, bei denen die Schalenanzahl, die Schalenmächtigkeit und der Faktor „Längung Schalen“ modifiziert wurden. Mit der dargestellten Variante (Abbildung 139: Anzahl Schalen = 9, Mächtigkeit 1. Schale = 0,1 m, Faktor Längung Schalen = 2) konnte die beste Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden.

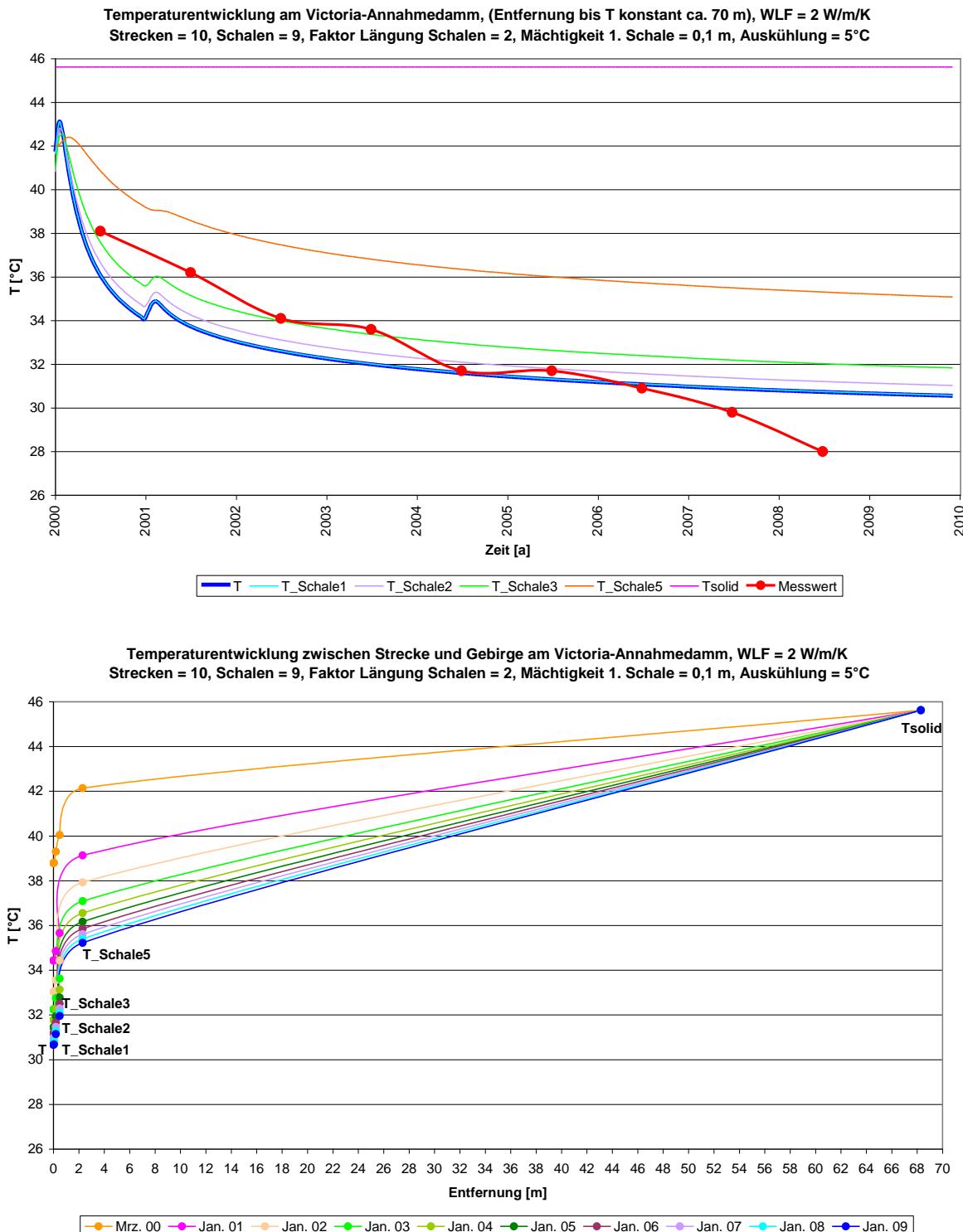


Abbildung 139: Vergleich gemessene Temperaturentwicklung BW-Ost mit Box-modellsimulation

#### 4.5.4 Box-Simulationen

Nach den in den Kapiteln 4.5.2 und 4.5.3 geschilderten Voruntersuchungen und Anpassungen wurde schließlich der Schichtungsversuch V6 (Kap. 4.2.4.6) zur Nachrechnung mit dem Boxmodell unter Berücksichtigung doppeldiffusiver Prozesse ausgesucht, weil hier die Randbedingungen „Süßwasserzulaufrate“ und „Heizung“ über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten wurden. Der Versuch selbst zeigte außerdem eine recht gleichmäßige Entwicklung über den mit 89 Tagen bis zur Durchmischung bis dahin längsten Versuchszeitraum (Abbildung 140).

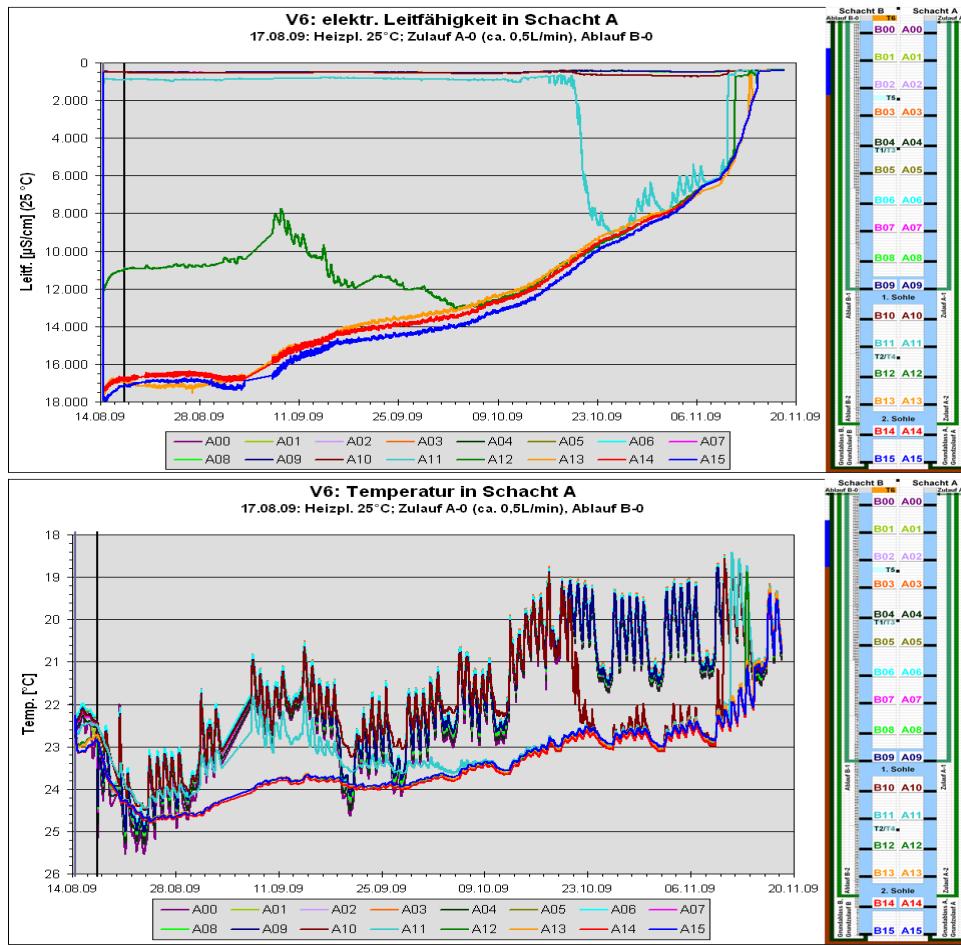


Abbildung 140: Schichtungsversuch V6 – Leitfähigkeits- (oben) und Temperatur-entwicklung (unten)

Wie die Simulationen mit konstanter (gemittelter) (Abbildung 141) und mit variabler (Abbildung 142) Einlauftemperatur zeigen, werden die wesentlichen Effekte wie Übergangsbereiche, schrittweiser Übergang einzelner Wasserkörper zu höheren Mineralisationen und Temperaturen, erst all-

mähliche Angleichung dann schnelle Vermischung sehr gut nachgezeichnet, d. h. die Einbindung der Doppeldiffusion in das Boxmodell war erfolgreich.

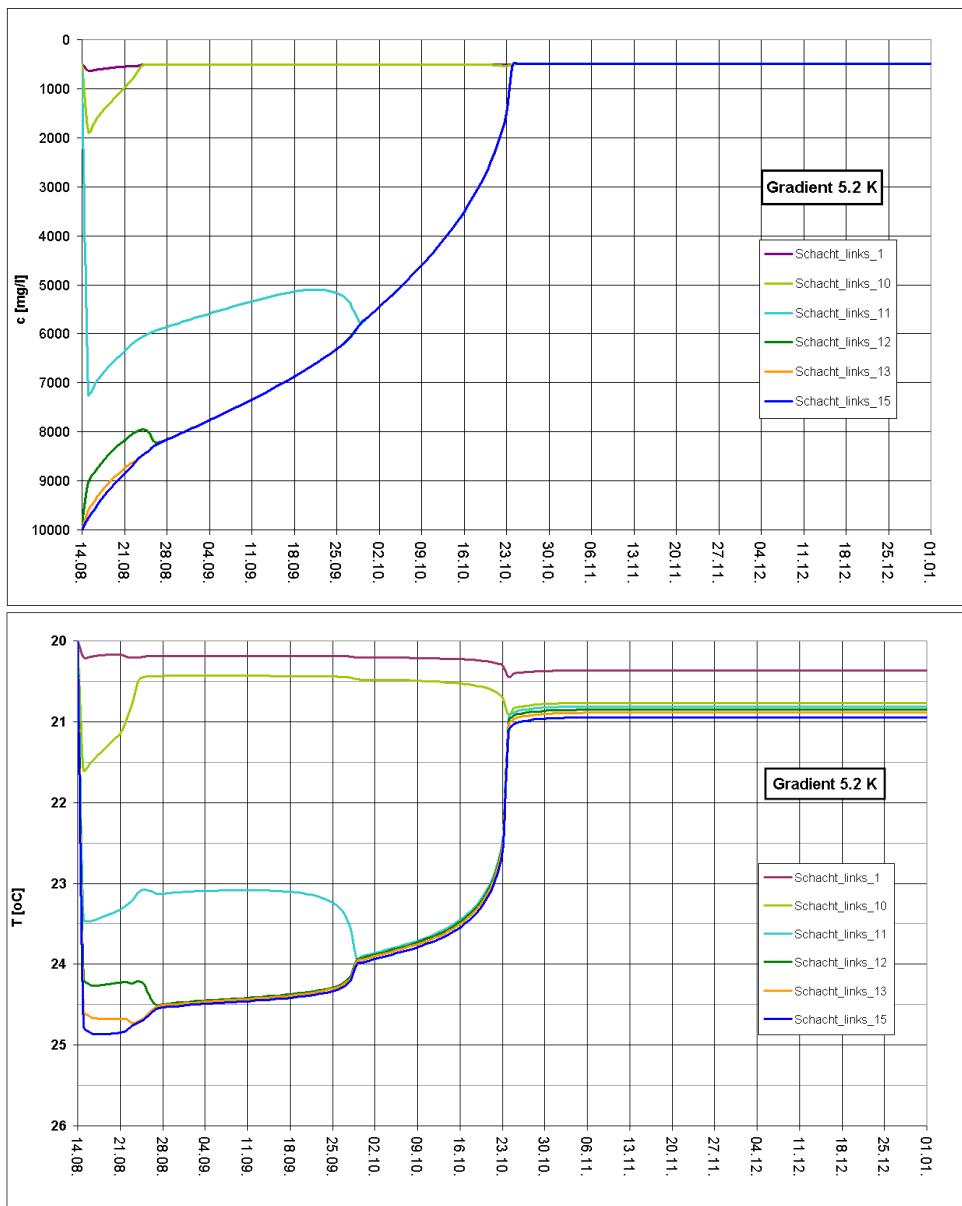


Abbildung 141: Modellierte Konzentrations- (oben) und Temperaturrentwicklung (unten) bei T-Gradient 5,2 K und konstanter (gemittelter) Einlauf-temperatur

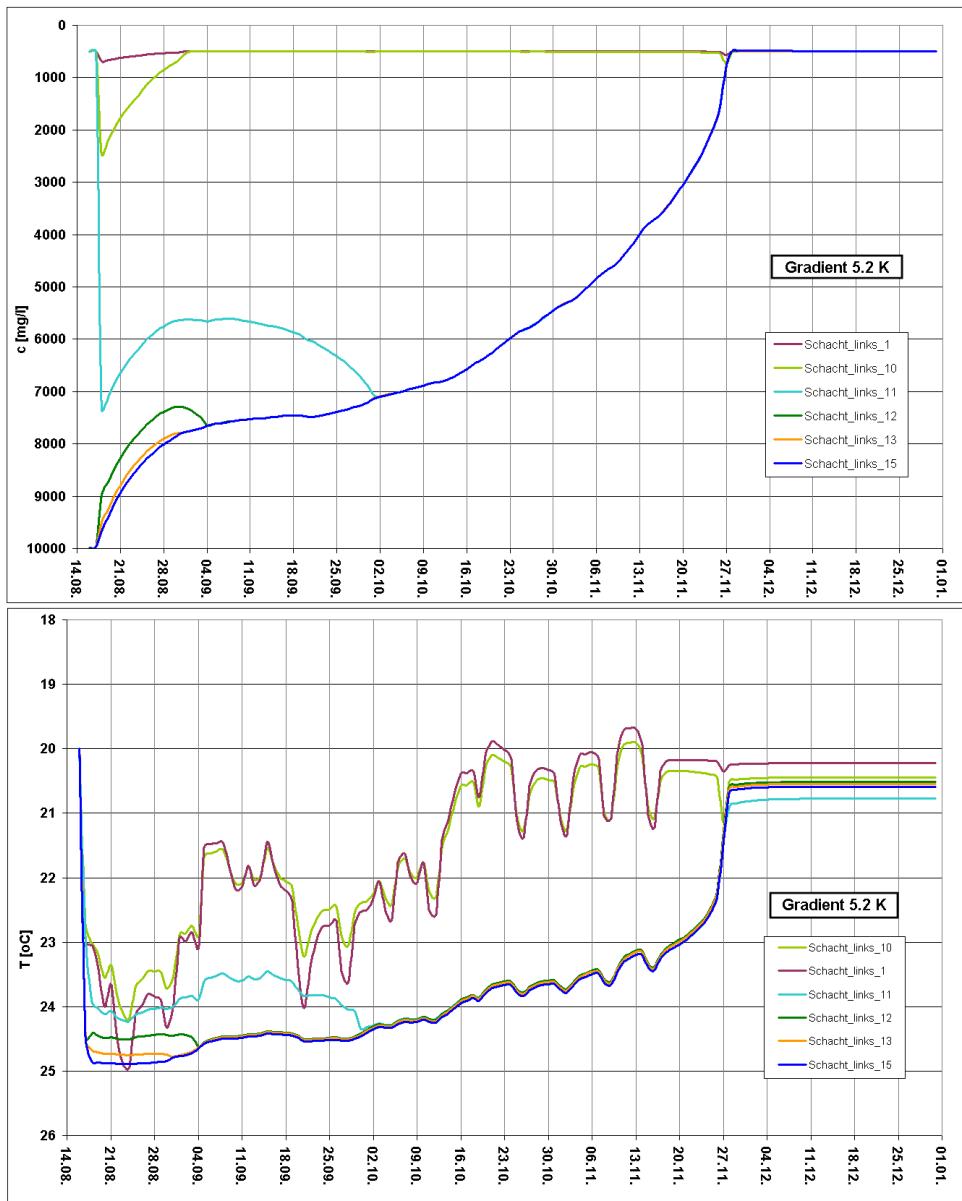


Abbildung 142: Modellierte Konzentrations- (oben) und Temperaturentwicklung (unten) bei T-Gradient 5,2 K und variabler Einlauftemperatur

## 4.6 Fazit physikalisches Modell

Die Süßwasser-/Salzwasserschichtung ist in den Schichtungsversuchen ohne Anlegen eines thermischen Gradienten (Aufheizung) recht stabil, eine Vermischung erfolgt nur ganz allmählich.

Die Zeitspanne bis zur Vermischung wird durch den thermischen Gradienten (Aufheiztemperatur), der Salzzugabe (Salzkonzentration) und den Zuflüssen beeinflusst. Salzzugabe im Tiefsten und Zuflüsse (in Abhängigkeit

der Rate) haben eher schichtungsstabilisierende Wirkung, während ein erhöhter thermischer Gradient die Vermischung beschleunigt. Der Vorgang bis zur Vermischung ist immer gleich: einer langsam Konzentrations- und Temperaturangleichung über mehrere Ebenen (Messpunkte) folgt eine schnelle Vermischung. Es konnte festgestellt werden, dass dabei die Temperatur immer der Mineralisation vorausseilt. Dieses Verhalten ist der im Vergleich zur Salinität höheren Diffusivität von Wärme geschuldet: ein Wasserteilchen gibt Wärme schneller an die kältere Umgebung ab als es Salz an geringer mineralisierte Bereiche verliert.

Die in der Literatur niedergelegten Ergebnisse und Erklärungen für bestimmte Phänomene fußen großenteils auf Beobachtungen in natürlichen Systemen (Limnologie, Ozeanographie). Die in den Versuchen beobachteten Phänomene standen in Übereinstimmung mit den Beschreibungen in der Literatur bzw. konnten durch diese erklärt werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Schichtungsversuche im Technikum realen Verhältnissen sehr nahe gekommen sind und ein Maßstabseffekt nicht zu verfälschenden Ergebnissen geführt hat. Neben dem Erkenntnisgewinn aus den Messdaten ist auch diese Feststellung wichtig für die Simulationen bzw. für die Übertragbarkeit auf größere Systeme.

Für die CFD-Modellierungen kann festgehalten werden, dass die gestiegerte Modellauflösung durch Verkleinerung der Gitterabstände von 3,3 cm auf 1,0 cm im Fluidbereich der Schächte und Strecken eine verbesserte Annäherung an die Messwerte des Versuchsstandes ergeben hat.

Die Gegenüberstellung von überhöhten und realistischen Wärmeleitfähigkeiten zeigt, dass die unterschiedlichen Randbedingungen einen signifikanten Einfluss auf den charakteristischen Verlauf der Ergebniskurven haben. Hinsichtlich der Temperaturverläufe ist ein qualitativ vergleichbarer Verlauf der Modellergebnisse zu den Messwerten bei der Annahme realistischer Wärmeleitfähigkeiten des Gebirges feststellbar. Quantitativ betrachtet ergeben sich Divergenzen bei der Betrachtung der absoluten Temperaturwerte, wobei die Modellergebnisse auf einen zu starken Einfluss der kälteren Umgebungstemperatur hinweisen. Die Modellierung der isolierend wirkenden PE-Platten und Schachtwandungen des Versuchsstandes, deren Fehlen als Ursache vermutet wurde, hat aber lediglich einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Modellergebnisse.

Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufes der Dichteschichtung sind qualitativ sowie quantitativ annähernd vergleichbare Ergebnisse des Modells zum

Versuchsstand bei der Variante 1.2 (Versuch V2) ohne Zulauf und mit realistischer Wärmeleitfähigkeit des Gebirges feststellbar.

Bei den Modellvarianten mit Zulauf (Versuch V5) erfolgte die Vermischung der unterschiedlich mineralisierten Wässer wesentlich früher als im Versuchsstand. Die Ursache für die frühzeitige Vermischung kann auf die durch die zweidimensionale Modellierung hervorgerufene Abbildung des Zulaufs über die gesamte Schachtbreite und somit vernachlässigten Wechselwirkungen in der Tiefenebene zurückgeführt werden. Zur quantitativen Annäherung an die im Versuchstand ermittelten Messergebnisse unter Berücksichtigung der horizontalen Fluidströmungen ist eine dreidimensionale Berechnung notwendig, die jedoch ein Vielfaches an Rechenaufwand nach sich zieht und deswegen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich ist.

Die Erkenntnisse aus Theorie (Literatur) und Praxis (Schichtungsversuche) führten zu Modellanpassungen und -erweiterungen im Boxmodell. So war eine ganz wesentliche Erkenntnis, dass ein Wärme- und Stofftransport über die vielfach beobachteten Grenzflächen hinweg stattfindet und dieser Transport zum Abbau der Salzkonzentration im Tiefen (wenn kein zusätzlicher Salznachschub erfolgt) führen kann, was letztlich eine Aufhebung der Dichteschichtung zur Folge hat. Dies war auch der Anlass, die Doppeldiffusion in geeigneter Weise ins Boxmodell zu integrieren. Mit weiteren Modellanpassungen war auch das Boxmodell in der Lage, die Schichtungsversuche erfolgreich nachzurechnen.

## 5 Beispiel mit realem Maßstab

### 5.1 CFD-Berechnungen

Das bestehende Modell wurde auf reale Geometrieverhältnisse skaliert. Über eine Gitterstudie wurde die für diese Modellgröße erforderliche Gitterauflösung ermittelt. Dazu wurden 3 Varianten (Variante 2 bis 4) für reale Grubengrößenordnungen erstellt, die sich nur hinsichtlich der Gitterauflösung in den Schacht- und Sohlenbereichen unterscheiden (Tabelle 16). Der im Rahmen der Analyse zu betrachtende Versuchsstand mit den geometrischen Abmessungen von ca. 280x180x200 (LxBxH in cm) dient zur Abbildung von Dichteschichtungen in gefluteten Grubenräumen. Die Skalierung des Versuchsstandes auf reale Geometrieverhältnisse ist durch eine lineare Veränderung der Dimensionierung nicht möglich, da das Größenverhältnis realer Schacht- und Sohlengeometrien sich deutlich von dem der Rohrleiter im Versuchsstand unterscheidet. Die Dimensionierung der untersuchten realen Grubenbaue kann Abbildung 143 entnommen werden. Die Schachtdurchmesser sind mit 6,6 m, die Sohlendurchmesser mit 4 m festgelegt und die Wandstärke der Ausmauerungen beträgt im Schacht- und Sohlenbereich 0,5 m. Insgesamt hat das Modell eine Abmessung von 1414x5x600 (LxBxH in m). Es handelt sich wiederum um ein 2-dimensionales Modell als Vertikalschnitt durch die Grubenbaue.

Tabelle 16: Übersicht über die Modellrandbedingungen (reales Bsp.)

V a r i a n t e	Temperatur in °C		Zulauf in l/min	Salz- konzentration in mg/l		Gitter- elemente	Kantenlänge in cm		Modell- größe	
	Umgebung	Heizplatte		Min.	Max.		Fluid	Gebirge		
2	10,0	Temperatur- gradient 3,7 K/100 m	1.000	0	150.000	289.231	50,0	100,0 bis 300,0	Realer Maßstab	
3	10,0	Temperatur- gradient 3,7 K/100 m	1.000	0	150.000	403.991	30,0	100,0 bis 300,0	Realer Maßstab	
4	10,0	Temperatur- gradient 3,7 K/100 m	1.000	0	150.000	1.608.471	10,0	100,0 bis 300,0	Realer Maßstab	

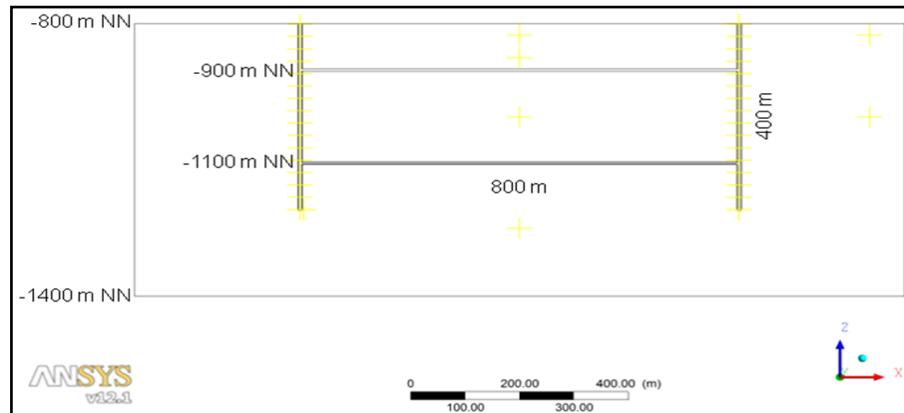


Abbildung 143: Veranschaulichung der Geometrieverhältnisse realer Grubenbae für CFD-Modell

In den **Varianten 2 bis 4** wurde unter Berücksichtigung eines geothermischen Gradienten ein Modell für reale Grubenbae gerechnet. Dabei wurde die Temperatur, ausgehend von 10 °C Oberflächentemperatur, linear um 0,037 K/m bis zu einer Tiefe von 1.400 m erhöht. Auf Höhe der Wasseroberfläche im Schacht (-800 mNN) beträgt die Gebirgstemperatur 39,6 °C, in einer Tiefe von -1.400 mNN beträgt sie 61,8 °C. Der Zulauf mit einer Rate von 1.000 L/min und der Ablauf befinden sich am oberen Ende der Schächte. Die Schichtgrenze zwischen höher- und niedrig-mineralisiertem Wasser befindet sich auf Höhe der Unterkante der oberen Sohle. Die Randbedingungen sind aus Abbildung 144 ersichtlich.

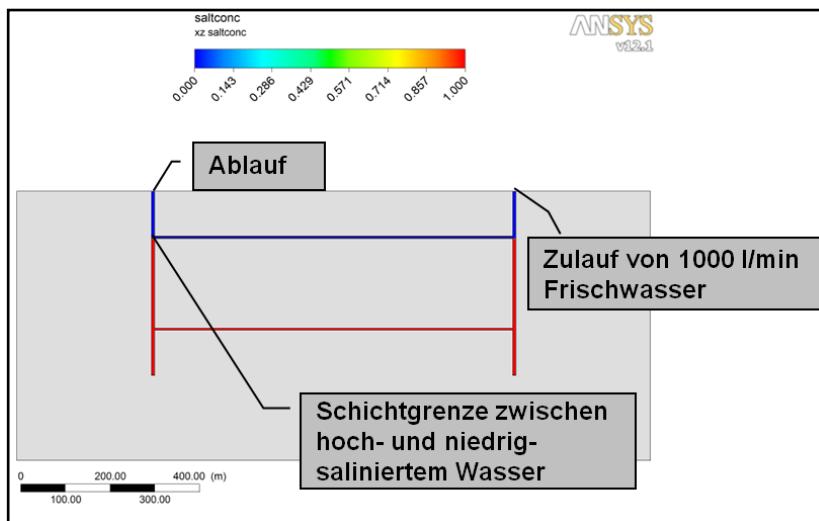


Abbildung 144: Variante 2 bis 4 – Randbedingungen

In Abbildung 145 ist die Temperaturverteilung im Gebirge unter stationären Randbedingungen dargestellt. Die Zulaufstemperatur weist einen Wert von 40,75 °C auf. Im Allgemeinen breitet sich die Wärme von unten nach

oben hin zunächst gleichmäßig aus. Auf Höhe der Schachtsohlen beträgt die Fluidtemperatur 41,65 °C.

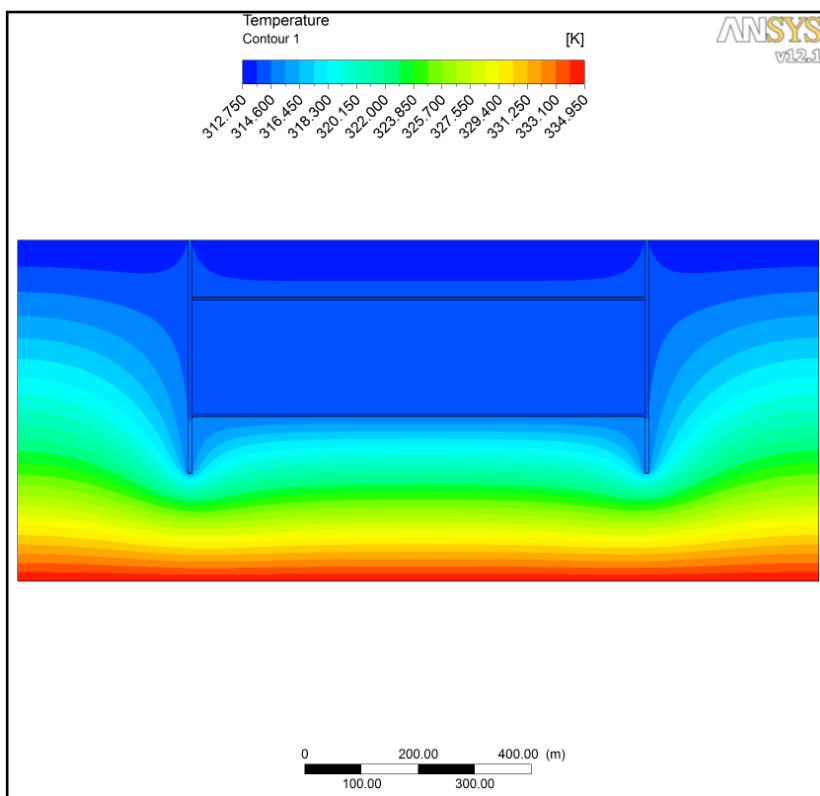
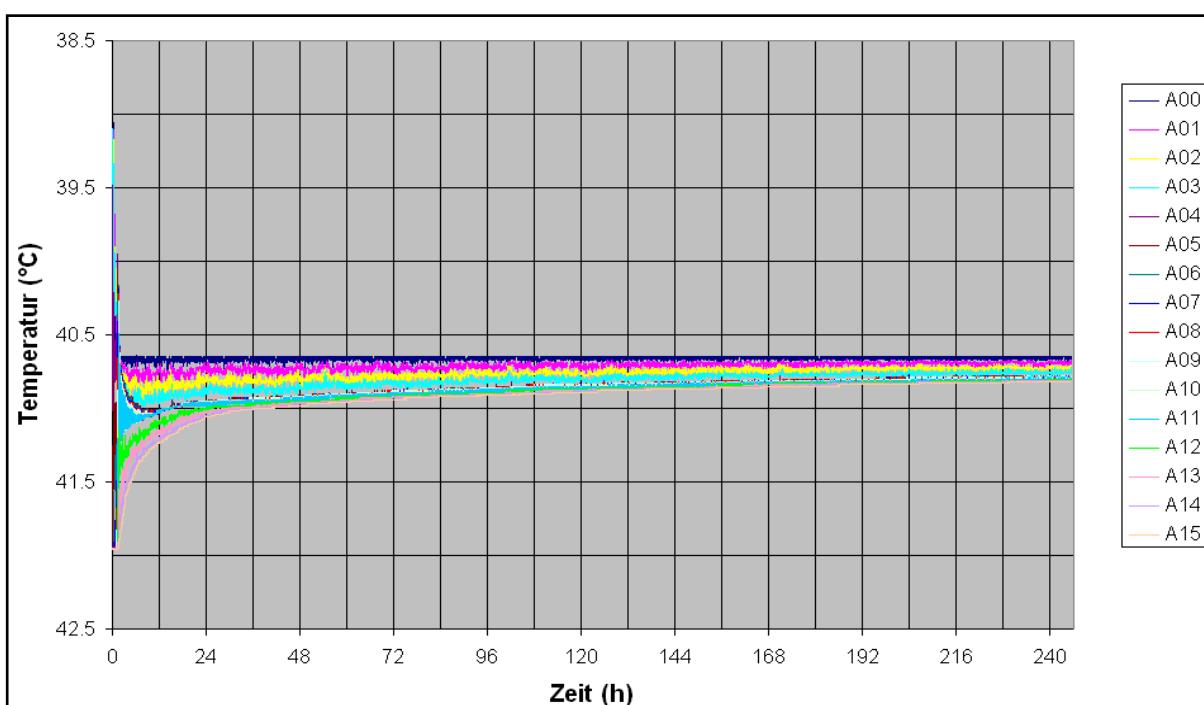
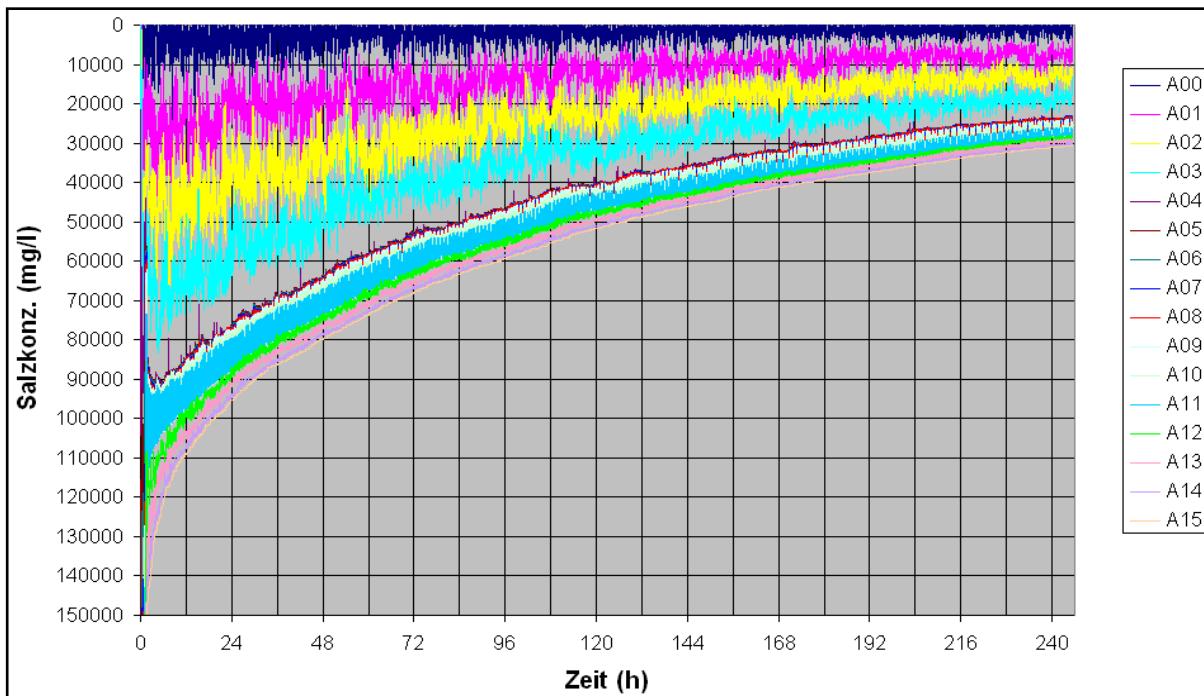


Abbildung 145: Variante 2 bis 4 – Temperaturverteilung

In Abbildung 146 und Abbildung 147 sind exemplarisch für Variante 3 (30 cm Knotenabstand) die vom Modell berechneten Salzkonzentrationen und Temperaturen dargestellt. Die Salzkonzentrationen variieren oder genauer gesagt fluktuieren sehr stark über die Zeit. Die Ergebnisse müssen als unplausibel eingestuft werden, da ein derart extremes Schwanken von Salinitäten um über 10.000 mg/L nicht beobachtet wurde. Auch die berechnete Temperaturverteilung (keine Schwankung, mehr oder weniger alles mit einer Temperatur) ist in Anbetracht des wirkenden geothermischen Gradienten nicht sonderlich plausibel.



Die Gitterstudie für reale Grubenbaue zeigte starke Abhängigkeiten der Rechenergebnisse von den gewählten Zeitschrittweiten, der Festlegung des Konvergenzkriteriums und der Mindestanzahl an inneren Iterations-

schritten pro Zeitschritt. Aufgrund der mit wachsender Modellgröße einhergehenden steigenden Hardwareanforderung wurde die minimale Gitterelementgröße auf eine Kantenlänge von 10 cm im Fluidbereich (Grubenbaue) festgelegt. Dies ist eine Größenordnung (Zehnerpotenz) über der Gitterauflösung des Modells für die Betrachtung des Versuchsstandes (Kap. 4.4). Die gewählten Knotenabstände im Fluidbereich variieren mit 30 cm, 40 cm und 50 cm.

Die Modellergebnisse lassen keine eindeutige Aussage über die notwendige Gitterauflösung zu, da sie im zeitlichen Verlauf voneinander abweichen. Die aus den Modellrechnungen resultierende charakteristische Salinitätsganglinie ist für die betrachteten Zeiträume vergleichbar, variiert jedoch unter quantitativen Gesichtspunkten in Abhängigkeit zu den Knotenabständen im Rechengitter und den Schwankungen in der Zeitschrittweite. Die Zeitschrittweite beschreibt dabei den Modellschritt (zeitliche Diskretisierung). Die Wahl der Zeitschrittweite erfolgt adaptiv durch das Berechnungsmodell anhand benutzerdefinierter Kriterien. Aus diesen adaptiven Verfahren resultiert zwangsweise eine Schwankungsbreite der Zeitschrittweite, die in Abhängigkeit der Instationarität des eigentlichen physikalischen Vorgangs zu realistischen Ergebnissen führt oder im Falle relativ geringer Instationarität zu fehlerhaften Ergebnissen führen kann.

Bei vergleichbarer Schwankungsbreite in der Zeitschrittweite zeigten die Varianten 2 und 3, dass die Vermischung mit Abnahme der Knotenabstände im Rechengitter zeitlich gestreckt erfolgt, was die Ergebnisse aus den Modellierungen des Versuchsstandes bestätigen. Die Variante 4 mit einem Knotenabstand im Fluid von 10 cm ergab hingegen eine schnellere Vermischung als in den Varianten 2 und 3, was tendenziell im Widerspruch zu den bisherigen Ergebnissen zu stehen scheint. Aufgrund des Ergebnisses weiterer Berechnungen stellte sich heraus, dass die Abweichung auf die größere Schwankungsbreite in der Zeitschrittweite zurückzuführen ist. Dies führt für die Gitterstudie zur Erkenntnis, dass für den Fall des Berechnungsgitters mit Knotenabstand  $\leq 10$  cm ein konservativeres Kriterium zur Erhaltung der adaptiven Zeitschrittweite gewählt werden muss als bislang praktiziert. Dies wiederum führt zwangsweise zur Einstellung insgesamt kleinerer Zeitschrittweiten im Bereich von ca. 0,5 Sek. für den Berechnungslauf mit daraus resultierender Steigerung der Berechnungszeit. Mit dem vorhandenen, zum Stand der Berechnungen aktuellen Parallelrechner (Mehrkern-CPU mit Hexa-Core-Prozessor) war dieser Rechenaufwand (mehrere Monate pro Simulation) nicht mehr leistbar. Aus

diesem Grund wurden weitere Berechnungen mit CFD-Modellen nicht durchgeführt.

## 5.2 Umsetzung ins Boxmodell

Das am physikalischen Modell (neuer Technikumsversuch) erprobte Boxmodell (vgl. Kap. 4.5) wird den realen Maßstäben angepasst. Wie bereits in Kapitel 5.1 erläutert, ist die Skalierung des Versuchsstandes auf reale Geometrieverhältnisse unter Beibehaltung gleicher physikalischer Ähnlichkeitsparameter durch eine lineare Veränderung der Dimensionierung nur annähernd möglich. Es wurde versucht, bei den Betrachtungen die Volumenströme so zu verändern, dass etwa die gleiche Reynoldszahl bei der Streckendurchströmung reproduziert wird.

### 5.2.1 Modellaufbau - Modellvergrößerung um Faktor 500

- Die Fläche der Schächte beträgt 20 m<sup>2</sup>.
- Für das Quadrat (Box) ergibt das eine Seitenlänge von je 4,472136 m.
- Der berechnete Rohrdurchmesser des Schachtes ist 5,046 m (5.046 mm).
- Die Schachthöhe beträgt 800 m. Unterteilt in 16 Boxen mit je 50 m Höhe.
- Das Hohlraumvolumen je Box beträgt 1000 m<sup>3</sup> (4,472136 m • 4,472136 m • 50 m).
- Die Boxen (Schächte) sind vertikal mit 15 Verbindungen vom Typ 3 verbunden (Länge = 800 m / 15 = 53,333333 m), (Rauhigkeit 1 m, Koeff. 1 = 506 / Koeff. 2 = 0,5).
- Die Fläche der Strecken beträgt 12 m<sup>2</sup>.
- Der berechnete Durchmesser ist 3,909 m (3.909 mm).
- Die horizontalen Verbindungen (2 Strecken) liegen im z-Niveau -625 mNN (15. Modellscheibe) und -375 mNN (10. Modellscheibe), sind 400 m lang und haben einen Leitwert vom Typ 3 (Koeff. 1 = 244 / Koeff. 2 = 0,5 / Rauhigkeit 1 m)
- Der Wasserspiegel ist im rechten Schacht mit 100 mNN als Festpotential vorgegebenen.

- Die Speisungsmenge im linken Schacht beträgt 5.000 L/min  
(5 m<sup>3</sup>/min)

Abbildung 148 zeigt den Modellaufbau in der Seitenansicht.

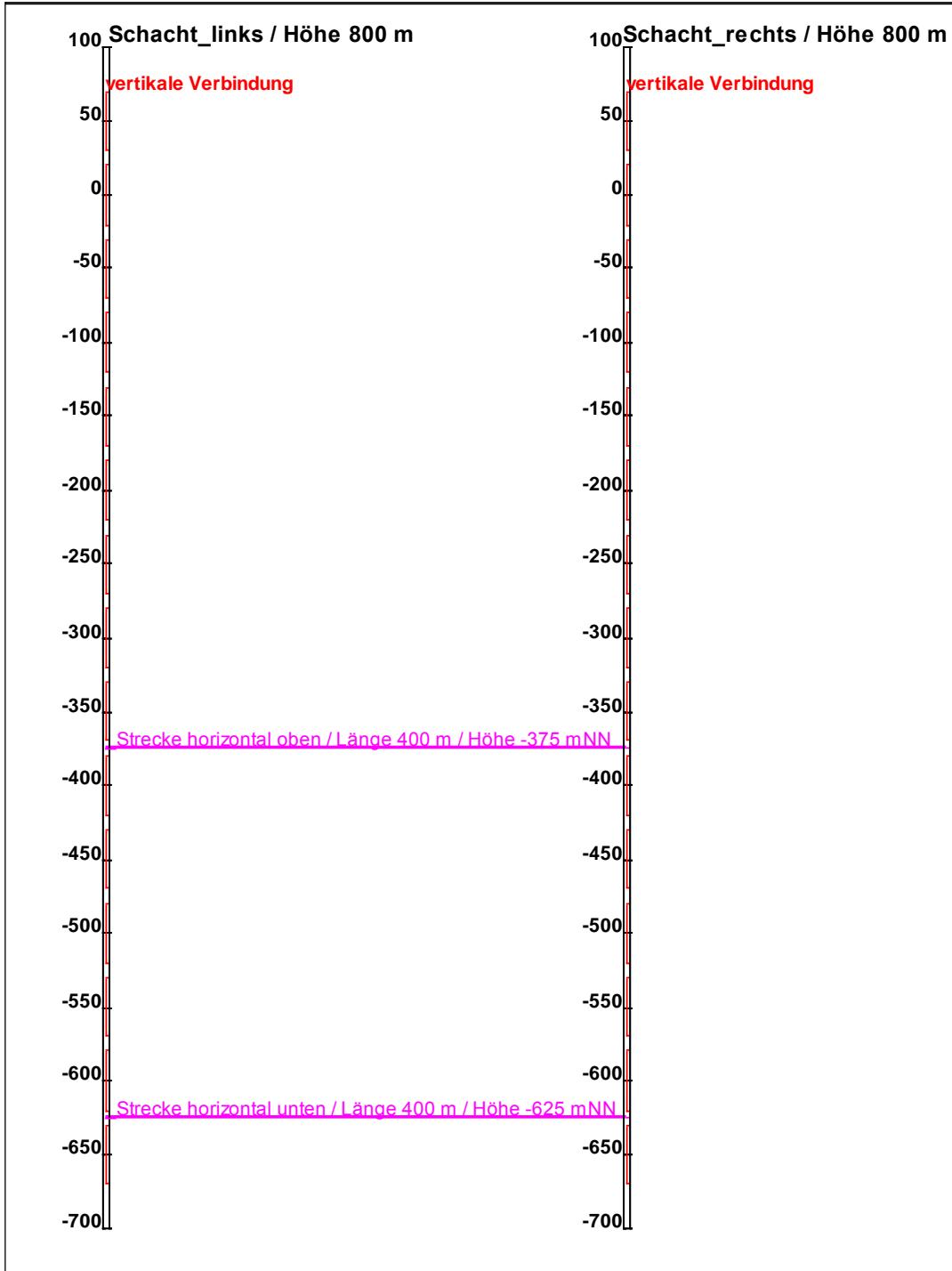


Abbildung 148: Seitenansicht Boxmodell realer Maßstab (Höhe in mNN)

## 5.2.2 Strömungsmodell realer Maßstab- stationärer Zustand

Wie zu erwarten, sind die Volumenströme ohne Dichteschichtungseffekte in der oberen und unteren Strecke etwa gleich groß (Tabelle 17). Die untere ist wieder etwas geringer, da der Strömungsweg durch den tiefen Bereich länger ist und ein leichter Zusatzwiderstand durch die Schächte bis zum Erreichen der unteren Strecke hinzukommt.

Tabelle 17: Wasserspiegel und Differenzen im stationären Zustand - Einspeisungsmenge 500 L/min – Modell realer Maßstab

Scheibe	Wasserspiegel mNN und berechnete Differenzen [m]				
	Schacht links	Differenz Schacht links	Schacht rechts	Differenz Schacht rechts	Differenz links - rechts
1	75,00834319		75,00833333		0,00000986
2	75,00834282	0,00000037	75,00833370	-0,00000037	0,00000912
3	75,00834245	0,00000037	75,00833407	-0,00000037	0,00000838
4	75,00834208	0,00000037	75,00833444	-0,00000037	0,00000764
5	75,00834171	0,00000037	75,00833481	-0,00000037	0,00000689
6	75,00834134	0,00000037	75,00833519	-0,00000037	0,00000615
7	75,00834097	0,00000037	75,00833556	-0,00000037	0,00000541
8	75,00834060	0,00000037	75,00833593	-0,00000037	0,00000467
9	75,00834023	0,00000037	75,00833630	-0,00000037	0,00000393
10	75,00833986	0,00000037	75,00833667	-0,00000037	0,00000319
11	75,00833978	0,00000008	75,00833675	-0,00000008	0,00000303
12	75,00833970	0,00000008	75,00833683	-0,00000008	0,00000287
13	75,00833962	0,00000008	75,00833691	-0,00000008	0,00000271
14	75,00833954	0,00000008	75,00833699	-0,00000008	0,00000255
15	75,00833946	0,00000008	75,00833707	-0,00000008	0,00000239
16	75,00833946	0,00000000	75,00833707	0,00000000	0,00000239

Volumenstrom obere Strecke: **0,2679491 m<sup>3</sup>/min**

Volumenstrom untere Strecke: **0,2320509 m<sup>3</sup>/min**

## 5.2.3 Testen der Durchbruchskurve - Modell realer Maßstab

Analog zum physikalischen Modell soll ein Vergleich zwischen analytischer und modelltechnischer Lösung aufgezeigt werden. Folgende Ausgangsparameter werden für die Modellrechnung angenommen:

- 1. bis 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 500 L/min
- Einspeisung Sulfat 1 mg/L im linken Schacht
- Vergleich der Varianten mit 2 Verbindungen oben und unten, mit nur einer Verbindung oben und nur einer Verbindung unten

### Analytische Lösung:

Einleitmenge  $Q = 0,5 \text{ m}^3/\text{min}$  (500 L/min)

Schachtlänge = 800 m (725 m bis zur unteren Strecke bzw. Verbindung)

Schachtfläche = 20 m<sup>2</sup>

Zeit = Volumen / Volumenstrom  $(t = V / Q)$

Schachtvolumen = Schachtlänge \* Schachtfläche  $(V = l \cdot A)$

$$\text{Gl. 5-1: } V_{\text{ges}} = 2 \cdot 800 \text{ m} \cdot 20 \text{ m}^2 = 32.000 \text{ m}^3 \\ \text{(2 Schächte, Gesamtlänge)}$$

$$\text{Gl. 5-2: } V_{\text{wirk}} = 2 \cdot 725 \text{ m} \cdot 20 \text{ m}^2 = 29.000 \text{ m}^3 \\ \text{(2 Schächte, Länge bis Beginn untere Strecke)}$$

Das Volumen unterhalb der unteren Strecke wird bei der Berechnung der Durchbruchszeit nicht mit berücksichtigt. Somit ergibt sich für die Variante, dass das Wasser nur durch die untere Strecke fließen kann, die folgende Lösung:

$$t = 29.000 \text{ m}^3 / 0,5 \text{ m}^3/\text{min} = \underline{\underline{58.000 \text{ min} = 966,67 \text{ h} = 40,28 \text{ Tage}}}$$

### Modellergebnis:

Das Modellergebnis zeigt, dass bei der Variante „Verbindung unten“ (blaue Kurve) das berechnete Ergebnis reproduziert werden kann.

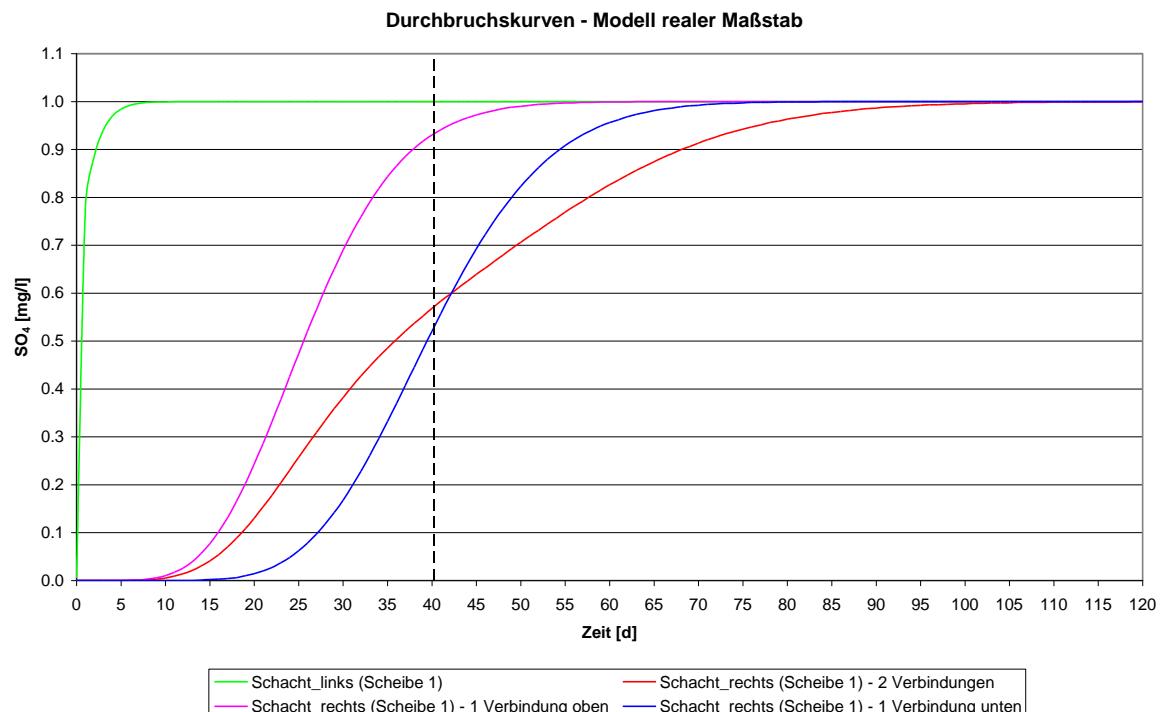


Abbildung 149: Durchbruchskurven – Modell realer Maßstab

Das Ergebnis der analytischen Lösung wird durch die gestrichelte schwarze Linie dargestellt.

#### 5.2.4 Dichteströmung - Modell realer Maßstab

Im Folgenden werden fünf Varianten berechnet:

- Var. 0: Basistest instationäre Rechnung mit unterschiedlicher Dichte im linken und rechten Schacht ohne Stofftransport
- Var. 1: Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte ohne Stofftransport
- Var. 2: Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte mit Stofftransport
- Var. 3: Instationäre Rechnung mit gleicher Dichte in den Modellscheiben 1 bis 12 und erhöhter Dichte in den Modellscheiben 13 bis 16
- Var. 4: Schrittweise Veränderung der Dichteunterschiede im oberen und unteren Teil des Modells, beginnend mit gleicher Dichte

### 5.2.4.1 Variante 0

Basistest instationäre Rechnung mit unterschiedlicher Dichte im linken und rechten Schacht ohne Stofftransport:

Es soll die Wirkung unterschiedlicher Konzentrationen im linken und rechten Schacht auf den Wasserspiegel im Modell untersucht werden. Dafür wurden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

- 1. bis 16. Modellscheibe 0 mg/L Chlorid Startkonzentration im linken Schacht
- 1. bis 16. Modellscheibe 10.0000 mg/L Chlorid Startkonzentration im rechten Schacht
- die obere Verbindung wurde entfernt
- Speisungsmenge 0 L/min (im Modell kann nichts fließen)

Tabelle 18, Tabelle 19, Abbildung 150 und Abbildung 151 zeigen die Ergebnisse.

Tabelle 18: Variante 0 - Modell realer Maßstab: Dichtevergleich

Modell-scheibe	Dichte Schacht_links [g/l]	Dichte Schacht_rechts [g/l]
1	999,701	1078,54
2	999,701	1078,54
3	999,701	1078,54
4	999,701	1078,54
5	999,701	1078,54
6	999,701	1078,54
7	999,701	1078,54
8	999,701	1078,54
9	999,701	1078,54
10	999,701	1078,54
11	999,701	1078,54
12	999,701	1078,54
13	999,701	1078,54
14	999,701	1078,54
15	999,701	1078,54
16	999,701	1078,54

Tabelle 19: Variante 0 - Modell realer Maßstab: Wasserspiegel und Differenzen

Modell-scheibe	h Schacht_links [mNN]	Schacht_rechts [mNN]	Differenz [m]
1	127,421	74,828	52,593
2	127,339	77,628	49,711

Modell-scheibe	h Schacht_links [mNN]	Schacht_rechts [mNN]	Differenz [m]
3	127,257	81,370	45,887
4	127,175	85,112	42,063
5	127,093	88,854	38,239
6	127,011	92,596	34,415
7	126,929	96,337	30,591
8	126,847	100,079	26,767
9	126,765	103,821	22,943
10	126,683	107,563	19,120
11	126,600	111,305	15,296
12	126,518	115,047	11,472
13	126,436	118,789	7,648
14	126,354	122,531	3,824
15	126,272	126,272	0,000
16	126,190	130,014	-3,824

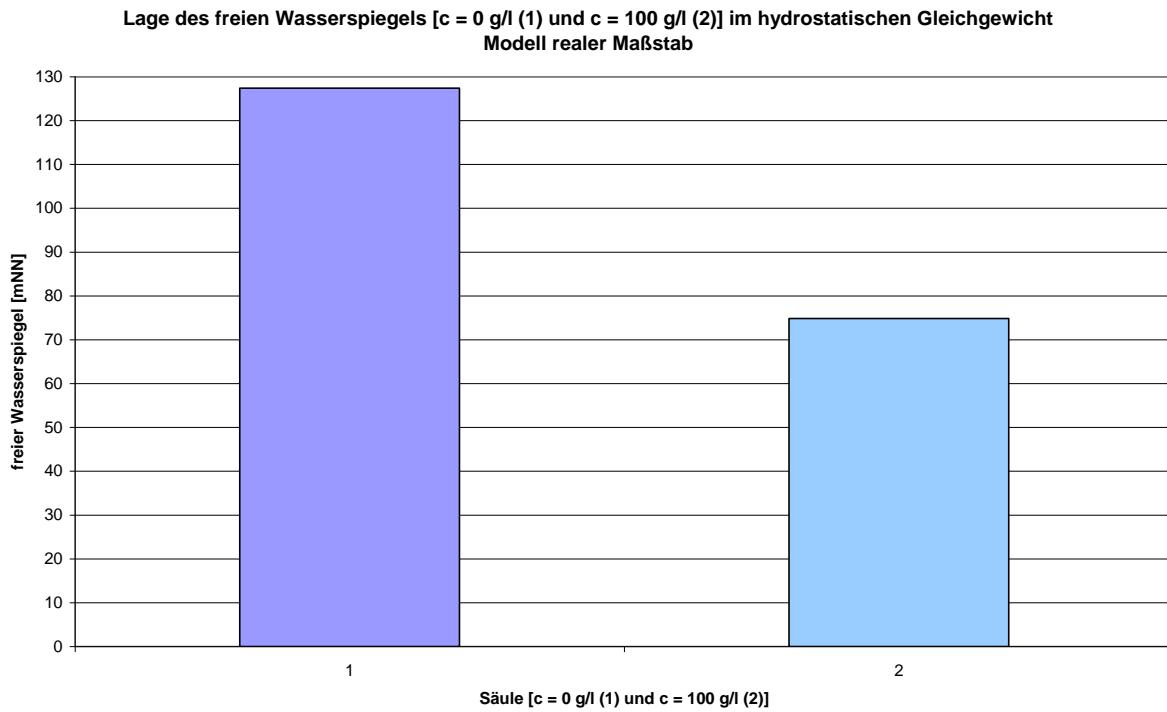


Abbildung 150: Variante 0 - Modell realer Maßstab: Lage freier Wasserspiegel im hydrostatischen Gleichgewicht

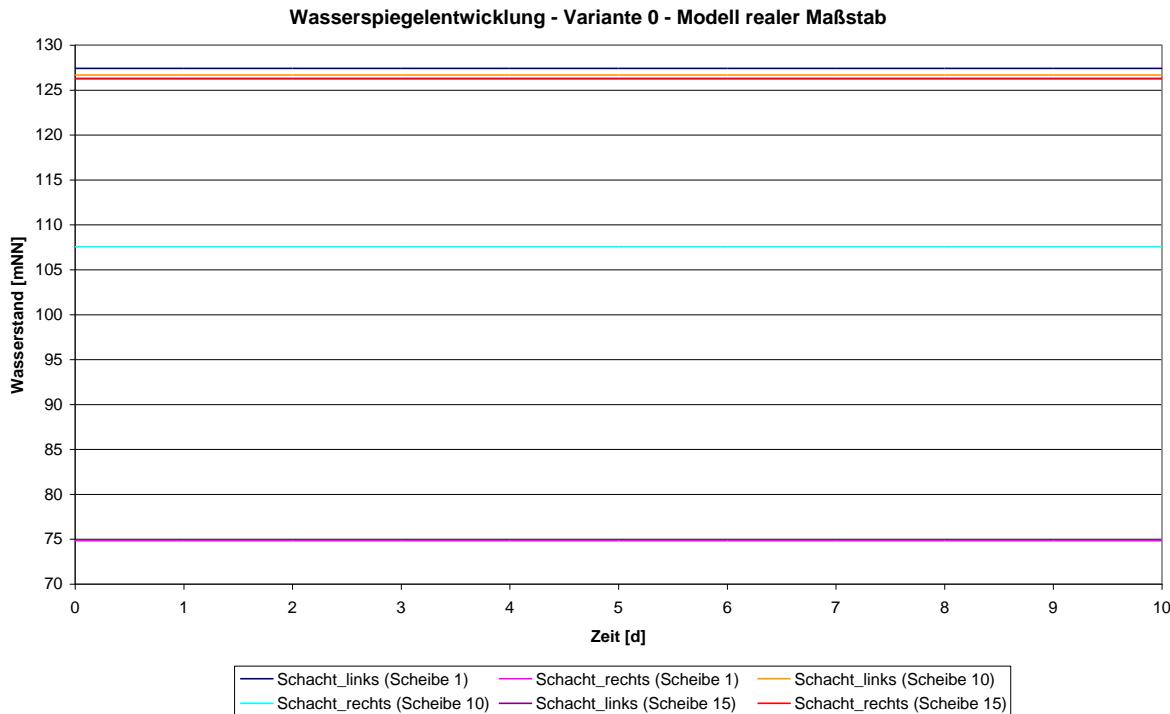


Abbildung 151: Variante 0 - Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung

#### 5.2.4.2 Variante 1

Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte ohne Stofftransport:

Bei dieser Variante soll gezeigt werden, dass das Modell die Dichteströmung bilanztreu umsetzen kann. Dazu werden in allen Modellscheiben die gleichen Ausgangskonzentrationen für Chlorid vorgegeben. Es wird nur mit Dichteströmung aber ohne Stofftransport gerechnet. Es werden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

- 1. - 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 500 L/min

Als Ergebnis dieser Modellrechnung kann man festhalten, dass das Modell realistische Ergebnisse liefert (Abbildung 152 bis Abbildung 154).

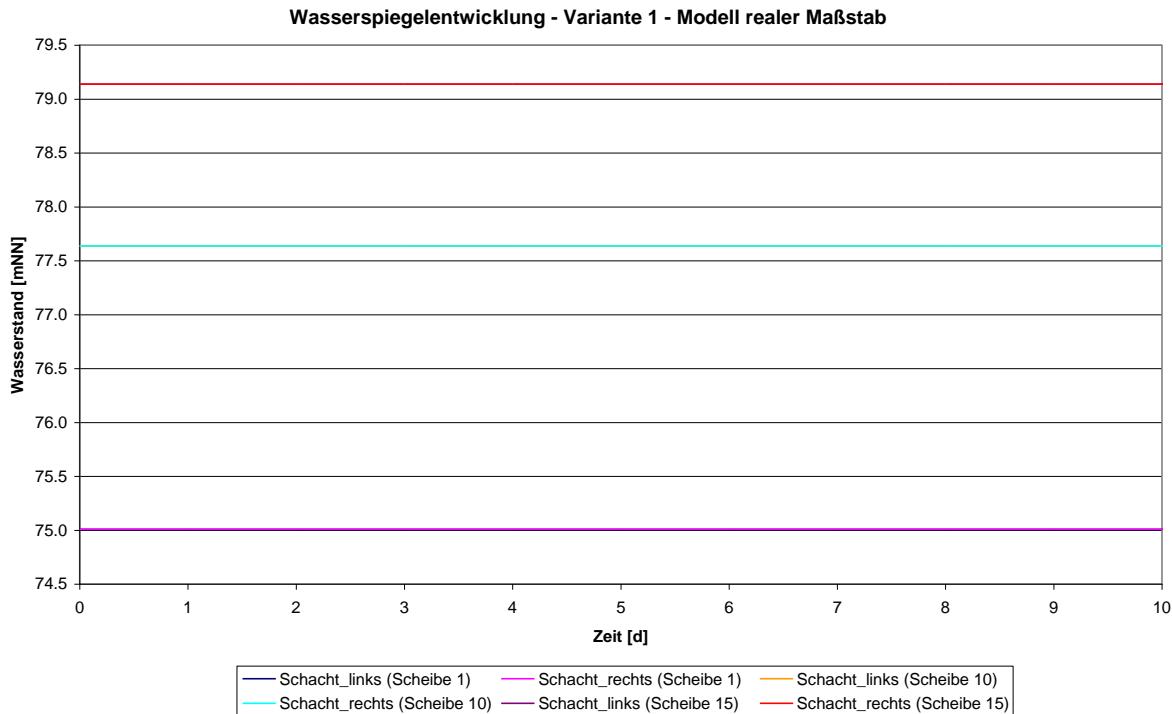


Abbildung 152: Variante 1 – Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung

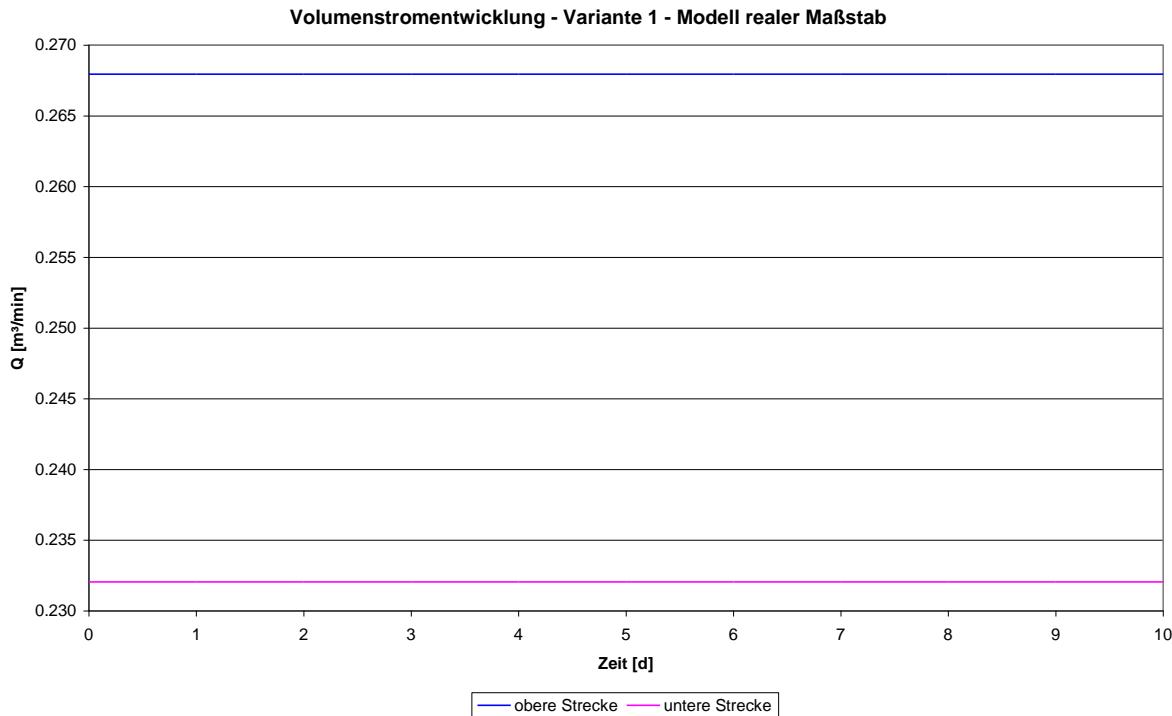


Abbildung 153: Variante 1 – Modell realer Maßstab: Volumenstromentwicklung

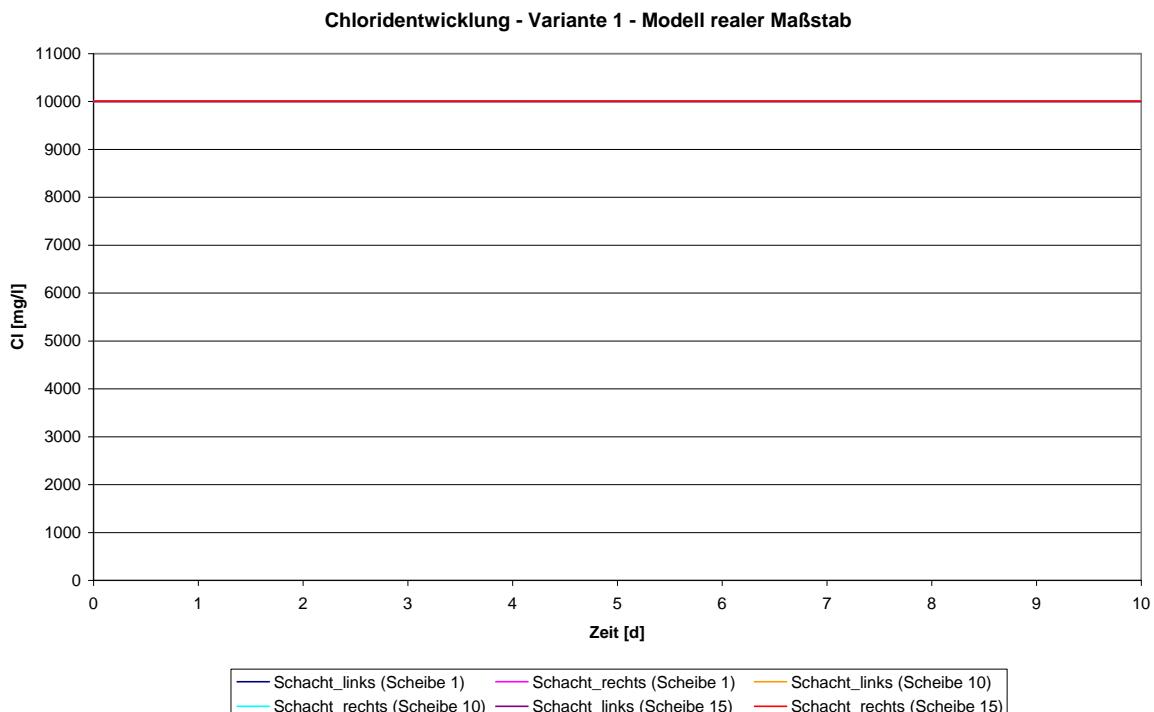


Abbildung 154: Variante 1 – Modell realer Maßstab: Chloridentwicklung

#### 5.2.4.3 Variante 2

Basistest instationäre Rechnung mit gleicher Dichte mit Stofftransport:

Ziel dieser Untersuchung ist es, im Vergleich zur vorhergehenden Variante 1 aufzuzeigen, dass die Dichteströmung (aber ohne Dichteunterschiede) mit Stofftransport zum gleichen Modellergebnis wie ohne Stofftransport kommt. Es gelten die gleichen Ausgangsparameter.

- 1. - 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 500 L/min

Da diese Variante die gleichen Ergebnisse wie die Variante 1 erzielt, kann man schlussfolgern, dass das Modell auch mit Stofftransport realistische Ergebnisse erzielt (Abbildung 155 bis Abbildung 157).

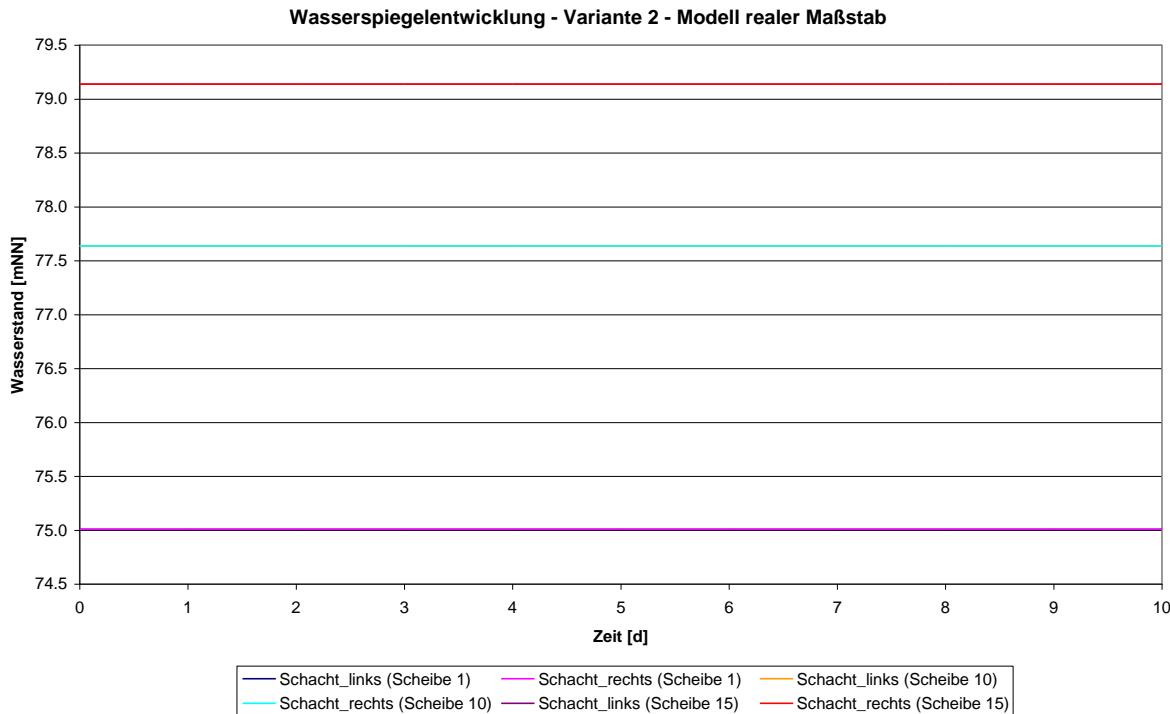


Abbildung 155: Variante 2 – Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung

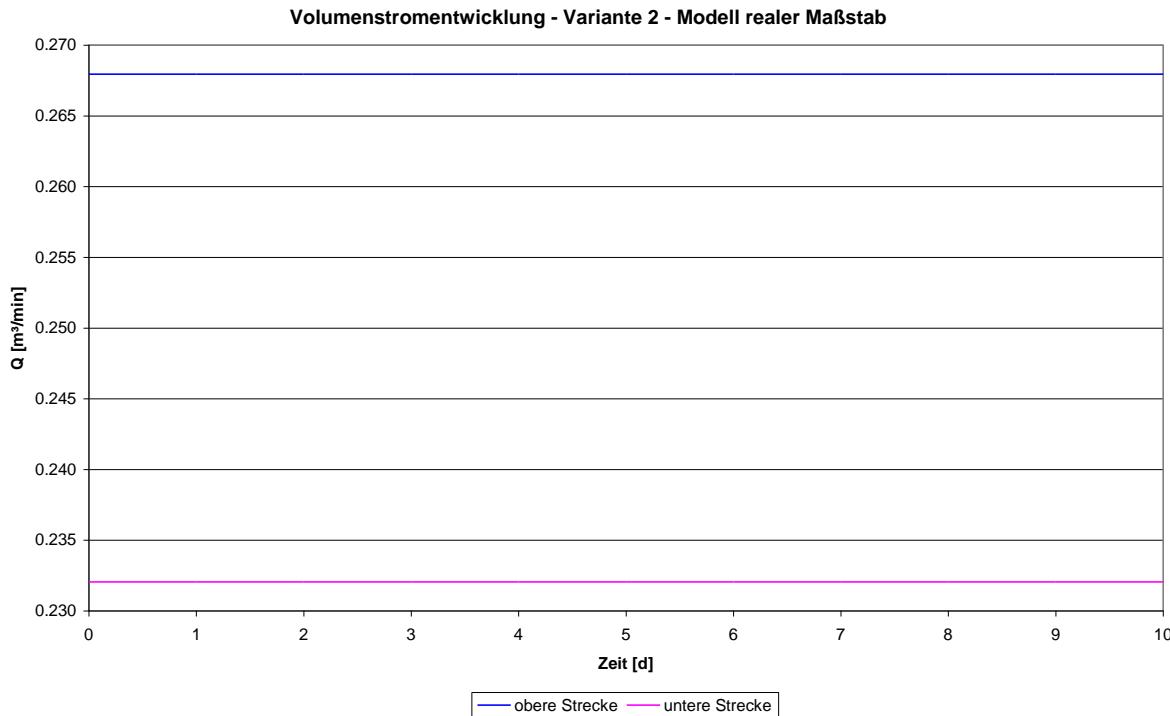


Abbildung 156: Variante 2 – Modell realer Maßstab: Volumenstromentwicklung

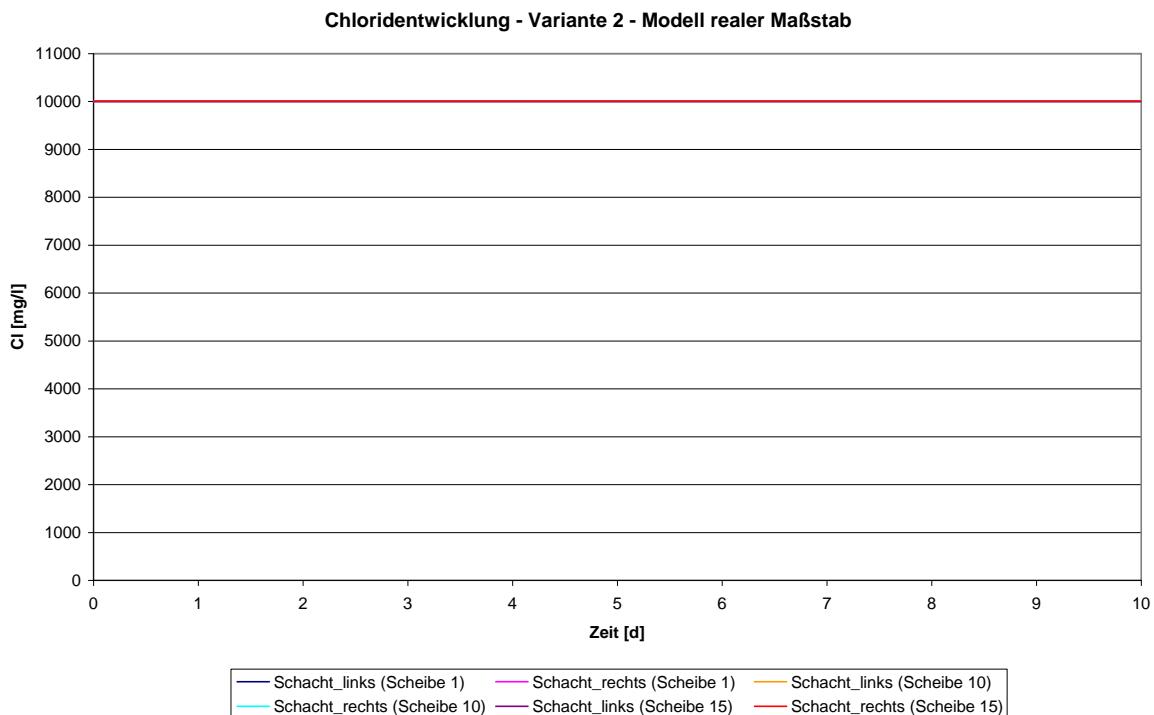


Abbildung 157: Variante 2 – Modell realer Maßstab: Chloridentwicklung

#### 5.2.4.4 Variante 3

Instationäre Rechnung mit gleicher Dichte in den Modellscheiben 1 bis 12 und erhöhter Dichte in den Modellscheiben 13 bis 16:

Hierbei soll die Wirkung unterschiedlicher Konzentrationen im oberen und unteren Teil des Modells untersucht werden. Dafür wurden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

- 1. - 12. Modellscheibe 1.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- 13. - 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Startkonzentration
- Speisungsmenge 500 L/min

Es zeigt sich, dass bei diesem hohen Mineralisationsunterschied von 9.000 mg/L von Beginn an die gesamte eingespeiste Wassermenge durch die obere Verbindung fließt (Abbildung 159). Das ist der wesentliche Unterschied zur Strömungsmodellierung ohne Dichte.

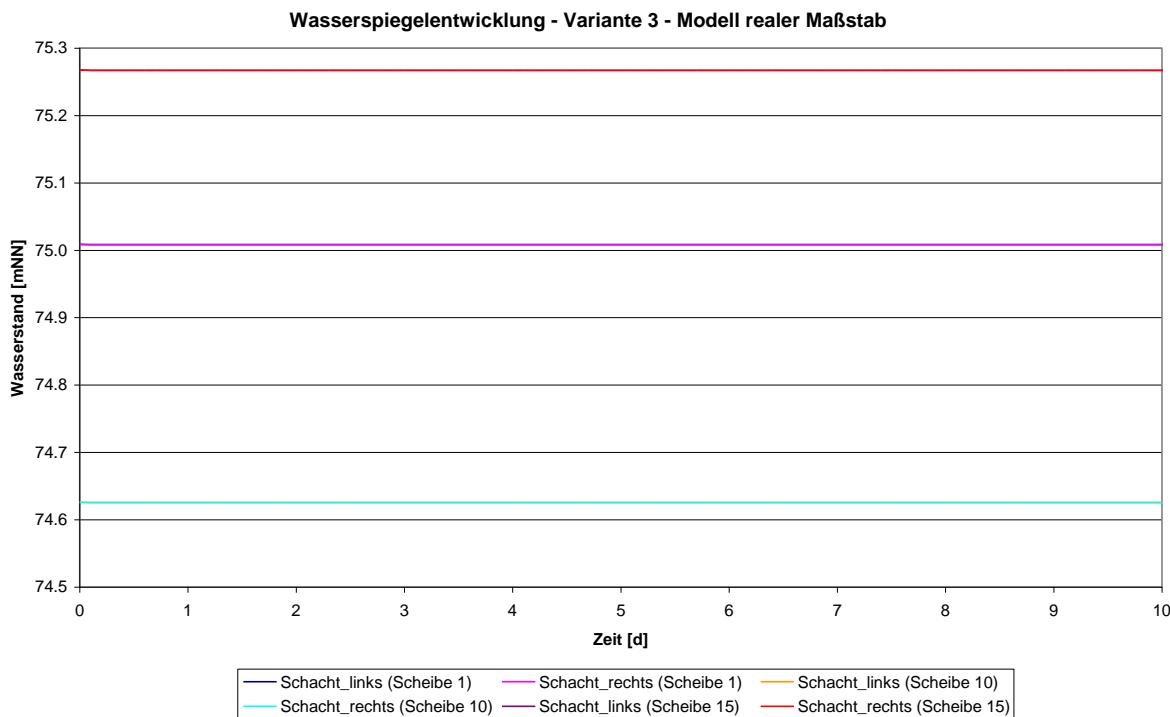


Abbildung 158: Variante 3 - Modell realer Maßstab: Wasserspiegelentwicklung

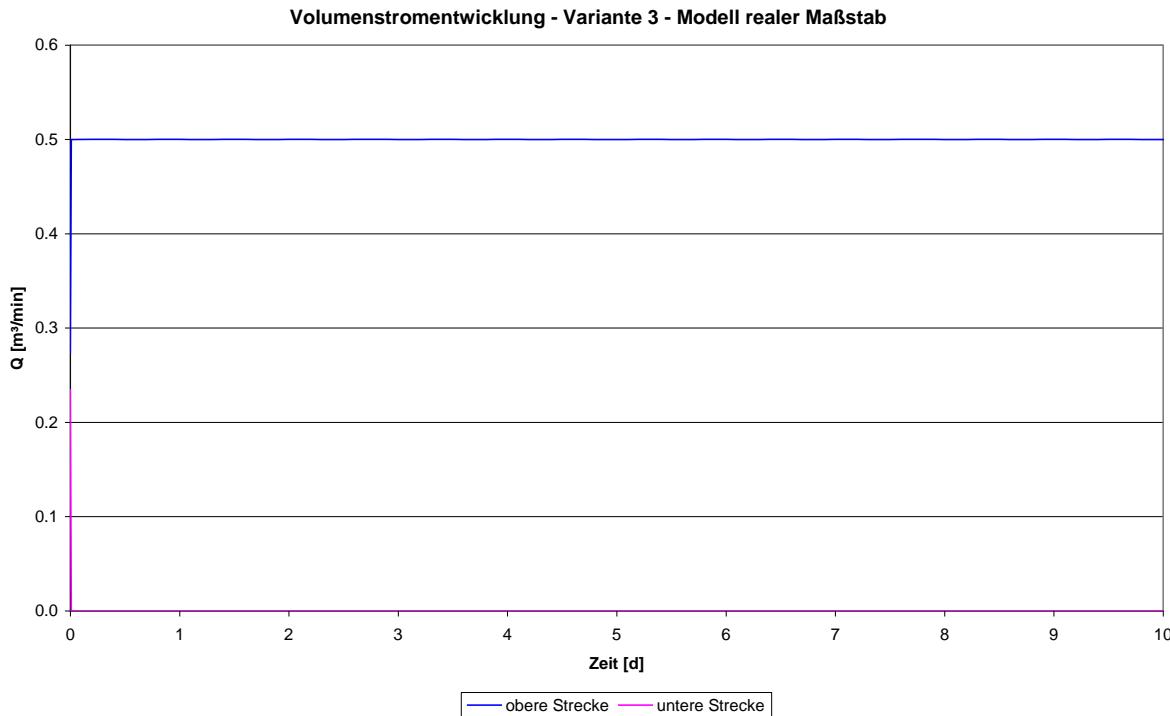


Abbildung 159: Variante 3 - Modell realer Maßstab: Volumenstromentwicklung

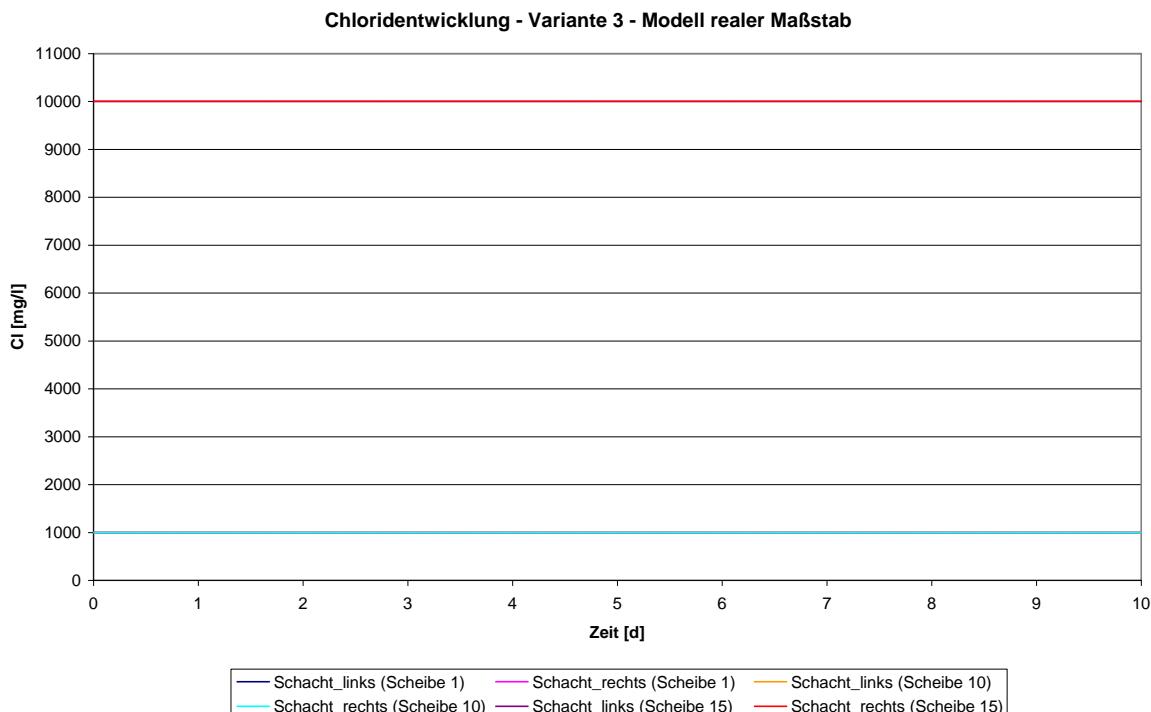


Abbildung 160: Variante 3 - Modell realer Maßstab: Chloridentwicklung

#### 5.2.4.5 Variante 4

Die schrittweise Veränderung der Dichteunterschiede im oberen und unteren Teil des Modells, beginnend mit gleicher Dichte, soll aufzeigen, wann der Volumenstrom im Modell umschlägt, das heißt es fließt alles durch die obere Verbindung. Dafür wurden folgende Ausgangsparameter gewählt:

- 1. - 12. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Ausgangskonzentration
- 13. - 16. Modellscheibe 10.000 mg/L Chlorid Ausgangskonzentration und schrittweise Erhöhung der Konzentration
- Speisungsmenge 500 L/min

Es zeigt sich, dass bei einem Dichteunterschied von ca. 5 mg/L die gesamte eingespeiste Wassermenge von 500 L/min nur noch durch die obere Verbindung fließt, wobei der Umschlag sprunghaft stattfindet (Abbildung 161). Im physikalischen Modell (Kap. 4.5.2.3.5) lag der „Umkippunkt“ bei einer Speisungsmenge von 1 L/min (Variante 4a) bei einem Dichteunterschied von ca. 1,5 mg/L und bei einer Speisungsmenge von 10 L/min (Variante 4b) bei ca. 155,5 mg/L.

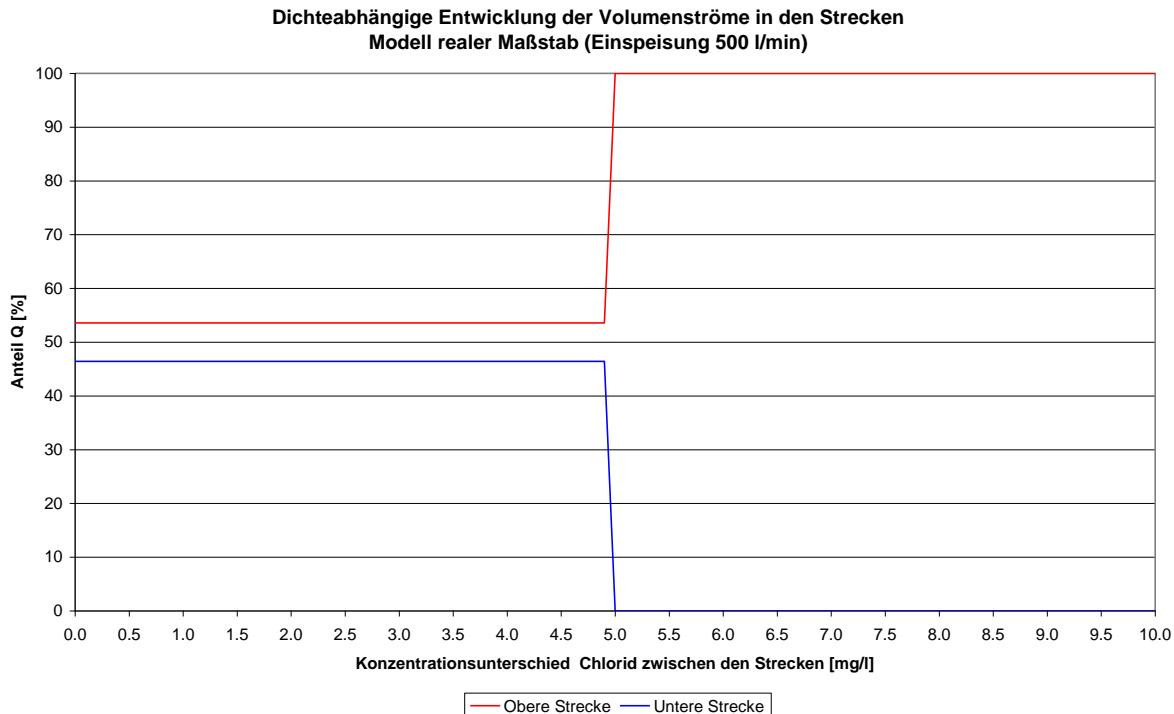


Abbildung 161: Variante 4 - Modell realer Maßstab: Dichteabhängige Entwicklung der Volumenströme

### 5.3 Fazit realer Maßstab

Im Rahmen der CFD-Berechnungen wurde über eine Gitterstudie die für diese Modellgröße erforderliche Gitterauflösung ermittelt. Dazu wurden 3 Varianten für reale Grubengrößenordnungen erstellt, die sich nur hinsichtlich der Gitterauflösung in den Schacht- und Sohlenbereichen unterscheiden. Die Modellierungen zeigten starke Abhängigkeiten der Rechenergebnisse von den gewählten Zeitschrittweiten, der Festlegung des Konvergenzkriteriums und der Mindestanzahl an inneren Iterationsschritten pro Zeitschritt. Es stellte sich heraus, dass für den Fall des Berechnungsgitters mit Knotenabstand  $\leq 10$  cm ein konservativeres Kriterium zur Erhaltung der adaptiven Zeitschrittweite gewählt werden muss als bislang praktiziert. Die damit zwangswise einhergehende Einstellung insgesamt kleinerer Zeitschrittweiten im Bereich von ca. 0,5 Sekunden für den Berechnungslauf mit daraus resultierender Steigerung der Berechnungszeit führte zu der Erkenntnis, dass dieser Rechenaufwand mit der vorhandenen, aktuellen Hardwareausstattung nicht mehr leistbar war.

Die hier durchgeführten Boxmodell-Tests zeigen die gleichen Ergebnisse und Trends wie in den Ausgangsuntersuchungen mit Dimensionierung des Schachtsystems im Labormaßstab (Kap. 4). Bei Rechnungen ohne Dichteefekte strömt das aufgegebene Wasser in nahezu gleichen Anteilen durch die obere und untere Strecke. Bei Erhöhung der Dichte im unteren Teil der Schächte strömt das Wasser nur noch durch die obere Verbindung. Das ist der grundlegende Effekt der Dichtschichtung. Es zeigt sich auch, dass diese Dichteefekte bereits bei sehr kleinen Konzentrationsunterschieden, hier ca. 5 mg/L, wirksam werden (Umschlagpunkt). Dies liegt daran, dass die Strecken und Schächte nur sehr kleine Strömungswiderstände besitzen und bereits kleinste Triebkräfte zum Umschlag der Strömung führen. Diese Aussage sollte allerdings nicht einfach verallgemeinert werden. In der Praxis treten solche ungestörten, idealen Strömungsverhältnisse nicht auf. So wird das Strömungsregime von zahlreichen instationären Effekten überprägt und hinzu kommen auch noch die Effekte der Doppeldiffusion, die den Dichteefekten entgegenwirken.

## 6 Einfaches Feldbeispiel (Schacht Hermann)

### 6.1 Allgemeines

Ein relativ einfaches reales Beispiel, was die Schichtungsstruktur aber auch das Grubengebäude (Umfang, Ausrichtung) angeht, findet sich auf der zwischen 1909 und 1926 fördernden Zeche Hermann der Gewerkschaft Hermann V GmbH im nördlichen Ruhr-Revier bei Selm. Das isoliert von anderen Bergwerken stehende Grubengebäude wurde durch 2 ca. 975 m tiefe Schächte (Hermann 1 u. 2) und 3 Sohlen, die 1. Tiefbausohle (TBS) oder 850 m-Sohle, die 2. TBS (950 mS) und die 3. TBS<sup>5</sup> (1050 mS) in rd. -785, -885 u. -985 mNN aufgeschlossen. Die beiden rd. 80 m voneinander entfernt stehenden Schächte sind bis heute bis auf die tagesnahen Abdeckungen unverfüllt und wurden durch das jeweils vorhandene, in etwa zentral gelegene Bohrloch in der Abdeckung bereits mehrmals mittels Sal/Temp-Messungen und anderen untersucht und die vorgefundenen Zustände unter Zuhilfenahme der recherchierten Wasserzuflüsse mittels CFD simuliert, zuletzt in /4/ (vgl. Kap. 6.2).

Der Wasserspiegel lag etwa 320 m (ca. -254,5 mNN) unterhalb der Geländeoberfläche. Die Schachtwassersäule wird seit Jahren durch einen markanten Temperatur- und Mineralisationssprung in 850 m Tiefe (= 850 mS) in zwei Wasserkörper getrennt: oben kühles, gering mineralisiertes Süßwasser und unten warmes, hoch konzentriertes Salzwasser (Abbildung 162). Der untere Wasserkörper lässt sich, bei ähnlicher Gesamtmineralisation und Temperatur, noch in einen sulfathaltigen oberen und einen bariumhaltigen unteren Abschnitt teilen (Tabelle 20).

Nach Einstellung der Wasserhaltung 1926 erfolgte die Flutung der Grube mit den hoch mineralisierten bariumhaltigen Tiefenwässern aus dem Karbon und den ebenfalls hoch mineralisierten, aber sulfathaltigen Wässern aus dem unteren Kluftgrundwasserstockwerk des Deckgebirges. Auf dieses dann in den Schächten bis weit oberhalb der 850 m-Sohle aufsteigende Salzwasser setzte sich eine geringer mineralisierte „Süßwasserkappe“ auf, die gespeist wurde von allgemeinen Schachtundichtigkeiten im tagesnahen Bereich. Im Laufe der Jahrzehnte hat die kontinuierliche weitere Zufuhr von gering mineralisiertem Wasser (Druckerhöhung) das in den Schächten anstehende Salzwasser bis zur ersten Möglichkeit des Abflus-

<sup>5</sup> Die 3. TBS wurde 1918 über ein Gesenk ab der 2. Sohle angesetzt, 1923 erfolgte der Anschluss über den bis ca. 1078 m tiefer geteuften Schacht 1.

ses, d. h. bis zur 850 m-Sohle, und von dort über das zerrüttete Gebirge in den Kluftgrundwasserleiter des Cenoman/Turon zurückgedrängt.

Tabelle 20: Mineralisation (mg/L) und Wassertemperatur (°C) im Schacht Hermann 2

Teufe [m]	Hermann 2	
	1994	1998
350	Abdampfrückst.	4.380
	Cl	2.320
	Ba	1
	SO <sub>4</sub>	137
	Temp.	31,4
830	Abdampfrückst.	4.120 4.920
	Cl	2.000 2.440
	Ba	1 < 1
	SO <sub>4</sub>	155 135
	Temp.	31,7 31,9
880	Abdampfrückst.	143.000 148.300
	Cl	81.200 82.000
	Ba	13 11
	SO <sub>4</sub>	165 128
	Temp.	38,9 39,0
920	Abdampfrückst.	171.100 168.300
	Cl	92.200 93.400
	Ba	1.460 1.480
	SO <sub>4</sub>	< 1 < 5
	Temp.	43,4 39,7

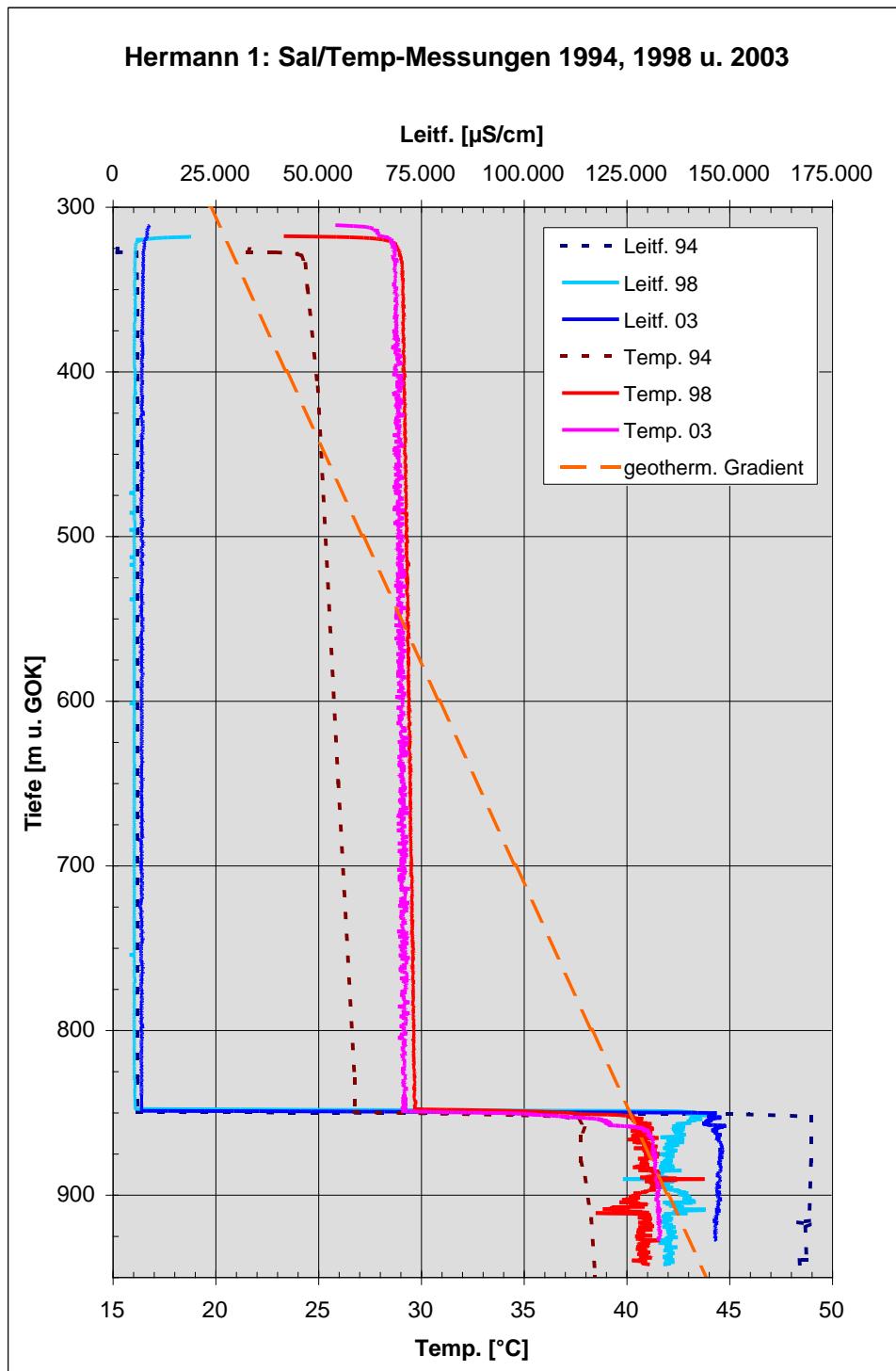


Abbildung 162: Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen im Schacht Hermann 1

## 6.2 CFD-Berechnungen

Ziel der Simulationen war, die gemessenen Grubenwasserverhältnisse modelltechnisch nachzuvollziehen /4/. In diesem Sinne wurde eine Kalibrierung des Modells Schacht Hermann 1 vorgenommen. Es stellte sich heraus, dass die richtige Wahl der Zufluss-Randbedingungen von größter Bedeutung für die Modellrechnungen und somit auch für die Qualität der Kalibrierung war. Die Kalibrierungsrechnungen wurden schwerpunktmäßig stationär angerechnet. Unabhängig von Konvergenzproblemen bei stationärer Berechnungsmethodik zeigten sich jedoch schnell die Eignung bzw. auch die spezifischen Probleme bei der Definition unterschiedlicher Randbedingungen. Die Kalibrierungsrechnungen wurden schwerpunktmäßig stationär angerechnet. Der Referenzfall, d. h. der Fall, welcher eine sinnvolle Übereinstimmung mit den beobachteten realen Vorgängen versprach, wurde aus Gründen der numerischen Stabilität mit instationärer Methodik berechnet. Die Simulationszeit (stets mehrere Stunden) wurde ausreichend lang gewählt, dass sich mittlere quasistationäre Strömungsverhältnisse eingestellt haben. Die Ergebnisse können somit als unter Langzeitbedingungen in etwa zu erwartende Endzustände der Grubenwassersituation gewertet werden.

### 6.2.1 Modellaufbau und Randbedingungen

Modellaufbau und Randbedingungen richteten sich nach den tatsächlichen Verhältnissen und sind in Abbildung 163 und Abbildung 164 schematisch wiedergegeben. Wie bereits oben erwähnt, hatten sich die Zufluss-Randbedingungen als entscheidende Kalibriergröße herausgestellt.

Der Initialzustand orientierte sich an den Messungen im Schacht: In Höhe der 850 m-Sohle erfolgte ein Sprung des Salzgehalts von 5.000 mg/L auf 170.000 mg/L. Ferner wurde an dieser Stelle ein Temperatursprung von 29 °C auf 41 °C definiert.

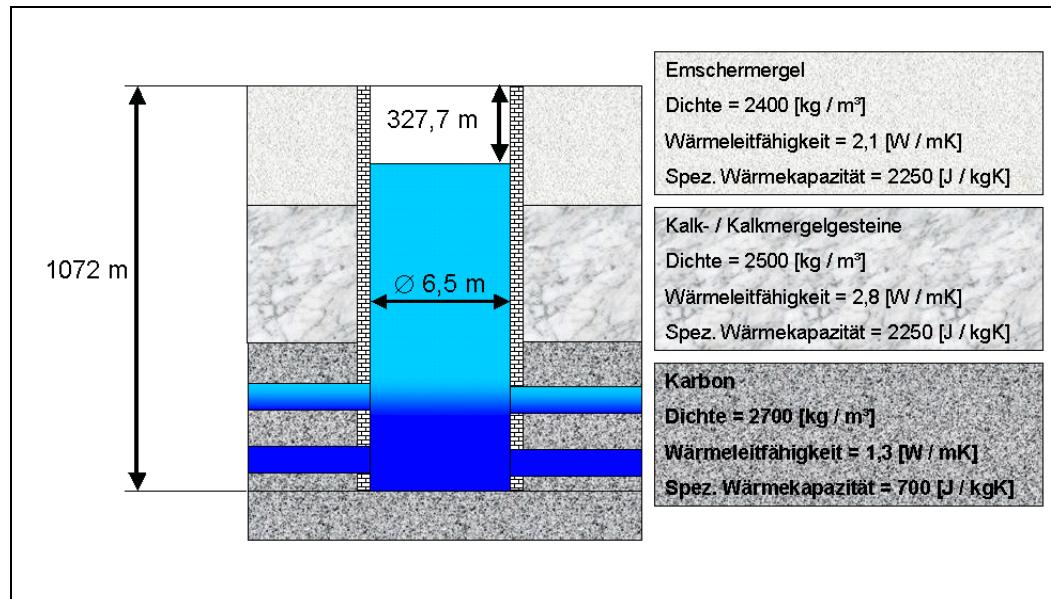


Abbildung 163: Schacht Hermann 1: Abmessungen und Materialdaten

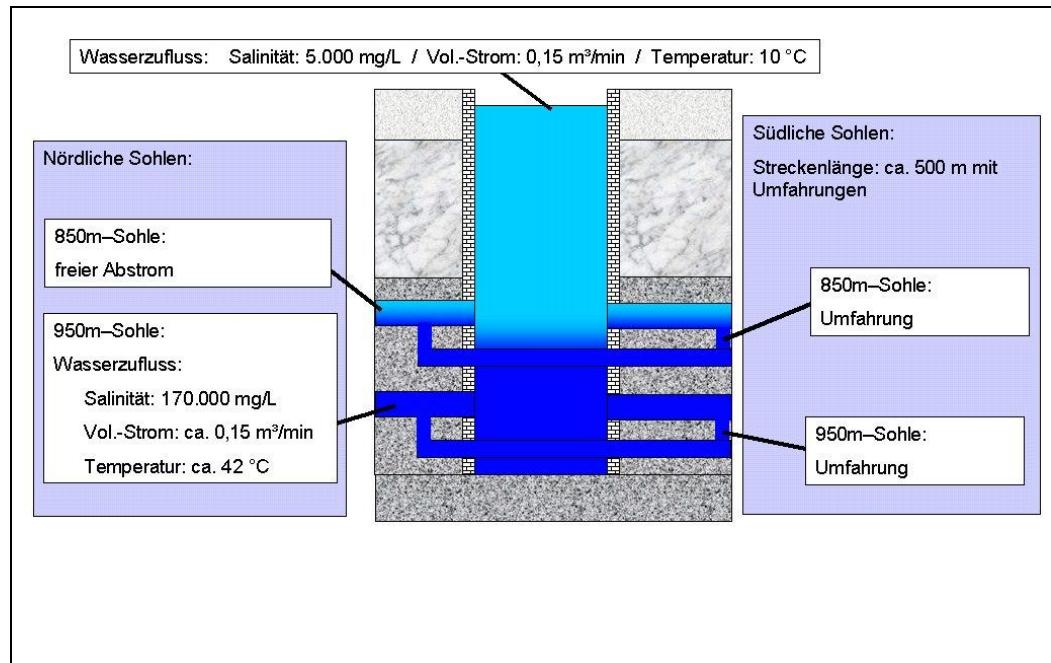


Abbildung 164: Schacht Hermann 1: Randbedingungen

## 6.2.2 Ergebnisse

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die instationär berechneten Zustände nach ca. drei Stunden im Ausschnitt für den Bereich der 850 m-Sohle.

Deutlich zu erkennen ist für den dargestellten Zeitraum eine Sprungschicht in Höhe der 850 m-Sohle, ausgedrückt durch einen Sprung der Salzkonzentration (Abbildung 165) und der Temperatur (Abbildung 166, Abbildung 167).

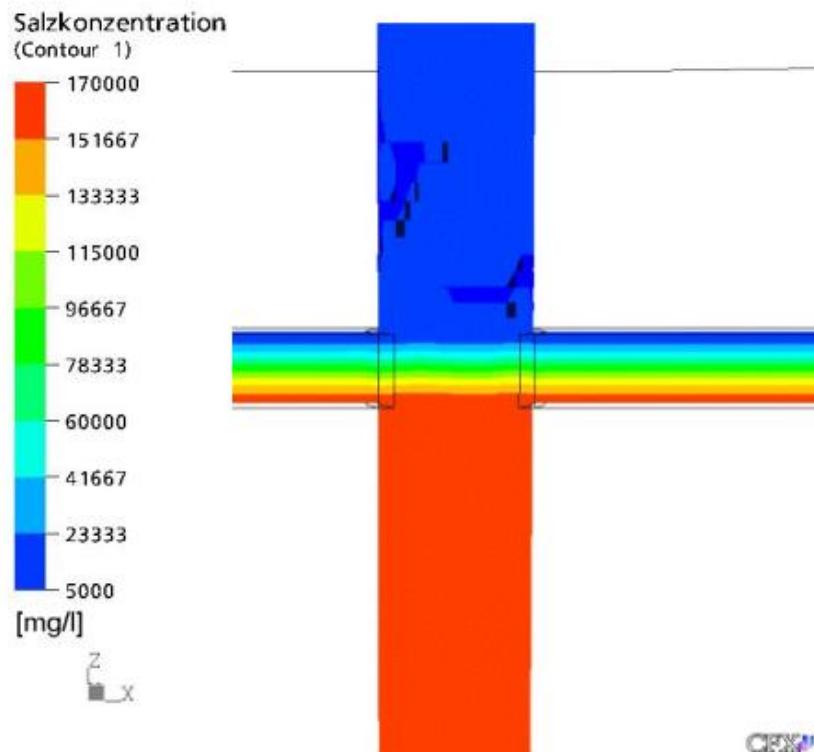


Abbildung 165: Schacht Hermann 1: Salzkonzentration nach ca. 3 Std.

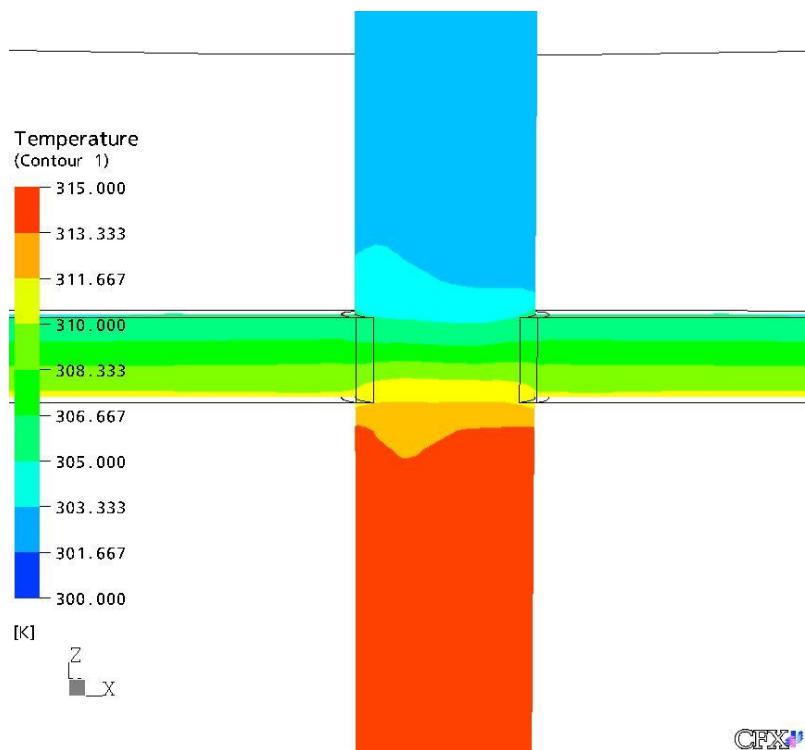


Abbildung 166: Schacht Hermann 1: Wassertemperatur nach ca. 3 Std.

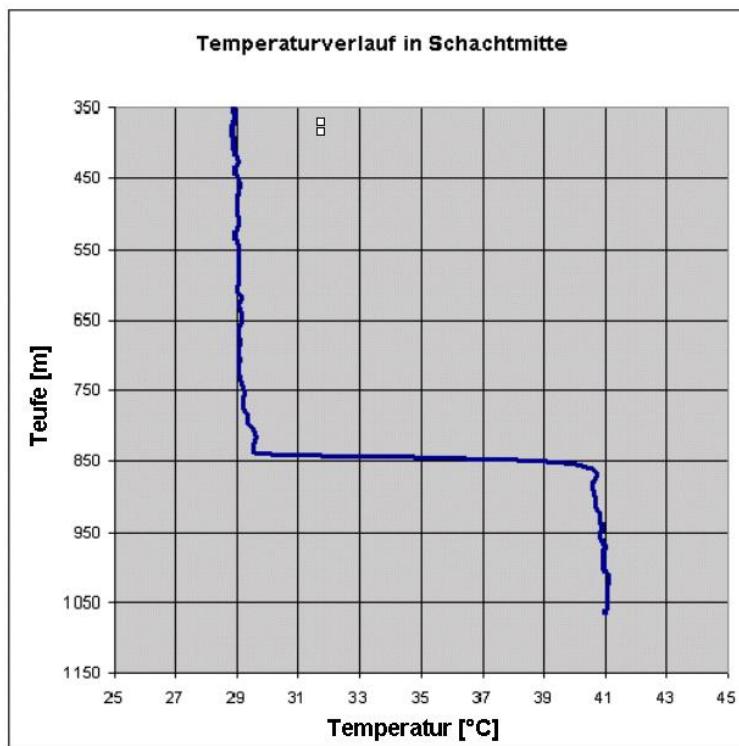


Abbildung 167: Schacht Hermann 1: Wassertemperatur in Schachtmitte nach ca. 3 Std.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die CFD-Modellkalibrierung zu einer guten Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messdaten geführt hat. Als besonders wichtig hatte sich dabei herausgestellt, auch das angeschlossene Grubengebäude bei den Modellrechnungen in seiner Wirkung auf die dem Schacht zufließenden bzw. aus dem Schacht abfließenden Wassermengen zu berücksichtigen. Das Modell ließ sich gut mit Zuflussraten von 0,15 m<sup>3</sup>/min sowohl vom Schachtkopf als auch über die 950 m-Sohle kalibrieren, wobei das Verhältnis dieser beiden Zustromraten im Vordergrund steht. Die absoluten Zustromraten können durchaus etwas größer oder auch geringer sein, solange bezüglich des Verhältnisses bei der Volumenströme näherungsweise eine Ausgeglichenheit herrscht. Erst durch Ansetzen dieser Zuflüsse konnte mit dem Modell eine eng begrenzte Sprungschicht im Bereich des Anschlusses der 850 m-Sohle erzeugt werden. Diese Überlegungen/Ergebnisse passen im Übrigen zu den Resultaten der Technikumsversuche, nach denen Zuflüsse stabilisierend auf die Schichtung wirken.

Anzumerken sind die trotz parallelisierter Berechnungsmethodik und Nutzung eines Rechen-Clusters langen Rechenzeiten von mehreren Tagen für die Berechnung eines Zeitintervalls von wenigen Stunden, die auf die Größe des Berechnungsmodells (Anzahl der Rechenknoten größer 1,15 Mio.) zurückzuführen sind.

### 6.3 Umsetzung ins Boxmodell

Das bereits am physikalischen Modell (Kap. 4.5) und am realen Maßstab (Kap. 5.2) erprobte Boxmodell wird nun den tatsächlichen Verhältnissen in den Hermann-Schächten angepasst, um die Schichtungssimulationen der Grubenwasserverhältnisse durchzuführen.

#### 6.3.1 Ausgangsdaten und Modellaufbau

Die modelltechnischen Maße für die Box-Simulation orientieren sich an den realen Abmessungen der Schächte, den Erkenntnissen aus den Felduntersuchungen (Kap. 6.1) und den CFD-Simulationen (Kap. 6.2):

- Die Geländeoberkante wurde vereinfachend bei 100 mNN definiert
- Die Schachttiefe beträgt jeweils 1.050 m, unterteilt in je 15 Boxen (Scheiben); bis -500 mNN beträgt die Scheibenmächtigkeit jeweils 100 m, darunter jeweils 50 m

- Die Boxen repräsentieren symbolisch ein Grubenfeld mit einer Fläche von 3,87 km<sup>2</sup>
- Für jede Scheibe wird in beiden Schächten ein offenes Schachtvolumen von 20 m<sup>3</sup>/m definiert
- Die vertikale Verbindung der einzelnen Boxen (Schächte) wird mittels eines Leakage-Ansatzes realisiert; der Leakage-Koeffizient beträgt 1e-7 1/s
- Die Sohlen befinden sich auf -784,5 mNN (1. TBS 850 mS) und -884,5 mNN (2. TBS 950 mS)
- Diese horizontalen Verbindungen (2 Strecken) sind mit einem Leitwert von 1e-4 m<sup>2</sup>/s belegt
- Der freie Frischwasserspiegel wurde bei 90 mNN definiert
- In beiden Schächten wurde ein freier Ablauf bei -734 mNN als Festpotential definiert
- Die Speisungsmenge im linken und rechten Schacht beträgt oben (1. Scheibe) sowie unten (15. Scheibe) jeweils 150 L/min
- Die Zulaufwässer in der 1. Scheibe sind mit einer Temperatur von 10 °C und einem Chloridgehalt von 500 mg/L belegt, die Zulaufwässer in der untersten Scheibe mit einer Temperatur von 20 °C und einem Chloridgehalt von 100.000 mg/L (Startwerte)
- Für die obersten Scheiben (linker und rechter Schacht) wurde eine Grundwassererneubildung von jeweils 1 mm/a definiert
- Die Schachtwassersäulen werden in beiden Schächten durch einen markanten Temperatur- und Mineralisationssprung bei -750 mNN geteilt:
  - Von 90 mNN bis -750 mNN wurde der Chemie-Typ C2 mit den folgenden Parametern eingestellt:
    - Chlorid: 500 mg/L
    - Temperatur: 20 °C
  - Von -750 mNN bis -950 mNN wurde der Chemie-Typ C1 mit den folgenden Parametern eingestellt:
    - Chlorid: 100.000 mg/L
    - Temperatur: 45 °C

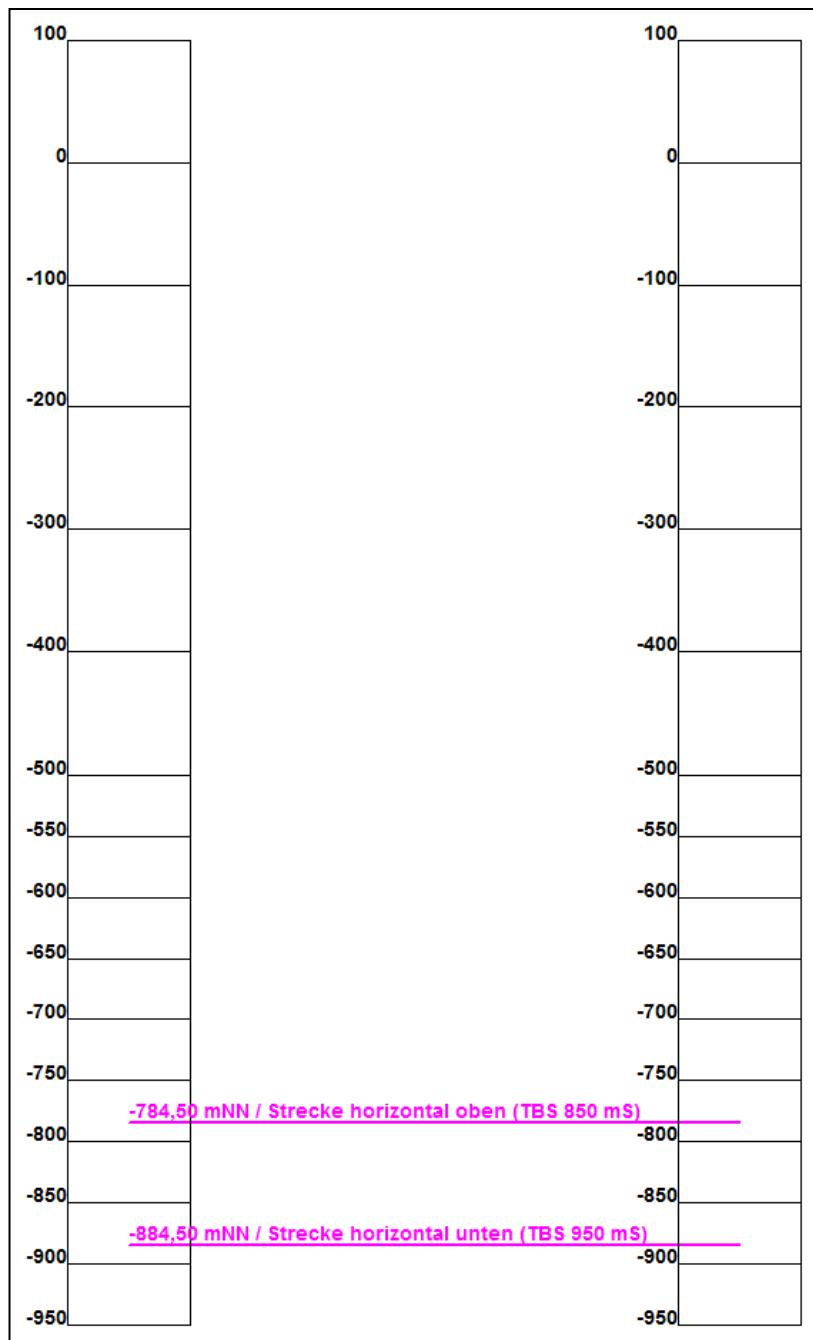


Abbildung 168: Seitenansicht Boxmodell Hermann Scht. 1 u. 2: 15 Scheiben  
(Höhenangaben in mNN)

### 6.3.2 Ergebnisse

Wie das Ergebnis der Box-Simulation am Beispiel der Mineralisation zeigt (Abbildung 169, Simulationszeit 1.000 Tage), werden die tatsächlichen Verhältnisse wie homogene Wasserkörper, scharfer Mineralisationssprung in der 12. Scheibe (850 mS) mit geringer Mineralisation oben und hoher Mineralisation unten sehr gut abgebildet, d. h. die im Laufe dieses FuE-Projektes getätigten Modellanpassungen wie z. B. die Einbindung der Doppeldiffusion oder der Wärmetransport sind geeignet, diese realen Verhältnisse abzubilden. Einschränkend muss gesagt werden, dass leider kein anspruchsvollerer messtechnischer Vergleich zur Verfügung steht, welcher z. B. das zeitliche Verhalten einer Aussüttung beschreiben lässt. Bei diesem Beispiel werden zeitlich konstante Verhältnisse reproduziert - auch wenn die Rechnung im Hintergrund instationär läuft.

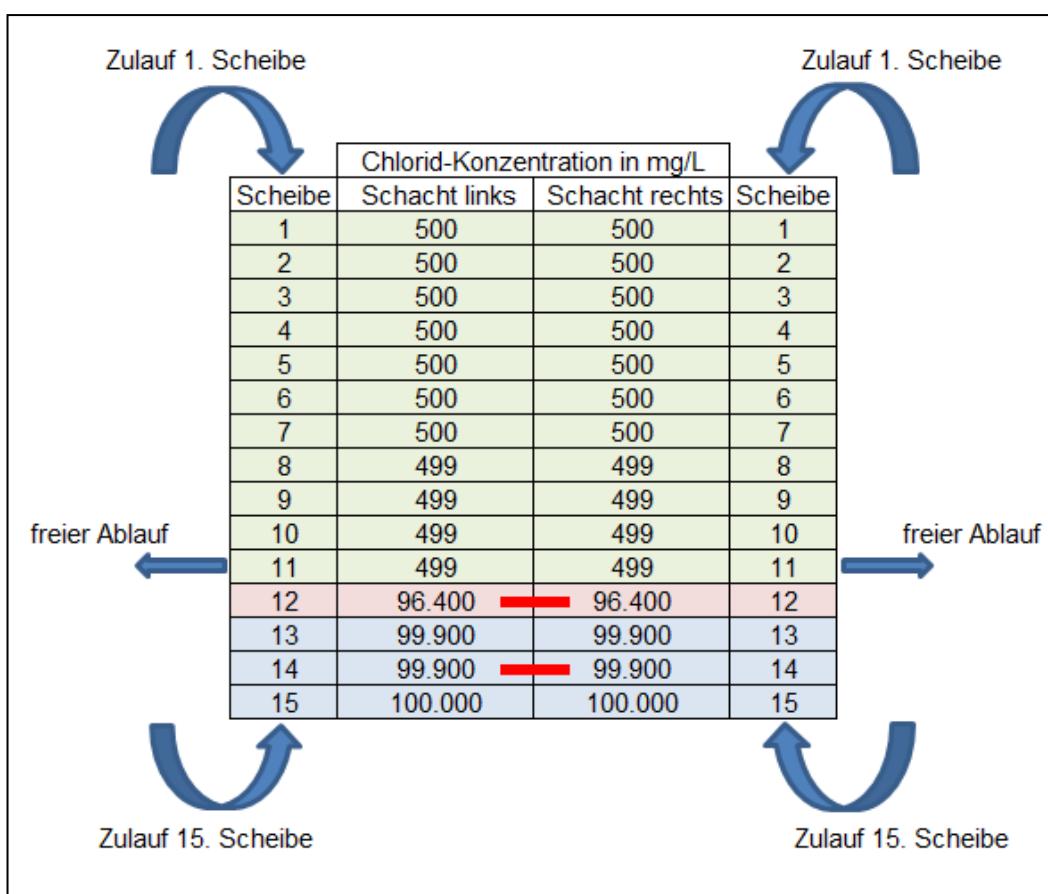


Abbildung 169: Chlorid-Konzentrationen in den Hermann-Schächten nach 1.000 Tagen

## 6.4 Fazit einfaches Feldbeispiel

Die CFD-Modellkalibrierung führte zu einer guten Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messdaten. Als besonders wichtig hatte sich dabei herausgestellt, auch das angeschlossene Grubengebäude bei den Modellrechnungen in seiner Wirkung auf die dem Schacht zufließenden bzw. aus dem Schacht abfließenden Wassermengen zu berücksichtigen, wobei das (ausgeglichene) Verhältnis dieser beiden Zu- bzw. Abstromraten im Vordergrund steht. Erst durch Ansetzen dieser Zuflüsse konnte mit dem Modell eine eng begrenzte Sprungschicht im Bereich des Anschlusses der 850 m-Sohle erzeugt werden. Die trotz parallelisierter Berechnungsmethodik und Benutzung eines Rechen-Clusters langen Rechenzeiten von mehreren Tagen für die Berechnung eines Zeitintervalls von drei Stunden zeigen allerdings die engen Grenzen bzw. die unzureichende Praktikabilität dieser Modellierung auf.

Auch in der Box-Simulation konnten die tatsächlichen Verhältnisse gut abgebildet werden. Einschränkend muss allerdings gesagt werden, dass leider kein anspruchsvollerer messtechnischer Vergleich zur Verfügung steht, der z. B. das zeitliche Verhalten einer Aussüßung aufzeigt. Bei diesem Beispiel werden zeitlich konstante Verhältnisse reproduziert - auch wenn die Rechnung im Hintergrund instationär läuft.

## 7 Modellanwendungen im Feldbeispiel Bergwerk Ost

Das Boxmodell der Wasserprovinz Bergwerk (BW) Ost, als Teil des Gesamtmodells Boxmodell Ruhr, besteht aus 20 Einzelboxen bzw. Grubenfeldern, die vertikal zwischen den Höhenniveaus von +50 bis -1400 mNN auf 26 Modellscheiben unterteilt sind (Abbildung 170 u. Abbildung 171). Die Gesamtfläche aller Boxen beträgt ca. 440,5 km<sup>2</sup>. Die Einzelflächen je Box sind aus Tabelle 21 ersichtlich. Die im Folgenden ebenfalls aufgeführte Box Königsborn ist isoliert, da die Verbindung nach Heinrich Robert mit einem 100 bar-Damm abgedichtet ist.

Tabelle 21: Boxnamen und Flächen BW Ost

Box	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Fläche [km <sup>2</sup> ]
Hansa	14360782	14,36
Kurl1	14314311	14,31
Scharnhorst	4202146	4,20
Haus_Aden_Nord	40147268	40,15
Werne	31199642	31,20
Grillo	28845802	28,85
Heinrich_Robert	41066840	41,07
Radbod	19512354	19,51
Provinz_S74_10	9955773	9,96
Königsborn	32602566	32,60
Gneisenau	7608404	7,61
Victoria_1-2	15633224	15,63
Haus_Aden	16382096	16,38
Kurl	16639356	16,64
Minister_Stein	21749114	21,75
Victoria_3-4	11388864	11,39
Kaiserstuhl	15164713	15,16
Monopol_N	15885202	15,89
Donar	81534584	81,53
Kurl3	2321120	2,32
<b>gesamt</b>	<b>440514160</b>	<b>440,51</b>

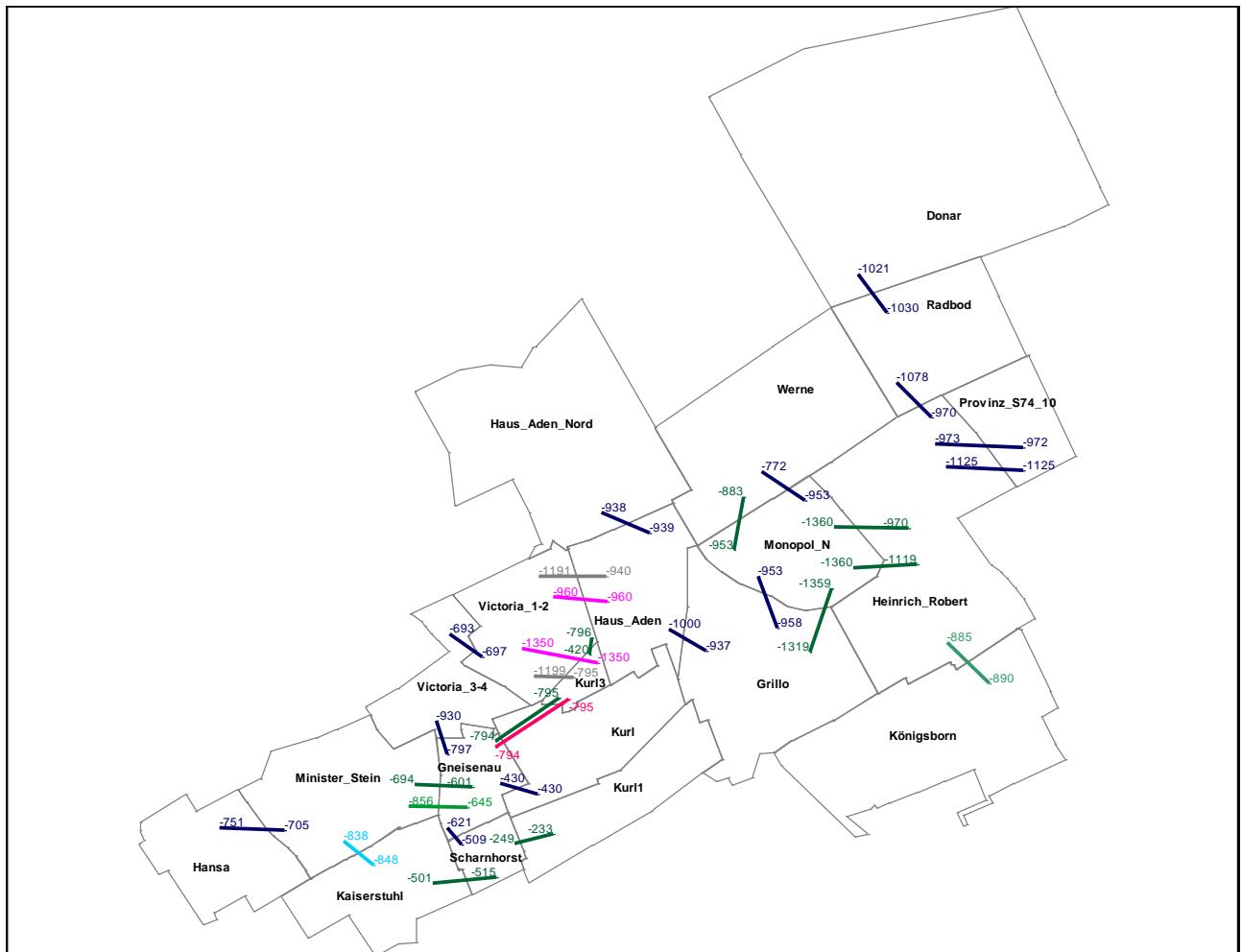


Abbildung 170: BW Ost: Boxen und Verbindungen

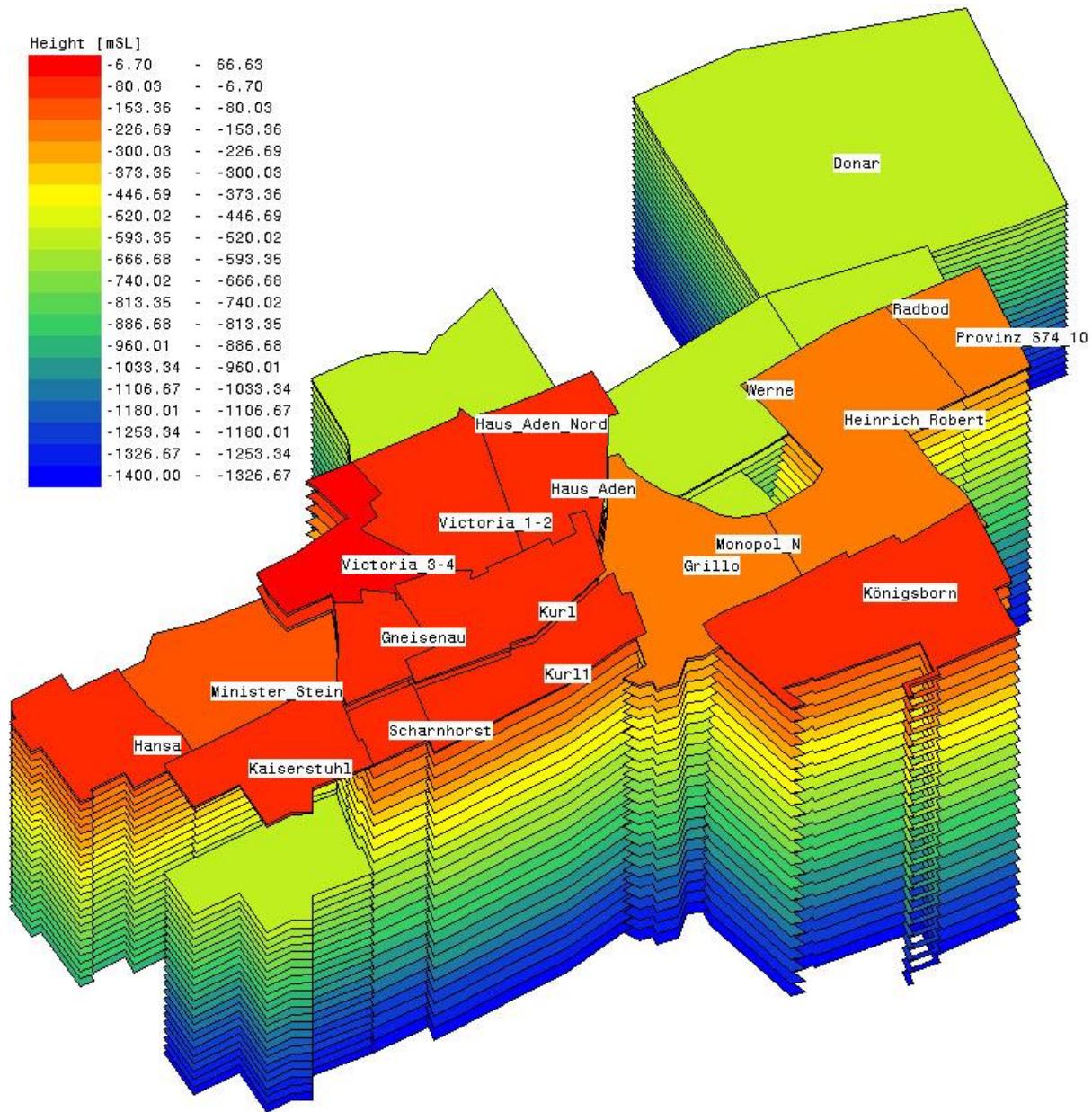


Abbildung 171: BW Ost: Vertikaler Modellaufbau (Unterkanten in mNN)

Das Pumpniveau der Grubenwässer im Flutungsendstand beträgt in der Wasserhaltung Haus Aden -683 mNN, wobei der Filter der Tauchmotorpumpe bei -713 mNN liegt. Die Pumprate beträgt im stationären Zustand ca. 25 m<sup>3</sup>/min.

Die Zuflussmengen und die dazugehörigen chemischen Qualitäten werden über sogenannte Randzuflüsse im Modell implementiert. Dabei kann jede Box bzw. Scheibe mit verschiedenen teufenabhängigen Zulaufmengen

und den dazugehörigen Chemietypen bestückt werden. Die Chemietyp-Nummer steht dabei für die chemische Zusammensetzung der Wässer, welche aus einer externen Datei gelesen werden (z. B. „liquid-Rand1031.dat“). Die Tabelle 22 zeigt die Randzuläufe mit Zulaufniveau, Zulaufmenge und den hierfür zugeordneten Chemietyp am Beispiel BW Ost.

Tabelle 22: Übersicht Randzuläufe BW Ost

Nr.	Boxname / Beschreibung	Zulaufniveau [mNN]	Scheibe	Zulaufmenge [m³/min]	Nr. liquid Chemietyp
1	Gneisenau Zufluss 5. Sohle	-115	4	4,300	1081
2	Gneisenau Damm Grevel	-115	4	6,500	1081
3	Grillo Schacht1 Damm Ostbergfuss	-954	18	0,050	1022
4	Grillo Sohlenkeller Grimberg	-958	18	0,080	1023
5	Grillo Verbundberg Aden-Monopol	-975	19	0,020	1031
6	Grillo Mausegatt interner Zulauf	-1000	19	0,150	1029
7	Grillo Mausegatt interner Zulauf	-1085	21	0,030	1030
8	Hansa	-660	19	0,366	1140
9	Haus Aden BS 425	-700	14	0,040	1041
10	Haus Aden Kehre Band M2	-900	18	0,040	1045
11	Haus Aden Nord Wedewardt Z 1/2/7/3/4	-800	10	0,040	1241
12	Heinrich Robert Wasserlsg. KA-Str. So 202	-900	17	0,200	1007
13	Heinrich Robert Zufluss Schacht Lerche	-1000	19	0,080	1013
14	Heinrich Robert Pumpenlöcher Strecke	-1000	19	0,050	1014
15	Heinrich Robert Wasserlsg. Berg n. Helene 72-1	-1050	20	0,060	1009
16	Heinrich Robert Wasserprovinz BS 77-1	-1120	22	0,040	1012
17	Heinrich Robert Sammelwasser	-1120	22	0,300	1015
18	Heinrich Robert Geogene Zuläufe WP SO 304	-1170	23	0,190	1010
19	Kaiserstuhl	-930	14	1,070	1180
20	Kurl aus Bereich Mergelsohle	-200	6	3,500	1101
21	Kurl Abfluss von Kurl 4	-416	9	3,000	1102
22	Kurl1 Teilmenge Scharnhorst	-250	6	1,000	1121
23	Minister Stein	-660	17	0,760	1160
24	Monopol Nord Verbundberg Nord-Süd	-960	14	0,160	1025
25	Monopol Nord E2+E3	-1350	26	0,125	1028
26	Radbot Damm	-1056	17	0,350	1321
27	Scharnhorst Zufluss 5. Sohle	-430	9	1,500	1221
28	Victoria_1-2 Schachtbereich	-760	16	0,495	1062
29	Victoria_1-2 Schachtbereich Kurl 3	-1190	23	0,190	1063
30	Victoria_3-4 Sohle 8 Gneisenau	-240	6	0,600	1201
31	Werne Fl. Dicke Bank Damm Di 68-13	-785	9	0,200	1281
32	Werne	-800	10	0,510	1283
33	Werne Fl. Sonnenschein interner Zulauf	-800	10	0,600	1282

Es wurden im Rahmen dieses FuE-Projektes eine Vielzahl von Berechnungsvarianten getestet. Hauptproblem dabei war, dass das Modell bei

den Varianten mit Berücksichtigung der Dichteefekte noch nicht völlig schwingungsfrei arbeitet. Wir vermuten, dass dieser Effekt vor allem aus den nicht wassererfüllten Boxen und hydraulischen Verbindungen oberhalb des Flutungswasserspiegels resultiert. Dennoch konnten mit entsprechend kleinen Zeitschritten bilanztreue Rechenläufe generiert werden, die erste Aussagen über die prinzipielle Funktionstüchtigkeit und auch Trends bzgl. der Salzentwicklung zulassen. Wir möchten an dieser Stelle ausdrücklich darauf verweisen, dass diese Ergebnisse noch Entwicklungscharakter haben.

Abbildung 172 zeigt die Entwicklung der Chloridkonzentration als dem repräsentativen Vertreter des chemischen Spektrums bzgl. der Salzlast ohne und mit Berücksichtigung der Dichteschichtung. Dabei dokumentieren die Rechnungen die Konzentrationsentwicklung ab dem Einsetzen der Pumpe, aufgezeichnet direkt im Filterniveau der Pumpe (-713 mNN).

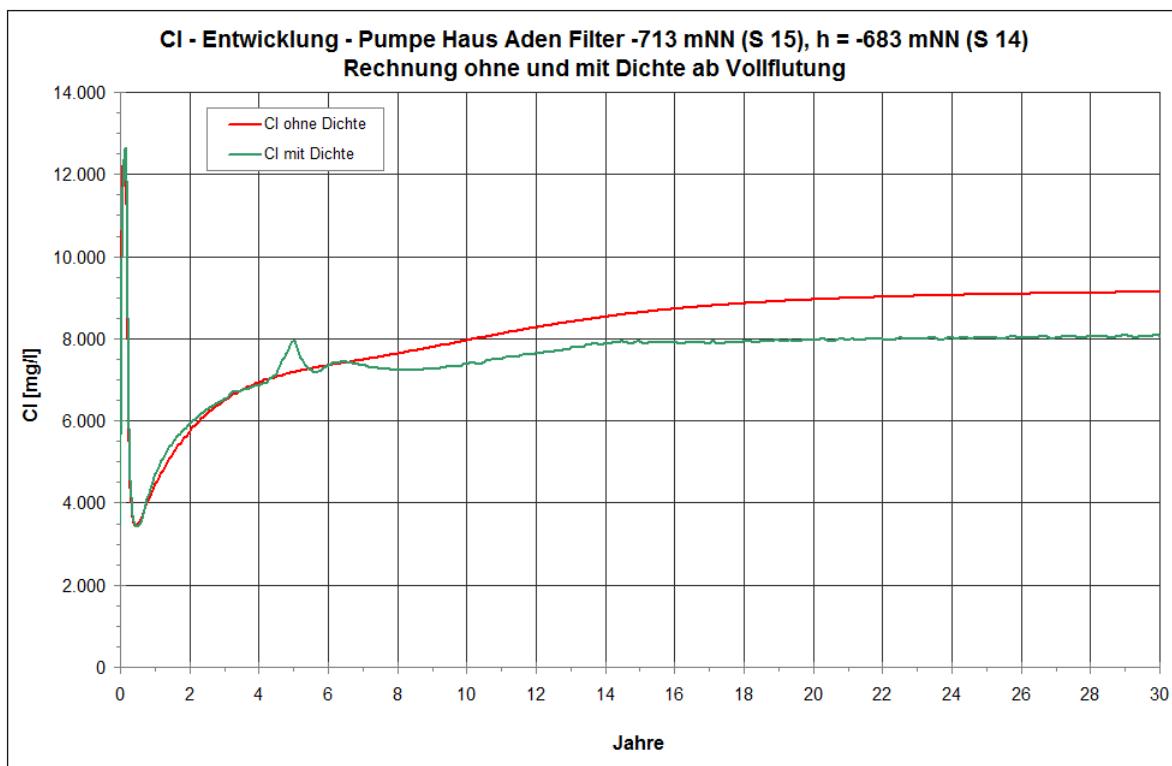


Abbildung 172: BW Ost: Chloridentwicklung ohne und mit Dichteschichtung

In der Variante ohne Berücksichtigung der Dichteschichtung erreichen die Chloridkonzentrationen ca. 9.000 mg/L, in der Variante mit Berücksichtigung der Dichteschichtung nur ca. 8.000 mg/L. Dass am Annahmepunkt nicht höhere Chloridkonzentrationen vorliegen und der Effekt nicht deutlicher ausfällt, liegt vermutlich daran, dass im Niveau der Pumpe die gro-

ßen, gering mineralisierten Volumenströme aus dem Bereich Gneisenau/Hansa mit ca. 20 m<sup>3</sup>/min hinzukommen, die den Gesamtaus-trag eindeutig prägen.

Der Bereich des Bergwerkes Ost, insbesondere der östliche Teil, ist durch eine recht geringe Auffahrungsdichte im Verhältnis zum westlichen Teil, aber auch im Vergleich zur Emschermulde gekennzeichnet. Es gibt nur wenige Grubenfelder, zwischen welchen es gut wasserleitende Verbindungen auf unterschiedlichen Höhenniveaus gibt. Damit kann das geringer mineralisierte – meistens von oben kommende – Wasser nur in Mischung mit dem hochaufkonzentrierten Tiefenwasser gemeinsam zum Entlastungspunkt der Pumpe fließen. Die Dichteefekte treten damit in diesem konkreten Fall zwar in den Hintergrund, der oben beschriebene Rückgang von 12,5 % in der Variante mit Dichteschichtung zeigt aber die grundlegende Wichtigkeit der Berücksichtigung der Dichteschichtung auf.

Bei der Auswertung der Ergebnisse fiel aber noch ein weiterer Punkt auf, welcher nicht endgültig bewertet ist: Das höher mineralisierte Wasser erzeugt aufgrund der schwereren Wassersäule einen höheren Druck im Tiefsten der Lagerstätte, im Modell ausgedrückt durch einen höheren äquivalenten Frischwasserspiegel. Ein höherer Druck oder Wasserspiegel bewirkt aber ein stärkeres Abdrücken der Randzuläufe, die abhängig von der Spiegeldifferenz „speisender Rand – Spiegel in der Box“ sind. Damit ist der Gesamtzulauf unter Dichtebedingungen leicht geringer. Die beiden Varianten sind somit nicht vollständig vergleichbar.

## 8 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Qualitätsprognose von austretenden Grubenwässern mit Hilfe der bisher nicht berücksichtigten positiven Auswirkungen von Dichteschichtungen zu verbessern und dadurch überdimensionierte Wasserbehandlungsanlagen zu vermeiden.

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Schichtungsausbildung sollten genutzt werden, um vereinfachte, robuste Modellwerkzeuge zur Prognose und Abbildung der Dichteschichtung zu schaffen und diese an das bestehende Boxmodell Ruhr anzukoppeln bzw. in dieses zu integrieren. Damit wären unter Berücksichtigung des Flutungsgeschehens in Grubenfeldern Aussagen zu Schichtungsphänomenen, evtl. auch zu deren positiven Beeinflussung, möglich. Die Prognosen ließen sich als Entscheidungshilfe für künftige Konzepte zu Stilllegungen bzw. Flutungen nutzen, z. B. um Grubenwässer durch gezielte Gestaltung der untertägigen Hauptströmungswege überhaupt erst einleitbar zu machen.

Die Erreichung des Ziels, dass das Boxmodell in der Lage ist, Schichtungsphänomene auch großräumig abzubilden, wurde mit aufeinander aufbauenden Schritten unternommen. Dabei übernahm Software aus dem Bereich der Computational Fluid Dynamics (CFD) als international angesehene und eingeführte Simulationsprogramme eine Vermittlerrolle, um die Modellansätze des Boxmodells abzustützen.

Zur Anwendung kam weiterhin die Software FEFLOW, ein numerisches Grundwasserströmungsmodell, mit dem insbesondere der Massen- und Wärmetransport im physikalischen Modell (Schichtungsversuche) untersucht wurde und das CFD-Programm CFX-5, welches speziell für Bereiche der Simulation technischer Strömungs- und Verbrennungsprozesse für die verfahrenstechnische Industrie entwickelt wurde. Die mit CFX-5 erstellten Modelle können extrem hochauflösend z. B. turbulente Strömungsverhältnisse im Schacht oder Dichteeinflüsse und Wärmebewegung im Fluid bzw. zwischen Fluid und Gebirge berechnen.

Zuerst wurden aus den bisherigen eigenen Untersuchungen und aus den Literaturrecherchen die grundlegenden Prozesse der Dichteströmung herausgearbeitet und zusammengestellt. Vor allem die Theorie der Doppeldiffusion brachte einen entscheidenden Erkenntnisgewinn.

Die in der Literatur niedergelegten Ergebnisse und Erklärungen für bestimmte Phänomene fußen großenteils auf Beobachtungen in natürlichen Systemen (Limnologie, Ozeanographie). Die beobachteten Phänomene im physikalischen Modell, d. h. den im Labormaßstab durchgeführten Schichtungsversuchen an einem vereinfachten Grubenmodell aus zwei „Schächten“ und zwei „Strecken“, standen in Übereinstimmung mit den Beschreibungen in der Literatur bzw. konnten durch diese erklärt werden. Daraus ließ sich schlussfolgern, dass die Schichtungsversuche im Labormaßstab realen Verhältnisse sehr nahe kamen. Neben dem Erkenntnisgewinn aus den Messdaten war auch diese Feststellung wichtig für die Simulationen bzw. für die Übertragbarkeit auf größere Systeme.

Eine ganz wesentliche Erkenntnis aus den Laborversuchen war, dass wie ebenfalls in der Limnologie beschrieben, ein Wärme- und Stofftransport über die vielfach beobachteten Grenzflächen hinweg stattfindet. Dieser Transport kann, wenn kein zusätzlicher Salznachschub erfolgt, zum Abbau der Salzkonzentration im Tiefsten führen, was letztlich eine Aufhebung der Dichteschichtung zur Folge hat.

Mittels FEFLOW und CFX wurden einige der Schichtungsversuche nachgerechnet. Die FEFLOW-Simulationen lieferten außer einer Verbesserung des Verständnisses der physikalischen Prozesse die Temperaturverteilung im Sand-Wasser-Gemisch als Modelleingangsgröße für die CFD-Modellierungen. Für die CFD-Modellierungen kann festgehalten werden, dass eine gesteigerte Modellauflösung durch Verkleinerung der Gitterabstände eine verbesserte Annäherung an die Messwerte des Versuchsstandes ergeben hat. Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufes der Dichteschichtung waren bei Modellvarianten ohne Zulauf qualitativ sowie quantitativ annähernd vergleichbare Ergebnisse des Modells zum Versuchsstand feststellbar. Bei den Modellvarianten mit Zulauf erfolgte die Vermischung der unterschiedlich mineralisierten Wässer dagegen wesentlich früher als im Versuchsstand. Die Ursache für die frühzeitige Vermischung konnte auf die durch die zweidimensionale Modellierung hervorgerufene Abbildung des Zulaufs über die gesamte Schachtbreite und somit vernachlässigten Wechselwirkungen in der Tiefenebene zurückgeführt werden. Zur quantitativen Annäherung an die im Versuchstand ermittelten Messergebnisse unter Berücksichtigung der horizontalen Fluidströmungen wäre eine dreidimensionale Berechnung notwendig gewesen, die jedoch ein Vielfaches an Rechenaufwand nach sich gezogen hätte und deswegen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich war.

Die Erkenntnisse aus Theorie (Literatur) und Praxis (Schichtungsversuche) führten u. a. zu Modellanpassungen und -erweiterungen im Boxmodell. Die konkreten Entwicklungsschritte sind:

- Erweiterung der Strömungsgleichung um die Dichte.
- Programmierung der Doppeldiffusion in Form einer erhöhten molekularen Diffusion, welche eine Funktion des Stabilitätsverhältnisses  $R_p$  ist.
- Einführen der zusätzlichen Prozessgröße „Temperatur im Festgestein“ und Realisierung der Wärmean-/abströmung durch das Gebirge als Schalensystem um die Strecken.

In der Nachrechnung der Laborversuche mittels Boxmodell wurden alle wesentlichen Einflussgrößen einbezogen. Aufgrund der hochwertigen messtechnisch gewonnenen Basisdaten war es möglich, die Wirkung der Dichteschichtung nicht nur qualitativ zu testen, sondern auch quantitativ zu überprüfen, in welcher Zeit und bei welchen Konzentrationen und Temperaturen die Auflösung der sperrenden Wirkung der Dichte verloren geht. Es konnte gezeigt werden, dass das Boxmodell mit den o. g. Modellanpassungen und -erweiterungen in der Lage war, die wesentlichen Effekte der Schichtungsversuche abzubilden.

Anschließend wurde das physikalische Modell (Technikumsversuch) in etwa auf reale Geometrieverhältnisse skaliert. Im Rahmen der CFD-Berechnungen wurde über eine Gitterstudie die für diese Modellgröße erforderliche Gitterauflösung ermittelt. Dazu wurden mehrere Varianten für reale Grubengrößenordnungen erstellt, die sich nur hinsichtlich der Gitterauflösung in den Schacht- und Sohlenbereichen unterscheiden. Die Modellierungen zeigten starke Abhängigkeiten der Rechenergebnisse von den gewählten Zeitschrittweiten, der Festlegung des Konvergenzkriteriums und der Mindestanzahl an inneren Iterationsschritten pro Zeitschritt. Es stellte sich heraus, dass für den Fall des Berechnungsgitters mit Knotenabstand  $\leq 10$  cm ein konservativeres Kriterium zur Erhaltung der adaptiven Zeitschrittweite gewählt werden muss als bislang praktiziert. Die damit zwangsweise einhergehende Einstellung insgesamt kleinerer Zeitschrittweiten im Bereich von ca. 0,5 Sekunden für den Berechnungslauf mit daraus resultierender Steigerung der Berechnungszeit führte zu der Erkenntnis, dass dieser Rechenaufwand mit dem vorhandenen, aktuellen Hardwareausstattung nicht mehr leistbar war.

Mit dem Boxmodell wurden als erstes grundlegende Prozesse geprüft wie: Stabilität der Lösung, Zeitverhalten von Durchbruchskurven oder Bilanztreue. Anschließend wurden ähnliche Verhältnisse wie im physikalischen Modell (Laborversuch) eingestellt und es zeigten sich die analoge Ergebnisse und Trends wie in den Ausgangsuntersuchungen. Der grundlegende Effekt der Dichtschichtung, das unterschiedliche Strömen auf den beiden Strecken, konnte nachgestellt werden. Das war der Beleg, dass die Gleichungen der Dichteströmung funktionsfähig und offensichtlich bilanztreu und konsistent umgesetzt wurden. Es zeigte sich auch, dass diese Dichte-effekte bereits bei sehr kleinen Konzentrationsunterschieden, hier ca. 5 mg/L, wirksam werden (Umschlagpunkt). Dies liegt daran, dass die Strecken und Schächte nur sehr kleine Strömungswiderstände besitzen und bereits kleinste Triebkräfte zum Umschlag der Strömung führen. Diese Aussage ist allerdings nicht zu verallgemeinern, denn in der Praxis treten solche ungestörten, idealen Strömungsverhältnisse nicht auf. So wird das Strömungsregime von zahlreichen instationären Effekten überprägt und hinzukommen auch noch die Effekte der Doppeldiffusion, welche den Dichte-effekten entgegenwirken.

Im nächsten Schritt wurden die Modellebenen verlassen und ein im Hinblick auf Schichtungsstruktur und Grubengebäude (Umfang, Ausrichtung) relativ einfaches, aber reales und bereits geflutetes Feldbeispiel ausgewählt, dessen Verhältnisse aus früheren Untersuchungen sehr gut dokumentiert waren.

Die CFD-Modellkalibrierung führte zu einer guten Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messdaten. Als besonders wichtig hatte sich dabei herausgestellt, auch das angeschlossene Grubengebäude bei den Modellrechnungen in seiner Wirkung auf die dem Schacht zufließenden bzw. aus dem Schacht abfließenden Wassermengen zu berücksichtigen, wobei das (ausgeglichene) Verhältnis dieser beiden Zu- bzw. Abstromraten im Vordergrund steht. Erst durch Ansetzen dieser Zuflüsse konnte mit dem Modell eine eng begrenzte Sprungschicht im Bereich des Anschlusses der 850 m-Sohle erzeugt werden. Die trotz parallelisierter Berechnungsmethodik und Benutzung eines Rechen-Clusters langen Rechenzeiten von mehreren Tagen für die Berechnung eines Zeitintervalls von drei Stunden zeigen allerdings die engen Grenzen bzw. die unzureichende Praktikabilität dieser Modellierung auf.

Auch in der Box-Simulation konnten die tatsächlichen Verhältnisse gut abgebildet werden. Die numerischen Versuche zeigten die generelle qualitative Wirkung der Dichte, jedoch noch nicht solche Spezialeffekte wie z. B. die Doppeldiffusion. Einschränkend muss allerdings gesagt werden, dass leider kein anspruchsvollerer messtechnischer Vergleich zur Verfügung steht, welcher z. B. das zeitliche Verhalten einer Aussüßung beschreiben lässt. Bei diesem Beispiel werden zeitlich konstante Verhältnisse reproduziert - auch wenn die Rechnung im Hintergrund instationär läuft.

Im Zuge der Projektbearbeitung zeigte sich, dass die CFD-Modelle für großmaßstäbige Probleme im Rahmen unserer Fragestellungen aus Kapazitätsgründen an ihre Grenzen stoßen. Wegen der Spezifik der Prozessanforderungen und der damit verbundenen hohen Auflösung ist eine Übertragung dieses notwendigen feinen Diskretisierungsgrades auf größere Maßstäbe nicht möglich. Der Aufwand zur Berechnung einer Fluidströmung unter Berücksichtigung von Dichte- und Wärmeeffekten ist in einem hoch aufgelösten numerischen CFD-Modell für ein Grubenfeld oder gar ein gesamtes Bergwerk zurzeit unter Verwendung handelsüblicher Hardware noch viel zu hoch bzw. nicht zielführend. Dies gilt vor allem unter Beachtung der Forderung, dass einige Vergleichsrechnungen in einem akzeptablen Zeitraum vorzunehmen sind. Solche CFD-Simulationen waren aber auch nicht das Ziel des Vorhabens. Vielmehr übernahmen die CFD-Modellierungen eine Vermittlerrolle, um die Modellansätze des Boxmodells abzustützen. Wenn das Boxmodell bei kleineren Maßstäben zu ähnlichen Ergebnissen wie das CFD-Modell kommt, sollte davon ausgegangen werden, dass es auch bei größeren realen Maßstäben, die das CFD-Modell aus Kapazitätsgründen nicht mehr abbilden kann, Schichtungsphänomene richtig nachbildet. Dieser Nachweis wurde geführt.

Nachdem das Box-Modell am physikalischen Modell (Technikumsversuch), am auf reale Geometrieverhältnisse skalierten Modell und auch am einfachen realen Feldbeispiel erfolgreich angewendet wurde, konnte zu einem komplexeren realen Feldbeispiel übergegangen werden. Dafür wurde das derzeit in Aufbau befindliche Modell des Bergwerkes Ost ausgewählt.

An diesem Beispiel wurden zahlreiche Testläufe vorgenommen und das Verhalten des Modells getestet. In einem Vergleich wurden Chloridaustragskurven als Repräsentant des Salzgehaltes gegenüber gestellt

- ohne und mit Berücksichtigung der Dichteschichtung. Dabei wurden deutliche Unterschiede in der Salzentwicklung im Pumpniveau vermerkt: in der Variante mit Berücksichtigung der Dichteschichtung war der Chloridaustrag um ca. 12,5 % geringer. Der Bereich des Bergwerkes Ost, insbesondere der östliche Teil, ist durch eine recht geringe Auffahrungs-dichte im Verhältnis zum westlichen Teil, aber auch im Vergleich zur Emschermulde gekennzeichnet. Es gibt nur wenige Grubenfelder, zwi-schen welchen es gut wasserleitende Verbindungen auf unterschiedlichen Höhenniveaus gibt. Damit kann das geringer mineralisierte – meistens von oben kommende – Wasser nur in Mischung mit dem hochaufkonzen-trierten Tiefenwasser gemeinsam zum Entlastungspunkt der Pumpe flie-ßen. Die Dichteefekte treten damit in diesem konkreten Fall zwar in den Hintergrund, weil aus dem westlichen Bereich des Bergwerkes Ost - aus Gneisenau – ein sehr überprägender, relativ gering mineralisierter Volu-menstrom zufließt, die Differenzen zwischen den Berechnungsvarianten ohne und mit Dichteefekt zeigen aber die grundlegende Wichtigkeit der Berücksichtigung der Dichteschichtung und die erfolgreiche Implementie-rung in das Boxmodell auf.

In dieser letzten Projektphase wurden jedoch auch noch Modellschwächen deutlich, die bis zum Projektabschluss noch nicht vollständig beseitigt werden konnten. So führen vor allem die nicht wassererfüllten Modell-scheiben, die sich über dem letzten Flutungswasserspiegel (oder im Flutungsprozess selbst über dem dann jeweils aktuellen Wasserspiegel) befinden, zu leichten Modellschwingungen. Erst mit extrem kleinen Zeit-schritten konnten bilanztreue Rechenläufe generiert werden, die erste Aussagen über die prinzipielle Funktionstüchtigkeit und auch Trends bzgl. der Salzentwicklung zuließen.

Ein weiterer Punkt ist, dass das höher mineralisierte Wasser aufgrund der schwereren Wassersäule einen höheren Druck im Tiefsten der Lagerstätte erzeugt. Ein größerer Druck, im Modell ausgedrückt durch einen höheren äquivalenten Frischwasserspiegel, bewirkt aber ein stärkeres Abdrücken der von der Spiegeldifferenz „speisender Rand – Spiegel in der Box“ ab-hängigen Randzuläufe und damit unter Dichtebedingungen einen leicht geringeren Gesamtzulauf.

Beide Punkte sind noch nicht endgültig bewertet, so dass die für BW Ost erzeugten Ergebnisse noch Entwicklungscharakter haben.

## 9 Literaturauswahl

- /1/ DMT: Untersuchung der Qualitätsentwicklung von Grubenwässern im Einzugsbereich der Emscher, 42 Seiten, 2979955/414/DE v. 04.08.2004
- /2/ DMT GmbH & Co. KG (2012): Modellbasierte Sensitivitätsanalyse von Einflussfaktoren auf Flutungsprozesse und Grubenwasserqualitäten – Bericht zu den Arbeitspaketen 3-5. – DMT-BA-Nr. 3450-2004-036 v. 24.01.2012
- /3/ Deutsche Montan Technologie GmbH (1999): Mittelfristige Entwicklung des Chemismus und der Dichte-Schichtungen von Grubenwässern in Bergwerken und ihre Auswirkungen auf nutzbares Grund- und Oberflächenwasser. – DMT-Projekt-Nr. 2332 v. Sept. 1999
- /4/ Deutsche Montan Technologie GmbH (2003): Erstellung numerischer Modelle zur Berechnung von Dichte-Schichtungen bei einem Grubenwasseranstieg. – DMT-FPI-Nr. 2685 v. Juni 2004
- /5/ GFI (2002): Studie Überprüfung der bei der Flutung des Grubengebäudes Ronneburg angewendeten Verfahren zur Probenahme, Analyse und Auswertung von Wasserproben vor dem Hintergrund der beobachteten Schichtung des Flutungswassers. – Prof. Dr.-Ing. habil. L. Luckner, Dresden, 3. Juli 2002
- /6/ DHI-WASY GmbH (2009): White Papers, Vol. 1
- /7/ UIT (2005): Modellkalibrierung und Variantenrechnungen zur Flutung im Grubenkomplex Ronneburg. – UIT GmbH Dresden, Dresden, Juli 2005
- /8/ TURNER, J.S. (1980): Buoyancy Effects in Fluids. – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 368 pp.
- /9/ TURNER, J.S. (1980): Small-Scale mixing processes. – In: WARREN, B.A. & WUNSCH, C. (eds.): Evolution of Physical Oceanography: Scientific Surveys in Honor of Henry Stommel, Chapter 8: 236-262; The MIT Press (September 29, 1980)
- /10/ KELLEY, D.E. (1984): Effective diffusivities within oceanic thermohaline staircases. – Journal of Geophysical Research, **89** (C6): 10484-10488
- /11/ WÜEST, A.: Double diffusion: The phenomenon. In: WÜEST, A.: Skript zur Vorlesung "Aquatische Physik II": 5.104-5.123
- /12/ JÖHNK, K.D. (2001): 1D hydrodynamische Modelle in der Limnophysik - Turbulenz-Meromixis-Sauerstoff. – Limnophysics Reports, Vol. 1(1), 235 S., Habilitationsschrift (korrigierte Version Nov. 2001 / Mar. 2003)
- /13/ KELLEY, D.E. (2001): Six questions about double-diffusive convection. – In MULLER, P. & GARRETT, C. (eds.): From stirring to mixing in a stratified ocean: 12th 'Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop: 191-198; Univ. of Hawaii
- /14/ RUDDICK, B. & GARGETT, A.E. (2003): Oceanic Double-diffusion: Introduction. – Progress In Oceanography, **56** (3-4): 381-393

- /15/ KELLEY, D.E. & FERNANDO, H.J.S. & GARGETT, A.E. & TANNY, J. & ÖZSOY, E. (2003): The diffusive regime of double-diffusive convection. – *Prog. Oceanogr.*, **56** (3-4): 461-481
- /16/ Inoue, R. & Yamazaki, H. & Wolk, F. & Kono, T. & Yoshida, J. (2007): An Estimation of Buoyancy Flux for a Mixture of Turbulence and Double Diffusion. – *Journal of Physical Oceanography*, **37** (3): 611-624
- /17/ SCHMID, M. & LORKE, A. & DINKEL, C. & TANYILEKE, G. & WÜEST, A. (2005): Double-diffusive convection in Lake Nyos, Cameroon. – *Deep-Sea Research I*, **51**: 1097–1111
- /18/ SCHMITT, R.W. (1995): The Ocean's Salt Fingers. – *Scientific American*, **272** (5): 70-75
- /19/ SCHMITT, R.W. & LEDWELL, J.R. & MONTGOMERY, E.T. & POLZIN, K.L. & TOOLE, J.M. (2005): Enhanced diapycnal mixing by salt fingers in the thermocline of the tropical Atlantic. – *Science*, **308**: 685-688
- /20/ STUYFZAND, P.J. (1989): An accurate, relatively simple calculation of the saturation index of calcite for fresh to salt water. – *Journal of Hydrology*, **105**: 95-107; Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam
- /21/ LEONHARDT, J. (1983): Die Gebirgstemperaturen im Ruhrrevier. – *Das Markscheidewesen*, **90**: 218-230