

Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

Verfahrensunterlage

Titel: Endlager Morsleben
2D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter
Salzwasserverhältnissen
Modellrechnungen zur Auspressung von Salzlösung aus dem Grubengebäude

Autor: Klemenz, W., Resele, G., Klubertanz, G. & Siegel, P.

Erscheinungsjahr: 2002

Unterlagen-Nr.: P 170

Revision: 00

Unterlagenteil: Teil 1 von 2



Zusammenfassung

W. Klemenz, Dr. G. Resele, Dr. G. Klubertanz und Dr. P. Siegel: Endlager Morsleben. 2D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Salzwasserhältnissen. Modellrechnungen zur Auspressung von Salzlösung aus dem Grubengebäude

Ziel der im vorliegenden Bericht dargestellten Modellrechnungen ist, den Einfluss von Dichte- einwirkungen auf die Grundwasserbewegung im Hutgestein und im Deckgebirge sowie auf die Ausbreitung von gesättigter NaCl-Lösung aus dem Grubengebäude zu untersuchen. Mit den Modellrechnungen soll speziell untersucht werden, ab welcher Auspressrate aus dem Grubengebäude sich das Strömungsfeld signifikant ändert, wie sich die Abflüsse auf typische Fließwege aufteilen und wie sie den definierten Austragswegen W1 bis W4 zuzuordnen sind.

Referenzfall

Die instationären Salzwasserrechnungen mit den 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 6 erlauben folgende Aussagen zum Fließfeld im Gebiet Lappwald – Allertal - Triasplatte:

- Die Verhältnisse in der Lappwaldscholle und im Allertal stellen einen stationären Zustand dar. Dabei wird das Fließfeld im Lappwald – neben dem oberflächennahen Süßwasserfluss – wesentlich durch das Absinken des Salzspiegels (Zechstein und Salzlager des Mittleren Muschelkalk) unter die Lappwaldscholle, insbesondere aber durch die Salzlager des Unteren und Oberen Gipskeuper bestimmt.
- Die Anwesenheit der Gipskeuper-Salzlager verhindert durch die Aufsatzung der tieferen Teile der Lappwaldscholle nennenswerte Wasserflüsse. Die Fließraten sind dort extrem gering (10^{-15} bis 10^{-13} m/s).
- Salzlösung erfolgt im Lappwald im Wesentlichen entlang des Salzlagers des Oberen Gipskeuper. Durch die Salzlösung wird die Lücke in der Verbreitung dieses Salzlagers langsam erweitert, in der Größenordnung von 1 bis 2 m pro 1000 Jahre.
- Im Allertal wirkt der tiefreichende, gut durchlässige Oberkreide-Trog als Senke für die Salzwasserabflüsse aus dem Lappwald und der Allertalzone. Die Fließgeschwindigkeiten im Hutgestein, die dabei stattfindende Salzlösung am Salzspiegel des Allertals und der Salztransport sind sehr gering (10^{-14} bis 10^{-11} m/s).
- In der Triasplatte fehlt ein durchgehendes Salzlager an der Basis des Buntsandstein. Das Zechsteinsalz der Allertalzone reicht nur ca. 1 km weit unter die Triasplatte. Die früheren Salzlager des Röt sind bis auf geringe Reste (die in den Modellrechnungen vernachlässigt wurden) subrodiert.
- Die Rechnungen mit einer Salzrandbedingung entlang des Zechsteinsalzes in der oben genannten Ausdehnung zeigen, dass dieses Salzlager nicht die Versalzung im tieferen Teil der Triasplatte (Unterer Buntsandstein) erklären kann. Die heutige Salzverteilung in der Triasplatte muss ein Relikt einer früheren, ausgedehnteren Verbreitung der Salzlager – vor der Subrosion des Rötosalzes – sein. Die Überprüfung dieser Hypothese mit der Rechnung R5-04 zeigt, dass das Angleichen des Salzgehaltes in den tieferen Bereichen der Triasplatte an die heutige Verteilung der Salzlager sehr langsam erfolgt und hunderttausende von Jahren dauert.

Einpressungsrechnungen

Die Auspressung von Salzlösungen aus dem Grubengebäude in der Größenordnung von $10 \text{ m}^3/\text{a}$ und deren Einpressung am Salzspiegel in die Schichtenfolge DGL des Hutgesteins bewirken einen massiven Anstieg des Bereichs mit stark versalzener Grundwasser im Hutgestein sowie in den geringdurchlässigen Keupersedimenten der NE-Talhälfte des Allertals. Die Abflusswege dieser in die Schichtenfolge DGL eingepressten Salzlösungen wurden mit 2D Modellrechnungen unter Berücksichtigung der Dichteeffekte untersucht. Dabei sind die Ergebnisse mit dem Modell Schnitt 5 repräsentativ für eine Auspressung aus dem Zentralteil der Grube, jene mit dem Modell Schnitt 5mod für eine Auspressung aus dem Nordfeld. Die Rechnungen erlauben eine genauere Charakterisierung der bereits in den 3D Einpressrechnungen beschriebenen, potentiellen Austragswege W1 bis W4 in den Gebieten des Zentralteils- und des Nordfeldes.

Die relativ durchlässige Schichtenfolge DGL beeinflusst die Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung stark.

Wie in den 3D Einpressrechnungen gezeigt wurde, erfolgt einerseits aufgrund der Permeabilitätskontraste, andererseits und insbesondere wegen der Zerblockung der Schichtenfolge DGL keine Ausbreitung in deren Streichrichtung: Der Ausbreitungsweg W1 ist für den Nachweis der Langzeitsicherheit nicht zu unterstellen.

Bei einer Auspressung aus dem Zentralteil erfolgt die Ausbreitung der ausgepressten Lösung entlang der Wege W3 und W4. Die charakteristischen Daten dieser Wege sind nachstehend tabellarisch zusammengestellt.

Austragswege im Gebiet des Zentralteils (Schnitt 5)		
Schlussfolgerungen aus Modellergebnissen, interpoliert für eine Einpressrate von $0,05 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{a}$ und einen k_f -Wert des Hutgesteins von 10^{-11} m/s		
W3	Relative Häufigkeit	83 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Schilfsandstein – Aufstieg durch Gipskeuper an GOK SE der Aller (Typ ii) bzw. Schilfsandstein – NE-Randstörung – Aufstieg durch Oberen Buntsandstein an GOK Triasplatte (Typ iii)
	Weglänge	Typ ii: 750 m (600 m – 1000 m) Typ iii: 2'000 m (keine Angabe zur Bandbreite)
	Fließzeit	Typ ii: 110'000 a (100'000 a – 130'000 a) Typ iii: 80'000 a (50'000 a – 120'000 a)
W4	Relative Häufigkeit	17 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Oberkreidetrog (Basis: Jura) – Quartär – Exfiltration SE der Aller
	Weglänge	600 m (500 m – 700 m)
	Fließzeit	4'200 a (4'000 a – keine obere Bandbreite)

Die Aufteilung der ausgepressten Lösung auf die beiden Austragswege ist entsprechend der oben angegebenen relativen Häufigkeit von 83 % für den Weg W3 und 17 % für den Weg W4 zu erwarten.

Lösung, die im Bereich des Nordfeldes ausgepresst wird, breitet sich entlang der Wege W2 und W4 aus mit den in nachstehender Tabelle angeführten charakteristischen Daten. Die zu erwartenden relativen Anteile betragen 87 % für Weg W2 und 13 % für Weg W4.

Aus den Modellergebnissen für den Schnitt 5mod lassen sich mit denselben Überlegungen wie für den Schnitt 5 die folgenden charakteristischen Angaben ableiten:

Austragswege im Gebiet des Nordfeldes (Schnitt 4)		
Schlussfolgerungen aus Modellergebnissen, interpoliert für eine Einpressrate von $0,05 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ und einen k_f -Wert des Hutgesteins von 10^{-11} m/s		
W2	Relative Häufigkeit	87 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Unterer Gipskeuper – Schilfsandstein – Aufstieg durch Steinmergelkeuper und Exfiltration im SE der Aller
	Weglänge	500 m (400 m – 800 m)
	Fließzeit	20'000 a (5'000 a – 100'000 a)
W4	Relative Häufigkeit	13 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Basis Oberkreidetrog (obere Alleringerslebener Schichten) – Quartär – Exfiltration SE der Aller
	Weglänge	600 m (500 m – 700 m)
	Fließzeit	5'000 a (4'500 a – keine Angaben zur oberen Bandbreite)

Die an der Geländeoberfläche austretenden Lösungen aus dem Grubengebäude erfahren dort eine weitere Verdünnung. Um den örtlich unterschiedlichen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, wird als verdünnender Grundwasserfluss für alle Wege ein niedriger Wert von $25'000 \text{ m}^3/\text{a}$ unterstellt.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	9
Verzeichnis der Anlagen	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einführung	13
1.1 Zielsetzungen	13
1.2 Fragestellung	14
1.3 Berichtaufbau	14
2 Modellkonzept, Randbedingungen, Parameter	15
2.1 Auswahl der Modellschnitte für 2D Rechnungen	15
2.1.1 Schnittrichtung	15
2.1.2 Schnittlage	15
2.1.3 Vergleich von Schnitt 2-2' mit Modellschnitt 5	16
2.1.4 Vergleich von Schnitt 1-1' und Modellschnitt 7 mit den Modellschnitten 5 und 6	17
2.1.5 Wahl der Schnittlage	17
2.1.6 Seitliche Ausdehnung	18
2.1.7 Geometrie	18
2.2 Parameter und Randbedingungen für Grundwasserströmung und Transport	19
2.2.1 Durchlässigkeit und Porosität	19
2.2.2 Dispersionslängen, Diffusionskoeffizient	20
2.2.3 Randbedingungen des Strömungsteils	20
2.2.4 Randbedingungen für die dichtebestimmende Salzausbreitung	21
2.3 Realisierte Modelle	21
2.4 Durchführung der Rechnungen	21
3 Überblick über die durchgeführten Rechnungen	23
3.1 Rechenfälle	23
3.1.1 Rechnungen mit dem Programm SoTraCoF	23
3.1.2 Rechnungen mit dem Programm NAMMU 6.3	23
3.2 Programm, Rechengenauigkeit	24
3.3 Trajektorienrechnungen	25
3.3.1 Startpunkte	25
3.3.2 Diskretisierung der Schichtenfolge DGL	25
3.3.3 Rechenprogramm für die Trajektorienrechnungen	25
3.4 Darstellung	25
3.5 Auswertung	26
4 Modellrechnungen ohne Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude	28
4.1 Modellrechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5	28
4.1.1 Süßwasserrechnung R5-01	28
4.1.2 Instationäre Salzwasserrechnung R5-02	29

4.1.3	Stationäre Salzwasserrechnung R5-05 mit NAMMU	32
4.1.4	Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 zur Salzverteilung in der Triasplatte	38
4.2	Rechnungen mit Schnitt 6	41
4.2.1	Süßwasserrechnung R6-01	42
4.2.2	Salzwasserrechnung R6-02	42
4.3	Vergleich der Resultate der instationären Rechnungen mit Messwerten	46
4.4	Salzaustrag	48
4.4.1	Salzaustrag in den Rechenfällen R5-02 und R6-02	48
4.4.2	Vergleich mit der Chloridbilanz der Felduntersuchungen	48
5	Rechnungen mit Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude	50
5.1	Einleitung	50
5.2	2D Modelle	50
5.3	Rechenfälle	51
5.4	Randbedingungen, Parameter	51
5.5	Durchführung der Rechnungen mit NAMMU 6.3	52
5.6	Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5	52
5.6.1	Rechenfall R5-01	52
5.6.2	Rechenfall R5-05	52
5.6.3	Rechenfälle R5-06 bis R5-08	53
5.6.4	Rechenfälle R5-09 und R5-10 mit k_f Hutgestein = 10^{-11} m/s	56
5.7	Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5mod	57
5.7.1	2D Modell Schnitt 5mod	57
5.7.2	Randbedingung	57
5.7.3	Rechenfälle	58
5.7.4	Rechenfall R5mod-01	58
5.7.5	Rechenfall R5mod-02	58
5.7.6	Rechenfall R5mod-03	59
5.8	Zusammenfassende Diskussion der Auswirkungen	60
5.8.1	Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5 und k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s	60
5.8.2	Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5 und k_f Hutgestein 10^{-11} m/s	62
5.8.3	Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5mod (Durchlässigkeit Keuper modifiziert) und k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s	62
5.8.4	Rolle der Schichtenfolge DGL	63
6	Austragswege	64
7	Schlussfolgerungen	65
7.1	Referenzfall (basierend auf R44, ohne die heutigen Entnahmen durch Förderbrunnen)	65
7.2	Einpressungsrechnungen	66
7.2.1	Austragswege Schnitt 5 (Zentralteil)	66
7.2.2	Austragswege Schnitt 4 (Nordfeld)	67
7.3	Schlussfolgerungen zu den Austragswegen	67
8	Literaturverzeichnis	69

9	Definitionen	71
10	Tabellen	72
11	Abbildungen	85
Gesamtseitenzahl		151

ERA
ERA
Morsleben
Morsleben

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Hydrostratigraphische Einheiten, k_f - und Porositätswerte im 3D Süßwassermodell und in den 2D Salzwassermodellen.....	73
Tabelle 2	Auspressraten aus dem Grubengebäude (m^3/a) und spezifische Einpressraten in die Schichtenfolge DGL ($m^3/m \cdot a$).....	74
Tabelle 3	Überblick über die mit den 2D Modellen Schnitt 5, Schnitt 6 und Schnitt 5mod durchgeführten Süß- und Salzwasserrechnungen	75
Tabelle 4	2D Modell Schnitt 5. Parameter und Randbedingungen der Süßwasser- (Programme CGM, NAMMU 6.3) (oben) und der Salzwasserrechnungen (Programm SoTraCoF) (unten).....	76
Tabelle 5	Parameter und Randbedingungen der mit dem Programm NAMMU mit dem 2D Modell Schnitt 5 ausgeführten Salzwasserrechnungen	77
Tabelle 6	2D Modell Schnitt 5mod. Parameter und Randbedingungen der durchgeführten Süßwasser- (Programme CGM, NAMMU) und Salzwasserrechnungen (Programm NAMMU)	78
Tabelle 7	2D Modell Schnitt 6. Parameter und Randbedingungen der mit dem Programm CGM durchgeführten Süßwasser- und der mit dem Programm SoTraCoF durchgeführten Salzwasserrechnungen	79
Tabelle 8	Salzmasse in den 2D Modellen	80
Tabelle 9	Wasserdruck (ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe) an der Basis und am Top der Schichtenfolge DGL in den stationären NAMMU-Rechnungen.....	81
Tabelle 10	Wasserfluss am Top der Schichtenfolge DGL - am Kontakt zu A11/248/kmS Schilfsandstein – in den stationären NAMMU-Rechnungen.....	82
Tabelle 11	Alle NAMMU-Rechenfälle, Trajektorienrechnungen. Gruppierung der Fließwege, Pfadlängen und Fließzeiten.....	83
Tabelle 12	Vergleich der Messwerte der Wasserdichte mit den Rechenwerten in R5-02 und R6-02	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Auspressung aus der Grube in die DGL, Referenzfall	86
Abbildung 2	3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 1 bis 7 quer zum Allertal, K-Klassen siehe Tabelle 1.	87
Abbildung 3	3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 8 bis 10 längs des Allertals, K-Klassen siehe Tabelle 1	88
Abbildung 4	3D Süßwassermodell ERAM: Topographie der Oberfläche des Hutgesteins mit Ausbisslinie DGL und Position der Aller	89
Abbildung 5	3D Süßwassermodell ERAM: Position der Aller, Ausbisslinie DGL an der Oberfläche des Hutgesteins und K-Klassen der Einheiten, die die Ausbisslinie DGL überlagern	90
Abbildung 6	Nahbereich Schacht Bartensleben in Schnitt 5 durch das 3D Süßwassermodell [12] und gemäß Lokalmodell Geologie [9]	91
Abbildung 7	2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 5mod. Hydrogeologischer Aufbau (oben), 2D Modell (unten).....	92
Abbildung 8	2D Modell Schnitt 6. Hydrogeologischer Aufbau (oben), 2D Modell (unten).....	93
Abbildung 9	Trajektorienrechnungen. Startpunkte A1 bis A12 im Gebiet der Einpressung 0,7 m oberhalb der Basis der Schichtenfolge DGL; Startpunkte B1 bis B19 über der gesamten Breite der Schichtenfolge DGL, 2,1 m bis 4,1 m oberhalb des Salzspiegels	94
Abbildung 10	Diskretisierung der Schichtenfolge DGL im 2D Modell Schnitt 5.....	95
Abbildung 11	Süßwasserrechnungen Schnitt 5. Potentialverteilung im 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44, interpoliert/extrapoliert (oben). Potentialverteilung im Rechenfall R5-01 (unten).....	96
Abbildung 12	Süßwasserrechnung R5-01. Trajektorien und Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten) im Allertal.....	97
Abbildung 13	Süßwasserrechnung R5-01. Detail Trajektorien und Darcyfluss	98
Abbildung 14	Salzwasserrechnung R5-02. Anfangsbedingung der Konzentrationsverteilung (oben), Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 3 Mio. Jahre) (unten).....	99
Abbildung 15	Salzwasserrechnung R5-02. Zeitliche Entwicklung der Salzmasse in Abhängigkeit von der Modellzeit.....	100
Abbildung 16	Salzwasserrechnung R5-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 3 Mio. Jahre) im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)	101
Abbildung 17	Salzwasserrechnung R5-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 3 Mio. Jahre), Detaildarstellung für den Bereich C=0 bis 0,1 im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten).....	102
Abbildung 18	Stationäre Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)...	103
Abbildung 19	Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung, Detaildarstellung für den Bereich C=0 bis 0,1 im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)	104
Abbildung 20	Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung in der Weferlinger Triasplatte. Modellzeit 100'000 Jahre (oben), 1'000'000 Jahre (Mitte) und stationär (unten)	105
Abbildung 21	Salzwasserrechnung R5-05. Druckverteilung, ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe im stationären Zustand.....	106
Abbildung 22	Salzwasserrechnung R5-05. Vektoren des Darcyflusses im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)	107

Abbildung 23	Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal.....	108
Abbildung 24	Salzwasserrechnung R5-05. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten).....	109
Abbildung 25	Salzwasserrechnung R5-05. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	110
Abbildung 26	Angaben zur Dichte der subsalinaren Wässer in der Weferlinger Triasplatte.....	111
Abbildung 27	Salzwasserrechnung R5-04. Zeitliche Entwicklung der Salzmasse in Abhängigkeit von der Modellzeit.....	112
Abbildung 28	Salzwasserrechnung R5-04. Konzentrationsverteilung, (a) Modellzeit 0 Jahre (Anfangsbedingung), (b) Modellzeit 100'000 Jahre, (c) Modellzeit 500'000 Jahre.....	113
Abbildung 29	Salzwasserrechnung R5-04. Konzentrationsverteilung, (d) Modellzeit 1 Mio. Jahre, (e) Modellzeit 2 Mio. Jahre, (f) Modellzeit 2,5 Mio. Jahre.....	114
Abbildung 30	Süßwasserrechnungen Schnitt 6. Potentialverteilung im 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44, interpoliert/extrapoliert (oben). Potentialverteilung im Rechenfall R6-01 (unten).....	115
Abbildung 31	Salzwasserrechnung R6-02. Anfangsbedingung der Konzentrationsverteilung (oben), Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre).....	116
Abbildung 32	Salzwasserrechnung R6-02. Zeitliche Entwicklung der Salzmasse in Abhängigkeit von der Modellzeit.....	117
Abbildung 33	Salzwasserrechnung R6-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre) im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten).....	118
Abbildung 34	Salzwasserrechnung R6-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre), Detaildarstellung für den Bereich C=0 bis 0,1 im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten).....	119
Abbildung 35	Salzwasserrechnung R6-02. Darcyflüsse im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre) im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten).....	120
Abbildung 36	Vergleich der Grundwasserdichten aus Wasserproben ([5], Anlage 7.11, Blatt 8 bis 10, bzw. Anlage 28) mit den in den 2D Salzwasserrechnungen R5-02 und R6-02 berechneten Werten.....	121
Abbildung 37	Ausschnitt aus dem 2D Modell Schnitt 5 mit Projektion der Lage der Bohrungen Dp Mors 52A (Profil A), Dp Mors 51A/40A (Profil B).....	122
Abbildung 38	Verteilung der Grundwasserdichte als Funktion der Geländehöhe (mNN) in der Lappwaldscholle. Kluft- und Porenwasserproben aus Bohrungen (Hydotests, Kerne) und Modellresultate R5-02 am Ort der (projizierten) Bohrungen (vgl. Abbildung 37).....	123
Abbildung 39	NaCl-Tiefenprofil des Porenwassers der Bohrkerne von Dp Mors 52A (Lappwaldscholle).....	124
Abbildung 40	Salzwasserrechnung R5-06. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal.....	125
Abbildung 41	Salzwasserrechnung R5-06. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten).....	126
Abbildung 42	Salzwasserrechnung R5-06. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	127
Abbildung 43	Salzwasserrechnung R5-07. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal.....	128
Abbildung 44	Salzwasserrechnung R5-07. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten).....	129
Abbildung 45	Salzwasserrechnung R5-07. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	130
Abbildung 46	Salzwasserrechnung R5-08. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal.....	131

Abbildung 47	Salzwasserrechnungen R5_05 (oben) und R5-08 (unten). Konzentrationsverteilung in der Weferlinger Triasplatte.....	132
Abbildung 48	Salzwasserrechnung R5-08. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyflüsse (unten).....	133
Abbildung 49	Salzwasserrechnung R5-08. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	134
Abbildung 50	Salzwasserrechnung R5-09. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal.....	135
Abbildung 51	Salzwasserrechnung R5-09. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyflüsse (unten).....	136
Abbildung 52	Salzwasserrechnung R5-09. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	137
Abbildung 53	Salzwasserrechnung R5-10. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal.....	138
Abbildung 54	Salzwasserrechnung R5-10. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyflüsse (unten).....	139
Abbildung 55	Salzwasserrechnung R5-10. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	140
Abbildung 56	Süßwasserrechnungen mit Schnitt 5mod. Potentialverteilung im Rechenfall R5mod-01	141
Abbildung 57	Süßwasserrechnung R5mod-01. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten).....	142
Abbildung 58	Süßwasserrechnung R5mod-01. Detail Trajektorien und Darcyfluss	143
Abbildung 59	Salzwasserrechnung R5mod-02. Konzentrationsverteilung im Allertal	144
Abbildung 60	Salzwasserrechnung R5mod-03. Konzentrationsverteilung C=0 bis 1 (oben), C = 0 bis 0,1 (Mitte) und Darcyflüsse (unten) im Allertal	145
Abbildung 61	Salzwasserrechnung R5mod-03. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten).....	146
Abbildung 62	Salzwasserrechnung R5mod-03. Detail Trajektorien und Darcyfluss.....	147
Abbildung 63	Austragswege aus dem Nordfeld und dem Zentralteil bei einer Zerblockung der Schichtenfolge DGL in Abschnitte von 200 m Breite mit Subrosionsrinne. Schnitte 3 bis 6 durch das Allertal mit schematisiertem Verlauf der Austragswege W2, W4 (Nordfeld), W3, W4 (Zentralteil)	148
Abbildung 64	Austragswege aus dem Nordfeld und dem Zentralteil bei einer Zerblockung der Schichtenfolge DGL in Abschnitte von 200 m Breite mit Subrosionsrinne. Vertikale Aufsicht auf die Schichtenfolge DGL mit schematisiertem Verlauf der Austragswege W2, W4 (Nordfeld), W3, W4 (Zentralteil)	149

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	Modellgebiet ERAM. Hydrogeologischer Übersichtsplan
----------	---

Abkürzungsverzeichnis

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
CGM	Colenco Groundwater Model, Rechencode der Fa. Colenco
DGL	Schichtenfolge Deckanhydrit / Grauer Salzton / Leine-Karbonat im Hutgestein
Dp Mors	Deponie-Erkundungsbohrung Morsleben
ERAM	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
FWH	Fresh Water Head, äquivalente Süßwasserdruckspiegelhöhe
GOK	Geländeoberkante
GWN	Grundwasserneubildung
ka	1000 Jahre
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
NAMMU	Numerical Assessment Method for Migration Underground, Rechencode der Fa. AEA Technology
NN	Normaler Nullpunkt (Pegel Amsterdam)
SoTraCoF	Solute Transport Coupled Flow, Rechencode der Fa. Colenco
StAU	Staatliches Amt für Umwelt, Magdeburg
ρ	Grundwasserdichte

1 Einführung

1.1 Zielsetzungen

Das Hutgestein und das Deckgebirge bilden für das ERAM einen wesentlichen Bestandteil des Barrierensystems. Umfangreiche Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung wurden mit einem 3-dimensionalen Modell unter Vernachlässigung von Dichteinflüssen durchgeführt [10]. Sie zeigten eine Grundwasserbewegung, die generell quer zum Allertal gegen den Vorfluter, die Aller, gerichtet ist. In [12] wurden speziell die Wasserflüsse im Hutgestein untersucht, die sich bei einer Auspressung von Lösung aus dem Grubengebäude einstellen. Zielsetzung dieser Untersuchungen war die Ermittlung der Ausbreitung der ausgepressten Lösung in den drei Raumdimensionen, wobei wiederum Dichteeffekte vernachlässigt wurden.

Die Untersuchungen ergaben:

- Der Abfluss der ausgepressten Lösung erfolgt nur zum Teil entlang der hydraulisch am besten durchlässigen weitreichenden Struktur im Hutgestein, der Schichtenfolge Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat (DGL). Dieser Umstand gilt unabhängig von der Überdeckung der Schichtenfolge DGL an deren Ausbiss im Kontakt zum Deckgebirge.
- Ein bedeutender Teil der ausgepressten Lösung tritt beim oder nahe des Auspressortes am Salzspiegel in das so genannte intakte Hutgestein über, wobei der größte Anteil bei Vernachlässigung der Dichteeffekte gegen SW fließt und relativ direkt in den Oberkreidetrog gelangt. Bei einer hydraulischen Durchlässigkeit des intakten Hutgesteins von mehr als $3 \cdot 10^{-12}$ m/s ist der Anteil der in das intakte Hutgestein übertretenden Lösung größer als 50 %.
- Aufgrund der Zerblockung der Schichtenfolge DGL verlaufen die Grundwasserflüsse in guter Näherung in der Schichtenfolge entgegen deren Fallrichtung und im intakten Hutgestein entlang von Vertikalschnitten quer zum Allertal und parallel zum Einfallen der Schichtenfolge.

Diese Ergebnisse erlauben, die Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung im Hutgestein und im Deckgebirge unter Berücksichtigung von Dichteeffekten mit 2-dimensionalen Modellrechnungen zu simulieren.

Ziel der im vorliegenden Bericht dargestellten Modellrechnungen ist, den Einfluss von Dichteeinwirkungen auf die Grundwasserbewegung im Hutgestein und im Deckgebirge sowie auf die Ausbreitung von gesättigter NaCl-Lösung aus dem Grubengebäude zu untersuchen. Mit den Modellrechnungen soll speziell untersucht werden, ab welcher Auspressrate aus dem Grubengebäude sich das Strömungsfeld signifikant ändert, wie sich die Abflüsse auf typische Fließwege aufteilen und wie sie den in Kapitel 6 definierten verschiedenen Typen von Austragswegen zuzuordnen sind.

Die Modellrechnungen werden mit den Programmen SoTraCoF und NAMMU in zwei Dimensionen für die Vertikalschnitte 5 (quer zur Aller durch den Zentralteil des ERAM) und 6 (rund 750 m SE von Schnitt 5) durchgeführt.

1.2 Fragestellung

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit des ERAM – und zwar sowohl für die Szenarienanalyse als auch als Grundlage für die Konsequenzenanalyse – ist für das Hutgestein/Deckgebirge die folgende Frage zu beantworten:

Falls an einem vorgegebenen Ort am Salzspiegel Lösung mit einer gegebenen Rate aus dem Grubengebäude aus- und in die Schichtenfolge DGL eingepresst wird, fließt welcher Anteil dieser Lösung entlang der Schichtenfolge DGL in die darüber liegenden Schichten und welcher Anteil in das die DGL beidseitig begrenzende „intakte“ Hutgestein?

Die Auspressung von Lösung aus dem Grubengebäude in die Schichtenfolge DGL wird an zwei Orten am Salzspiegel unterstellt: In einer Einpressstelle an der Basis der Schichtenfolge DGL im Gebiet von Bartensleben – Zentralteil (Schnitt 5¹) und einer zweiten Einpressstelle ca. 750 m nordwestlich davon (Schnitt 4, Nordfeld). Diese zwei Einpressstellen stehen jeweils mit einer insgesamt 200 m langen, durchlässigen Subrosionsrinne im Kaliflöz entlang der Verschneidung DGL/Salzspiegel in hydraulischem Kontakt.

Unter Annahme eines instantanen Vollaufens der Grube beträgt die Auspressrate aus der Grube im Referenzfall des Langzeitsicherheitsnachweises [13] zwischen den Zeitpunkten 100 und 100'000 Jahre rund 10 m³/a (Abbildung 1). Den hier vorgestellten und diskutierten Modellrechnungen wird eine Auspressrate aus dem Grubengebäude von 10 m³/a zugrunde gelegt.

1.3 Berichtaufbau

In Kap. 2 werden das Modellkonzept (Wahl der Schnittlage, hydrostratigraphischer Aufbau der beiden Schnitte, Randbedingungen), die realisierten 2D Modelle, die hydraulischen und transportrelevanten Parameter sowie die Durchführung der Rechnungen beschrieben. Kap. 3 gibt einen Überblick über die durchgeführten Rechnungen, die verwendeten Programme und das Vorgehen beim Auswerten und Darstellen der Rechenergebnisse. In Kap. 4 werden die Rechnungen für den Referenzfall dargestellt. Kap. 5 enthält die Rechnungen mit Auspressung von Salzlösungen aus dem Grubengebäude. Die Interpretation der Auspressrechnungen erfolgt in Kap. 6. Die Schlussfolgerungen zu den Salzwasserrechnungen werden in Kap. 7 gezogen.

¹ Die Bezeichnung der Schnitte bezieht sich auf [10]. Ihr Verlauf ist in Abbildung 5 dargestellt.

2 Modellkonzept, Randbedingungen, Parameter

2.1 Auswahl der Modellschnitte für 2D Rechnungen

Die Auswahl und Definition von geologischen Schnitten für ein 2D Modell, mit dem die Beeinflussung des Fließfeldes durch die mit der Mineralisierung verbundenen Dichteeffekte untersucht werden soll, hat folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Die Orientierung des geologischen Schnitts muss weitestgehend parallel zu der Grundwasserfließrichtung verlaufen.
- Die Lage des Schnittes sollte im Hinblick auf die Zielsetzung eher zu ungünstigen Modellresultaten führen. Dies bedeutet hier höhere Wasserflüsse und kürzere Laufzeiten durch das Modellgebiet, als bei einer Berücksichtigung der wahren dreidimensionalen Verhältnisse zu erwarten wären.

Wesentlich für die potentialgetriebene Hydraulik im Modellgebiet sind die beiden Talflanken Lappwaldscholle und Weferlinger Triasplatte. In diesen erfolgt in den Süßwasserrechnungen ein Fluss gegen das Allertal, ungefähr senkrecht zur Talachse, so dass die Charakterisierung des dichteabhängigen Fließfeldes des Gebietes ERAM mit einem SW-NE verlaufenden vertikalen 2D Modell erfolgen kann.

Allerdings wird im Lappwald dieses Fließfeld durch den unteren Rhätaquifer (L5-K2/144/*ko1* in [10]) etwas modifiziert. In diesem erfolgt in den 3D Süßwasserrechnungen in den Rechenfällen R43 und R44 ein Fluss nach Norden [10]. Dieser Umstand ist bei der Festlegung der Randbedingungen für die Salzwasserrechnungen zu berücksichtigen.

2.1.1 Schnittrichtung

Die Schnittrichtung verläuft in der Hauptfließrichtung und damit senkrecht zum Allertal, d.h. SE-NW, parallel zu den Modellschnitten 1 bis 7 durch das 3D Süßwassermodell (Anlage 1).

2.1.2 Schnittlage

Der Schnitt soll das Einlagerungsgebiet queren, also im Gebiet der Süßwasser-Modellschnitte 4 bis 7 liegen (Anlage 1).

Die folgende Diskussion von Schnitten verwendet die gleiche Bezeichnung der hydrogeologischen Einheiten wie bei der 3D Modellierung [10]. Diese ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Modellschnitte 5, 6 und 7 (Abbildung 2) unterscheiden sich im Allertal wie folgt:

- Im Modellschnitt 5 durch den Schacht Bartensleben wird der Ausstrich der Schichtfolge DGL an der Obergrenze des Hutgesteins von Keuper (A11/248/kmS/ $6,9 \cdot 10^{-9}$ m/s⁽²⁾) überlagert.
- Weiter südlich (Schnitt 7), außerhalb der Ausdehnung der Grube Bartensleben, streicht die Schichtenfolge DGL in den östlichen Teil des in jenem Abschnitt verzweigten Oberkreidetrogs aus (A7/223/kroALu/ $6 \cdot 10^{-9}$ m/s).
- Im intermediären Schnitt 6 streicht die Schichtenfolge DGL ebenfalls an die Oberkreide aus (A7/223/kroALu/ $6 \cdot 10^{-9}$ m/s), jedoch in Randlage des Oberkreidetrogs, so dass die Gesamtmächtigkeit der Kreide nur 20 bis 30 m beträgt.

Die Entwicklung der Mächtigkeit des Hutgesteins, des Oberkreidetrogs und des Keuper entlang dem Allertal geht aus Abbildung 2 hervor.

Abbildung 4 zeigt die Topographie der Hutgesteinsoberfläche mit der Ausbisslinie der DGL sowie dem Verlauf der Aller. In Abbildung 5 sind die Einheiten angeführt, die den Ausbiss der Schichtenfolge DGL an der Hutgesteinsoberfläche überlagern. Wie in [12] gezeigt wurde, hat die Überlagerung der Schichtenfolge DGL an der Hutgesteinsobergrenze keinen nennenswerten Einfluss auf die Grundwasserbewegung im Hutgestein.

Da potentielle Auspressorte aus dem ERAM im Zentralteil liegen, ist eine Schnittlage durch den Zentralteil wünschenswert. Allerdings sind bei der Wahl der Schnittlage auch andere Kriterien zu berücksichtigen.

Nachfolgend sollen mit einem Vergleich

- der Schnitte 5, 6 und 7 durch das 3D Süßwassermodell ERAM (Abbildung 2) und
- der Schnitte 2-2' und 1-1' der hydrogeologischen Standortbeschreibung [4]

die skizzierten Unterschiede deutlicher herausgearbeitet werden (Schnittlage siehe Anlage 1). Dabei muss klar sein, dass die schematisierten hydrogeologischen Schnitte in [4] und in noch stärkerem Maße die Modellschnitte in [10] Vereinfachungen der erkundeten geologischen Situation darstellen, die auf die Wiedergabe der wesentlichen Zusammenhänge des Strukturbaus und der Grundwasserführung ausgerichtet sind.

2.1.3 Vergleich von Schnitt 2-2' mit Modellschnitt 5

Der Vergleich von Schnitt 2-2' ([4], 0,3 km südlich von Schacht Bartensleben) mit dem durch Schacht Bartensleben verlaufenden Modellschnitt 5 (Abbildung 2) zeigt folgende Verhältnisse:

- Triasplatte: In der Triasplatte kommen sowohl im Schnitt 2-2' als auch im Modellschnitt 5 von oben nach unten die Einheiten T2-K1/361/so, T3/363/smS, T4/364/smV, T5/365/smVS, ferner T7/381/NE-Randstörung vor.
- Im Ostteil des Allertals ist die Schichtenfolge in den Schnitten 2-2' und Modellschnitt 5 identisch: A9-K2/246/kmSM+ko1, A10/247/kmGo, A11/248/kmS, A12/249/kmGu-mu.

² Kalibrierter k_f -Wert R42 [10]

- Im Hutgestein wird die Schichtenfolge DGL A13-K2/273/DGL in beiden Schnitten von Keuper überlagert: in Schnitt 2-2' vom Grenzbereich A11/248/kmS zu A10/247/kmGo, im Modellschnitt 5 von A11/248/kmS.
- In Bezug auf den Oberkreidetrog, die SW-Randstörung und die Lappwaldscholle stimmen die beiden Schnitte weitgehend überein.

Gegen NE verlagert sich von Schnitt 5 zu Schnitt 4 (Abbildung 2) in der östlichen Talhälfte des Allertals die Verbreitungsgrenze A10/247/kmGo und A11/248/kmS nach NE; A9-K2/246/kmSM+ko1 nimmt stark an Bedeutung zu; die Schichtenfolge DGL mündet in A9-K2/246/kmSM+ko1.

Dieser Veränderung der Geometrie in der östlichen Talhälfte des Allertals zwischen Schnitt 5 und Schnitt 4 wird im 2D Modell Schnitt 5mod Rechnung getragen (vgl. Kap. 5.7.1).

2.1.4 Vergleich von Schnitt 1-1' und Modellschnitt 7 mit den Modellschnitten 5 und 6

Die beiden Schnitte 1-1' [4] und 7 sind ca. 1,1 km bzw. 1,4 km südlich von Schacht Bartensleben gelegen und zeigen einen weitgehend identischen Aufbau. Der Hauptunterschied gegenüber Modellschnitt 5 besteht darin, dass die Schichtenfolge DGL (A13-K2/273/DGL) an der Hutgesteinsobergrenze an die Oberkreide (A7/223/kroALu/6·10⁻⁹ m/s) ausstreicht.

Im intermediären Modellschnitt 6 (siehe Abbildung 2) ist der östliche Ast der Oberkreidesenke bis auf deren Basisschicht (A7) reduziert. Die Schichtenfolge DGL stößt an die Oberkreide (A7/223/kroALu/6·10⁻⁹ m/s); deren Basis befindet sich lediglich rund 20 m unter der Geländeoberfläche. Bezüglich des Ausbreitungsweges durch die Oberkreide erscheinen die Verhältnisse in Schnitt 6 ungünstiger als in Schnitt 7.

Von Schnitt 6 zu Schnitt 5 verlagert sich die Position der Aller bezogen auf den Ausbiss der DGL an der Oberfläche Hutgestein um 0,3 km nach Osten (Abbildung 4), wobei in Schnitt 6 und 7 zudem die Ausbissfläche der DGL an der Oberfläche des Hutgesteins direkt unter der Aller liegt. Die Schnitte 6 und 7 weisen damit bezüglich der Überlagerung der Schichtenfolge DGL, der Mächtigkeit und Durchlässigkeit der das Hutgestein überlagernden Sedimente sowie in Bezug auf die Position der Aller ungünstigere Verhältnisse als die Schnittlage 5 auf.

2.1.5 Wahl der Schnittlage

Eine Schnittlage durch den Schacht Bartensleben und den Zentralteil (Modellschnitt 5) wird – wie oben bereits begründet – für die Salzwasserrechnungen a priori bevorzugt.

Andererseits weist Schnitt 6 ungünstigere Verhältnisse bezüglich der hydraulischen Anbindung der Schichtenfolge DGL an die oberflächennahen Grundwassersysteme auf. Von einer entsprechenden Modifizierung des Schnittes 5 wurde allerdings Abstand genommen, da der hydrogeologische Bau der Allertalzone in den beiden Schnitten 5 und 6 unterschiedlich ist.

Statt dessen wurden die Modellrechnungen der ersten und zweiten Phase (Untersuchung des Zustandes der Dichteverteilung ohne die heutigen Entnahmen aus Förderbrunnen mit zwei Schnitten durchgeführt: Einerseits Schnitt 5 durch Schacht

Bartensleben mit Zentralteil (Abbildung 7) und andererseits einem zweiten Schnitt 0,75 km weiter südlich (Schnitt 6, Abbildung 8).

Der Schnitt 5 wurde gegenüber [10] im Nahbereich des Schachtes Bartensleben aufgrund neuerer Erkenntnisse ([7], vgl. Abbildung 6) modifiziert und in der Lappwaldscholle bis zum Salzlager des Mittleren Muschelkalkes, in der Weferlinger Triasplatte bis zur Obergrenze des Zechstein erweitert.

Für das 2D Modell Schnitt 6 (Abbildung 8) wurde der Schnitt 6 gemäß [10] aufgrund der Angaben in Schnitt 2-2' angepasst. Die Angaben betrafen die Geometrie des Unteren Gipskeuper und Mittleren Muschelkalk (Lappwald) sowie jene des Unteren Buntsandstein der Weferlinger Triasplatte.

Für die Modellrechnungen der dritten Phase (Einpressrechnungen) wurden die 2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 5mod verwendet. Dabei wurde im 2D Modell Schnitt 5mod der Steinmergelkeuper (A9-K2/246/kmSM+ko1) zur Berücksichtigung von dessen Bedeutung weiter im Norden (Gebiet von Schnitt 4) modifiziert (vgl. Kap. 5.7.1).

2.1.6 Seitliche Ausdehnung

Beide 2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 6 enden – wie das 3D Süßwassermodell – an der topographischen Wasserscheide des Lappwaldes und der Weferlinger Triasplatte.

2.1.7 Geometrie

Die den 2D Modellen zugrunde liegenden Schnitte 5 und 6 sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

In der Lappwaldscholle werden neben den im 3D Süßwassermodell enthaltenen hydrogeologischen Einheiten zusätzlich folgende Einheiten und Salzlager im Modell berücksichtigt:

- Die Einheiten L9/kmGu und L10/mm-km zwischen der Basis des Schilfsandstein und dem Salzlager im Mittleren Muschelkalk.
- Die Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper
- Die Westflanke der Salzstruktur und das Steinsalzlager im Mittleren Muschelkalk bilden die Modellbasis im Bereich der Lappwaldscholle.

Diese Salzlager werden als geringdurchlässige Einheiten ($k_f = 10^{-14}$ m/s) mit geringer Porosität ($n = 0,1 \%$) und relativer Salzkonzentration $C=1$ im gesamten Bereich modelliert.

Im Allertal bildet wie im 3D Süßwassermodell der Salzspiegel der Salzstruktur die Modellbasis. Die Modellgeometrie wird aus dem 3D Süßwassermodell übernommen.

In der Weferlinger Triasplatte wird die Modellbasis an die Obergrenze des Zechstein gelegt. Unterhalb der Volpriehausen-Folge bis zur Modellbasis werden Schluff- und Tonsteine mit seltenen Feinsandstein-Einlagerungen des Unteren Buntsandstein

(T6/su) modelliert. Diese Schichten enthalten keine Salzlagen. Der in Schnitt 3-3' [4] eingezeichnete Kontakt Unterer Buntsandstein/Zechstein (Residuen) wurde unter Beibehaltung der Mächtigkeit von T6/su nach Osten bis zur Modellgrenze verlängert.

Entlang der Modellbasis kommt nur in der Nähe des Allertals Salz vor. Die vermutliche Grenze der Salzverbreitung ist in den beiden Schnitten (Abbildung 7, Abbildung 8) eingezeichnet.

Oberhalb der Solling-Folge ist in der stratigraphischen Schichtreihe ein 10-15 m mächtiger, oben und unten von Anhydritschichten eingefasster Salzhorizont ausgebildet: das Rötsalz. Dieses Salzlager ist jedoch nur noch rudimentär verbreitet und fehlt über weite Strecken infolge Subrosion. Es wird im 2D Modell nicht berücksichtigt.

Die in den 2D Modellen vorhandenen hydrostratigraphischen Einheiten und die im 3D Süßwassermodell ERAM und in den 2D Schnitten zur Anwendung kommenden Bezeichnungen der Materialklassen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

2.2 Parameter und Randbedingungen für Grundwasserströmung und Transport

2.2.1 Durchlässigkeit und Porosität

2.2.1.1 k_f -Werte

Als Durchlässigkeitswerte für die aus dem 3D Süßwassermodell übernommenen Modellbereiche werden die sich aus den Kalibrierungsrechnungen R42 [10] ergebenden k_f -Werte verwendet (Tabelle 1).

2.2.1.2 Porosität

Zur Wahl der Porositätswerte in den verschiedenen Phasen der Modellrechnungen ERAM ist folgendes zu bemerken:

- Bei den Porositäten ist zu unterscheiden zwischen a) der Fließ- oder effektiven Porosität und b) der zugänglichen Matrixporosität.
- Für dichteabhängige Rechnungen ist die Vorgabe beider Porositätswerte erforderlich. Die advektiv/dispersiven Fließgeschwindigkeiten hängen von der effektiven Porosität ab. Der diffusive Transport von Wasserinhaltsstoffen wird von der Matrixporosität beeinflusst.
- Trajektorienrechnungen (Süßwasserrechnungen, dichteabhängiges Fließfeld) erfordern somit die Vorgabe der Fließ- oder effektiven Porosität.

Der BGR-Bericht [4] enthält Untersuchungsergebnisse zu den Porositäten und Angaben zu Bandbreiten. Dabei handelt es sich um die Bandbreite der effektiven Porosität. In den Süßwasserrechnungen wurden für die Trajektorienrechnungen im Rechenfall R44 die Mittelwerte der Bandbreiten für die effektiven Porositäten benützt (vgl. [10], Tabellen 4 bis 6).

Die Wahl der Porositäten für die Salzwasserrechnungen hängt vom Verhältnis der vom Salztransport genutzten, d.h. effektiven Matrixporosität zur gesamten Matrixporosität ab. Dieses Verhältnis kann in Kluftwasserleitern deutlich kleiner als 1 sein und hängt dann von der genutzten Matrixtiefe und vom mittleren Kluftabstand ab. Ist dieses Verhältnis klein, so kann die Fließporosität angewendet werden; erreicht es einen Wert gegen 1, so ist die Verwendung der Matrixporosität angebracht.

Eine Beurteilung der verschiedenen hydrogeologischen Einheiten im Modell führt zu folgender Parameterfestlegung: Für die geringdurchlässigen, vor allem in größerer Tiefe gelegenen Einheiten ist die Matrixporosität der maßgebliche Wert, während für die stärker durchlässigen Einheiten die Fließporosität maßgebend ist. Basierend auf den angeführten Überlegungen werden für die Salzwasserrechnungen die in Tabelle 1 zusammengestellten Porositätswerte („effektive Matrixporosität“) verwendet.

Die Trajektorienrechnungen erfolgen konservativ mit den Fließporositäten. Dabei werden dieselben Werte wie in den 3D Süßwasserrechnungen ([10], Tabellen 4 bis 6) verwendet.

2.2.1.3 Neue Einheiten

Für die in die 2D Dichtemodelle aufgenommenen Einheiten, die nicht im 3D Süßwassermodell enthalten sind, werden folgende k_f - und Porositätswerte festgelegt:

Bezeichnung	Einheit	K-Klasse 2D Modell	k_f -Wert, m/s	Effektive Porosität, %
Triasplatte				
Unterer Buntsandstein: Schluff- und Tonsteine mit seltenen Feinsandstein-Einlagerungen	T6/su	42	$1 \cdot 10^{-11}$	1
Lappwaldscholle				
Oberer Gipskeuper, Salzlager	L7/kmGo-Salzlager	12	$1 \cdot 10^{-14}$	0,1
Unterer Gipskeuper: Tonsteine	L9/kmGu	16	$1 \cdot 10^{-11}$	5
Unterer Gipskeuper: Salzlager	L9/kmGu-Salzlager	17	$1 \cdot 10^{-14}$	0,1
Mittlerer Muschelkalk: Tonsteine	L10/mm-km	18	$1 \cdot 10^{-11}$	5

2.2.2 Dispersionslängen, Diffusionskoeffizient

Für die longitudinale und die transversale Dispersionslänge werden Werte von $\alpha_L = 30$ m bzw. $\alpha_T = 3$ m verwendet. Als Diffusionskoeffizient wird im gesamten Modell ein einheitlicher Diffusionskoeffizient D_m von $5 \cdot 10^{-10}$ m²/s angesetzt (Tabelle 4 bis Tabelle 7).

2.2.3 Randbedingungen des Strömungsteils

Die Strömungsrandbedingungen lauten wie folgt:

- An der Modellobergrenze wird ein Festpotential (Dirichlet-Randbedingung) vorgegeben. Dieses wird aus dem 3D Süßwassermodell ([10], Rechenfall **R44**, ohne Grundwasserentnahme im Brunntental) entnommen.
- Die Modellbasis ist undurchlässig. Sie wird in der Lappwaldscholle durch die Obergrenze des Salzlagers im Mittleren Muschelkalk, im Allertal durch die Hutgesteinsbasis und in der Triasplatte durch den Kontakt zum liegenden Zechstein definiert.

- Der westliche und der östliche Modellrand sind undurchlässig.

2.2.4 Randbedingungen für die dichtebestimmende Salzausbreitung

Der Salzgehalt im Grundwasser wird mit C angegeben:

- C = 0 Süßwasser, Dichte 1000 kg/m³
- C = 1 gesättigte NaCl-Lösung, Dichte 1200 kg/m³

Die Randbedingungen für die Salzausbreitung sind:

- Über die vertikalen Modellränder findet kein Salztransport statt.
- Über den oberen Rand zutretendes Fluid erhält die Konzentration C=0; beim Austritt über den oberen Rand erfolgt ausschließlich advektiver Transport ($dC/dn=0$).
- An der Modellbasis in der Lappwaldscholle und im Allertal sowie im Bereich der Salzlager des Gipskeuper *kmGo* und *kmGu* der Lappwaldscholle wird eine Konzentration von C=1 vorgegeben. Die Grenze der Salzverbreitung des Zechstein in der Weferlinger Triasplatte wurde in Absprache mit der BGR festgelegt. Im NE-Abfall der Allertal-Salzstruktur wurde auf einer Breite von 0,9 km eine Salzkonzentrationsrandbedingung mit C=1 festgelegt (Abbildung 7, Abbildung 8).

2.3 Realisierte Modelle

Die erstellten 2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 6 sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Die Position des oberen Randes (Modellobergrenze) entspricht der im 3D Süßwassermodell im Rechenfall R44 ([10], ohne Grundwasserentnahme im Brunnen-tal) resultierenden Grundwasseroberfläche entlang der Schnittlagen 5 bzw. 6.

Die Anzahl der Knoten und Elemente der beiden 2D Modelle geht aus nachstehender Aufstellung hervor. Die Ausdehnung der Elemente ist durchgehend kleiner als 30 m.

	Modellschnitt 5	Modellschnitt 6
Anzahl Elemente	17060	10701
Anzahl Knoten	17841	11221

Das zusätzlich in den 2D Einpressrechnungen verwendete 2D Modell Schnitt 5mod weist die gleiche Diskretisierung wie das Modell Schnitt 5 auf und unterscheidet sich lediglich in der Parameterbelegung (siehe Kap. 5.7.1).

2.4 Durchführung der Rechnungen

Vorgängig zu den Modellrechnungen mit Dichteeffekten (Salzwasserrechnungen) werden mit den beiden 2D Modellen Süßwasserrechnungen durchgeführt und deren Ergebnisse mit dem Potential- und Fließfeld im 3D Süßwassermodell ([10], Rechenfall **R44**) in derselben Schnittlage verglichen. Dies erlaubt zu überprüfen, in welchem Ausmaß 2D Modelle am Standort ERAM die grundsätzlich dreidimensionale Grundwasserbewegung beschreiben können.

In einer ersten Phase der Salzwasserrechnungen werden Aussagen über den stationären Zustand der Dichteverteilung gewonnen (2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 6).

In einer zweiten Phase wird mit instationären Rechnungen die mutmaßliche heutige Dichteverteilung in der Triasplatte näher charakterisiert (2D Modell Schnitt 5).

Die 3D Einpressrechnungen in [12] haben gezeigt, dass bei einer Zerblickung der Schichtenfolge DGL die Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung im Hütgestein und im Deckgebirge mit 2-dimensionalen Modellrechnungen unter Berücksichtigung von Dichteeffekten simuliert werden kann. In der dritten Phase erfolgt die Charakterisierung der Ausbreitung ausgepresster Lösung aus dem Zentralteil und dem Nordfeld mit stationären 2D Salzwasserrechnungen (2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 5mod).

Mit den 2D Modellen werden Rechnungen mit folgenden Programmen durchgeführt:

- Süßwasserrechnungen mit CGM [2] und NAMMU [3]
- Instationäre Salzwasserrechnungen bis zum Erreichen eines quasi-stationären Zustandes mit SoTraCoF ([8], [9])
- Stationäre Salzwasserrechnungen mit NAMMU [3]

3 Überblick über die durchgeführten Rechnungen

3.1 Rechenfälle

Mit den 2D Modellen Schnitt 5, Schnitt 6 sowie Schnitt 5mod (Kap. 5.7.1) sind mit den Programmen CGM, NAMMU und SoTraCoF die in Tabelle 3 aufgeführten Rechenfälle gerechnet worden.

Die Festlegung der hydraulischen Randbedingungen erfolgte mit Süßwasserrechnungen. Die in den Rechenfällen **R5-01** und **R6-01** resultierende Potentialverteilung wird mit jener im 3D Süßwassermodell ([10], Rechenfall **R44**, ohne Grundwasserentnahme im Brunnental) entlang des Verlaufs der beiden Schnitte 5 und 6 verglichen.

In den Salzwasserrechnungen mit NAMMU erforderte die Berechnung der stationären Lösung ein zeitaufwendiges Parameter-Stepping; die stationäre Lösung konvergierte erst nach einer vorhergehenden instationären Rechnung (vgl. Kap. 4.1.3.1).

3.1.1 Rechnungen mit dem Programm SoTraCoF

Daher wurden parallel zu den Versuchen, mit NAMMU eine stationäre Lösung zu erreichen, instationäre SoTraCoF-Rechnungen durchgeführt.

Zur Verkürzung der Rechenzeit, um eine quasi-stationäre Verteilung der Salzkonzentration zu ermitteln, wurden die beiden Basis-Rechenfälle **R5-02** und **R6-02** mit einer möglichst gut geschätzten Anfangssalzverteilung gestartet.

Die Rechenfälle **R5-03** und **R5-04** dienten zur weiteren Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der Salzverteilung in der Weferlinger Triasplatte.

Die bis zu einem quasi-stationären Zustand gerechneten SoTraCoF-Rechnungen werden in Kap. 4 beschrieben.

3.1.2 Rechnungen mit dem Programm NAMMU 6.3

In der mit NAMMU 6.3 durchgeführten Rechnung **R5-05** mit dem 2D Modell Schnitt 5 war es nach ausgedehnten Testrechnungen möglich, eine direkte stationäre Lösung zu erreichen. Es zeigte sich, dass der Zeitaufwand für weitere Rechnungen, ausgehend von dieser stationären Lösung, weit geringer ist. Aus diesem Grunde werden die stationären Rechnungen zu den Auspressszenarien (Kap. 5) mit NAMMU durchgeführt.

Die stationäre NAMMU-Rechnung **R5-05** für die Verhältnisse ohne die heutigen Entnahmen aus Förderbrunnen und ohne Lösungsauspressung aus der Grube) wird in Kap. 4.1.3 dargestellt.

Aufbauend auf den Rechnungen zu den Verhältnissen ohne die heutigen Entnahmen aus Förderbrunnen werden zur Untersuchung der Auswirkungen von Auspressungen aus dem Grubengebäude folgende Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 durchgeführt:

- Rechenfälle **R5-06**, **R5-07**, **R5-08** mit einem k_f -Wert des Hutgesteins von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s und mit spezifischen Einpressraten am Salzspiegel in die Schichtenfolge DGL von $0,02 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{a}$, $0,2 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{a}$ und $1,0 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{a}$.
- Mit einer auf 10^{-11} verringerten Durchlässigkeit des Hutgesteins werden die Rechenfälle **R5-09** und **R5-10** gerechnet (spezifische Einpressrate von $0,02$ bzw. $0,2 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{a}$).
- Um die Durchlässigkeitsverhältnisse des Schnittes 5 an jene entlang Schnitt 4 anzugleichen, wird im 2D Modell Schnitt 5mod die Durchlässigkeit der Modelleinheit A10/247/kmGo (Oberer Gipskeuper) von $1,3 \cdot 10^{-11}$ m/s auf den Wert der Einheit A9-K2/246/kmSM+ko1 (Steinmergelkeuper, $4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s) erhöht. Der Rechenfall **R5mod-03** wird mit einer spezifischen Einpressrate von $0,02 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{a}$ durchgeführt.
- Zu Vergleichszwecken werden die Süßwasserrechenfälle **R5-01** und **R5mod-01** sowie die Salzwasserrechnungen **R5-05** und **R5mod-02** ohne Einpressung herangezogen.

Die Einpressrechnungen mit den 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 5mod werden in Kap. 5 dargestellt und diskutiert.

3.2 Programm, Rechengenauigkeit

Für die Salzwasserrechnungen wird von SoTraCoF die Programmversion 3.01 ([8], [9]), von NAMMU die Version 6.3 [3] eingesetzt.

Die verwendeten Programme weisen unterschiedliche Eigenschaften und Lösungsansätze auf:

- Die Rechnungen mit dem Programm SoTraCoF werden mit quadratischen Interpolationsfunktionen (FE-Formfunktionen) durchgeführt.
- In NAMMU 6.3 wird ein „mixed interpolation approach“ benutzt, um das Problem des nichtlinearen gekoppelten Grundwasserflusses und Salztransportes zu lösen. Dies bedeutet, dass NAMMU für die Druckberechnung quadratische und für Konzentrationsberechnung lineare Ansatzfunktionen verwendet.
- SoTraCoF 3.01 bietet zwei Verfahren zur Berechnung der Darcygeschwindigkeit an: kontinuierliche und diskontinuierliche Darcygeschwindigkeit an Elementgrenzen.

In den SoTraCoF Rechnungen für den vorliegenden Bericht werden die Darcygeschwindigkeiten diskontinuierlich an den Elementgrenzen gerechnet. Die Berechnung erfolgt in SoTraCoF mit der in SUTRA angewendeten Methode [1].

Für die Lösung des Salztransportes werden unterschiedliche numerische Ansätze verwendet: In NAMMU kommt die „mass-fraction formulation“ zur Anwendung, während SoTraCoF 1.0 wahlweise mit der Boussinesq-Näherungslösung oder einer Verbesserung davon („Boussinesq extended“) rechnet. Bei den Rechnungen mit SoTraCoF wurde die Boussinesq-Näherungslösung verwendet.

- Die SoTraCoF-Rechnungen erfolgten größtenteils mit einer Genauigkeit des Löser von 10^{-6} . Vor dem Abschluss der Rechnung wurde während rund 100 Iterationen mit einer großen Genauigkeit (10^{-16}) gerechnet, um eine präzisere Darstellung des Fließfeldes zu ermöglichen. Diese Maßnahme ist insbesondere für die Darstellung der vektorisierten Darcyflüsse in den tieferen Abschnitten des Lappwaldes, in denen außerordentlich geringe Darcyflüsse (10^{-17} bis 10^{-13} m/s) berechnet werden, erforderlich.
- In beiden Programmen wird die Wasserdichte als Funktion des Salzgehaltes pro Masseneinheit Lösung berechnet. Als Salzgehalt für eine gesättigte Salzlösung kommen in SoTraCoF 3.01 und NAMMU 6.3 Werte von 0,297 kg/kg Lösung bzw. 0,311 kg/kg Lösung zur Anwendung. Der Zusammenhang zwischen Salzgehalt und Wasserdichte ist in SoTraCoF linear, in NAMMU annähernd linear. Die Resultate werden in SoTraCoF und NAMMU als relative Konzentration dargestellt, wobei die gesättigte Salzlösung eine Konzentration $C=1$ aufweist.

In Abbildung 16 und Abbildung 17 (Rechenfall **R5-02**, SoTraCoF) zeigen die Konzentrationsisolines im Lappwald, im Allertal und in der Triasplatte bei geringen Konzentration ($C < 0,1$) Oszillationen. Unruhige Verläufe der Isolines sind auch in **R6-02** (Abbildung 33 und Abbildung 34) oder in **R5-04** (Abbildung 28) zu beobachten. Diese Oszillationen werden als von geringer Bedeutung für die Bewertung der Ergebnisse betrachtet.

3.3 Trajektorienrechnungen

3.3.1 Startpunkte

Die Trajektorienrechnungen werden mit den Startpunktverteilungen A und B durchgeführt (vgl. Abbildung 9).

Die 12 Startpunkte A (A1 bis A12) sind im Gebiet der Einpressung 0,7 m oberhalb der Basis der Schichtenfolge DGL angeordnet. Die 19 Startpunkte (B1 bis B19) der Startpunktverteilung B decken die gesamte Breite der Schichtenfolge DGL 2,1 m bis 4,1 m oberhalb des Salzspiegels ab.

3.3.2 Diskretisierung der Schichtenfolge DGL

Die Schichtenfolge DGL ist durchgehend mit 2D Elementen in 2 Elementlagen diskretisiert (Abbildung 10).

3.3.3 Rechenprogramm für die Trajektorienrechnungen

Die Trajektorienrechnungen werden mit dem in NAMMU 6.3 implementierten Trackprogramm durchgeführt.

3.4 Darstellung

Die Darstellung der Resultate erfolgt mit einer Reihe von Abbildungen und Tabellen:

- Da die Einpressungen - außer im Rechenfall **R5-08** mit der höchsten angewendeten Einpressrate - keinen Einfluss auf die Verhältnisse im Lappwald und in der Weferlinger Triasplatte zeigen, wird mit der erwähnten Ausnahme nur der Abschnitt Allertal dokumentiert.
- In einer ersten Abbildung werden die Konzentrationsverteilung ($C = 0$ bis 1 , bei Bedarf ebenfalls $C = 0,0$ bis $0,1$) und die Darcyflüsse im Allertal dargestellt.
- Die Drücke an der Basis und am Top der Schichtenfolge DGL, umgerechnet in Süßwasserdruckspiegelhöhen, sind für alle NAMMU-Rechenfälle in Tabelle 9 wiedergegeben. Dieser Wert wird nur zu Vergleichszwecken verwendet; um den Einfluss der Grundwasserdichte und der Druckerhöhung in den Einpressungsrechnungen zu illustrieren.
- Der Salzinhalt im gesamten 2D Modell Schnitt 5 in den verschiedenen Rechnungen geht aus Tabelle 8 hervor.
- Der durch den Ausbiss der Schichtenfolge DGL an der Obergrenze des Hutgesteins berechnete Wasserfluss ist in Tabelle 10 enthalten.
- Die Resultate der Trajektorienrechnungen werden in drei Abbildungen dargestellt: Als Überblickdarstellungen werden die Trajektorienverläufe gemeinsam mit der Darstellung des hydrogeologischen Aufbaus des Allertals (a) und mit dem Darcyfluss (b) abgebildet. Eine dritte Abbildung (c) enthält eine detailliertere Darstellung der Darcyflüsse und Trajektorienverläufe in Hutgestein und DGL.

3.5 Auswertung

Für die Auswertung der Fließpfadberechnungen werden zwei unterschiedliche Klassifizierungen verwendet:

1 Klassifizierung hinsichtlich Langzeitsicherheit

Für die Analyse der 3-dimensionalen Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung unter Vernachlässigung der Dichteeffekte [12] wurden die potentiellen Austragswege in vier Klassen W1 bis W4 gegliedert. Es sind dies

- W1: Entlang der Schichtenfolge DGL bis zu einem direkten hydraulischen Kontakt mit dem Oberkreidetrog
- W2: Entlang der Schichtenfolge DGL und/oder durch das intakte Hutgestein in den Steinmergelkeuper und durch diesen aufsteigend ins Quartär
- W3: Entlang der Schichtenfolge DGL und/oder durch das intakte Hutgestein in den Schilfsandstein und von dort entweder durch den darüber liegenden Oberen Gipskeuper oder über die östlich angrenzende Randstörung und die Triasplatte an die Geländeoberfläche
- W4: Durch das intakte Hutgestein direkt in den Oberkreidetrog

Repräsentanten dieser vier Klassen von potentiellen Austragswegen sind in Abbildung 63 und Abbildung 64 dargestellt.

2 – Modelltechnische Klassifizierung (Zwischenschritt)

In Bezug auf ihren Verlauf werden die Fließpfade drei Typen zugewiesen:

- (i) Typ *i*: Hutgestein - Oberkreidetrog (Jura, z.T. Oberkreide) - Quartär (z.T. Teilverläufe im Jura und im obersten Bereich des Keuper)
- (ii) Schichtenfolge DGL ⁽³⁾ - Hutgestein – Schilfsandstein – Aufstieg an die Oberfläche durch Oberen Keuper – Quartär innerhalb der Allertalzone
- (iii) Schichtenfolge DGL - Hutgestein – Schilfsandstein - übriger Keuper – Aufstieg an die Oberfläche in der Triasplatte

Die Mittelwerte der Pfadlängen und Fließzeiten sowie die Maximal- und Minimalwerte (Bandbreiten) der Typen *i*, *ii* und *iii* sind in Tabelle 11 enthalten. Die angegebenen Fließzeiten beziehen sich auf den Pfad zwischen den spezifizierten Startpunkten und dem oberen Rand (Modellobergrenze).

³ Teilweise direkt in den Schilfsandstein austretend

4 Modellrechnungen ohne Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude

4.1 Modellrechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5

Mit dem 2D Modell Schnitt 5 sind die stationäre Süßwasserrechnung **R5-01** und die instationären Salzwasserrechnungen **R5-02**, **R5-03** und **R5-04** ausgeführt worden. Ein Überblick über die Parameter und Randbedingungen dieser Rechenfälle ohne die heutigen Entnahmen aus Förderbrunnen ist in Tabelle 4 enthalten.

4.1.1 Süßwasserrechnung R5-01

4.1.1.1 Potentialverteilung

Die Süßwasserrechnung mit dem 2D Modell Schnitt 5 hat die Überprüfung der 2D Näherung zum Ziel. Die Rechenresultate des Süßwasserrechenfalls **R5-01** mit Vorgabe der Potentialverteilung entlang der Modellobergrenze aus dem 3D Modell (Rechenfall **R44**) sollen mit der im 3D Süßwassermodell im Rechenfall **R44** (ohne Grundwasserentnahme im Brunnental) entlang der Schnittlage 5 resultierenden Potentialverteilung verglichen werden.

Die auf das 2D Modell Schnitt 5 projizierte interpolierte (unterhalb der Basis des Schilfsandstein bzw. des Volpriehausen-Sandstein extrapolierte) Potentialverteilung aus dem 3D Süßwassermodell (Rechenfall **R44**) ist in Abbildung 11 (oben) dargestellt. Die mit dem 2D Modell und mit CGM ermittelte Süßwasser-Potentialverteilung geht aus Abbildung 11 (unten) hervor. Dabei ist zu beachten, dass das 3D Süßwassermodell an der Basis des Schilfsandstein (Lappwald) bzw. des Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte) endet, während die 2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 6 im Lappwald zusätzlich die Serie zwischen dem Schilfsandstein und dem Salzlager des Mittleren Muschelkalk sowie in der Triasplatte die Einheiten Unterer Buntsandstein enthalten.

Die in **R44** und in der Süßwasserrechnung mit Schnitt 5 resultierenden Potentiale für wichtige Einheiten der Lappwaldscholle und der Triasplatte gehen aus nachstehender Aufstellung hervor.

Einheit	Berechnetes Potential, mNN	
	3D Süßwassermodell, R44 [10]	Süßwasser-Rechnung R5-01
Lappwald		
L3/142/ <i>ko2b</i> , Mittelhät-Sandstein	134	134
L5-K2/144/ <i>ko1</i> , Unterrhät-Sandstein	128	129
L6/146/ <i>kmSM</i> , Steinmergelkeuper	129 – 122	130 – 121
L8/151,152/ <i>kmS</i> , Schilfsandstein	128 – 122	127 – 123
Weferlinger Triasplatte		
T3/363/ <i>smS</i> , Solling-Folge	128 – 123	128 – 121,5
T5/365/ <i>smVS</i> , Volpriehausen-Sandstein	158 – 123	158 – 121,5

Die mit dem 2D Modell Schnitt 5 berechnete Potentialverteilung ist derjenigen im Rechenfall R44 entlang des Verlaufs des Schnittes 5 sehr ähnlich. Insbesondere ist die

Übereinstimmung der Potentiale in den Einheiten L3/142/*ko2b*, L5-K2/144/*ko1* und T3/363/*smS*, in denen in den 3D Süßwasserrechnungen Flüsse parallel zum Allertal resultierten, sehr gut.

Die Randbedingung des Rechenfalls **R5-01** kann damit als Festpotential-Randbedingung für die Salzwasserrechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 verwendet werden.

4.1.1.2 Darcyflüsse

Die Fließvektoren der Darcyflüsse sind unter Süßwasserbedingungen horizontal vom Lappwald bzw. der Triasplatte zur Eintiefung der Oberkreide (A6/222/*kroALo*) gerichtet. Im Oberkreidetrog wird das aus dem Hutgestein aufsteigende Süßwasser von dem zur Aller (Exfiltrationszone) hin verlaufenden Abstrom aus dem Lappwald erfasst.

4.1.1.3 Trajektorienrechnungen R5-01

Die Trajektorienrechnungen für die in der Schichtenfolge DGL angeordneten Startpunktgruppen A und B bilden das oben skizzierte Potential- bzw. Darcyfließfeld ab (Abbildung 12, Abbildung 13).

- Alle bis zur Modelobergrenze verlaufenden 29 Fließpfade (von 31) sind vom Typ *i*, d.h. sie verlaufen durch das Hutgestein nach SW und steigen durch den Oberkreidetrog zur Exfiltrationszone bei der Aller auf.
- Die Pfadlängen (Tabelle 11) weisen nur eine geringe Variationsbreite von 670 m bis 820 m auf (Mittelwert 720 m).

Dies trifft ebenfalls für die Fließzeiten mit einer Bandbreite von 53'000 Jahren bis 175'000 Jahren (Mittelwert 94'000 Jahre) zu.

4.1.2 Instationäre Salzwasserrechnung R5-02

Die bis zu einem quasi-stationären Zustand ausgeführte instationäre Salzwasserrechnung **R5-02** dient zur Charakterisierung des salzwasserbeeinflussten Fließfeldes im Lappwald, im Allertal und in der Triasplatte in dem durch Schacht Bartensleben verlaufenden 2D Modell Schnitt 5 ohne die heutigen Entnahmen aus Förderbrunnen.

Die verwendete Anfangsbedingung für die Salzverteilung ist in Abbildung 14 (oben) abgebildet. Sie wurde mit vereinfachten Modellrechnungen ermittelt.

4.1.2.1 Durchführung der Rechnung

Mit dem Rechenfall R5-02 wird die zeitliche Entwicklung der Salzverteilung ausgehend von der Anfangsbedingung bis zu einem quasi-stationären Zustand simuliert. Zur Optimierung des Rechenfortschrittes wurde der Rechenvorgang in drei Phasen A, B und C mit unterschiedlichen numerischen Kriterien unterteilt.

Die nachfolgende Aufstellung enthält die wesentlichen Elemente:

Rechenfall	R5-02
Anfangsbedingung der Salzverteilung	vgl. Abbildung 14 (oben)
Salzmasse zu Beginn der Rechnung	rund 11'400 t
Rechenprogramm	SoTraCoF Version 3.01
Rechenmodus	Instationär bis zum Erreichen eines quasi-stationären Zustandes, Ausführung in drei Phasen A bis C
Berechnung des gekoppelten Salztransportes und Genauigkeit	A: Boussinesq extended, Genauigkeit 10^{-6} B: Boussinesq, Genauigkeit 10^{-6} C: Boussinesq, Genauigkeit 10^{-16}
Anzahl Zeitschritte	A = 8500 Zeitschritte, B = 128'000 Zeitschritte, C = 130 Zeitschritte
Modellzeit, Jahre	A = 190'000 Jahre, B = 2'800'00 Jahre, C = 2'000 Jahre. Insgesamt rund 3 Mio. Jahre
Mittlere Zeitschrittlänge	A und B: rund 20 Jahre, C: 14,5 Jahre
Rechenzeit CPU	A und B: 140 Tage, C: 6,5 Tage
Modellzeit pro Tag CPU	A und B: rund 21'000 Jahre. C: 290 Jahre
Salzinhalt	Modellzeit 0 Jahre = 11'400 t Modellzeit 400'000 Jahre = 10'350 t = Minimum Modellzeit 1'000'000 Jahre = 10'575 t Modellzeit 3'000'000 Jahre = 10'965 t

Die Stationarität der im Modellschnitt errechneten Salzmasse ist ein notwendiges – wenn auch nicht immer hinreichendes – Kriterium für die Stationarität der Dichterechnung. Die Entwicklung der Salzmasse im Modell wird zur nachfolgend zur Einschätzung der Stationarität der Rechnungen verwendet werden. Ein quasi-stationärer Zustand ist dann erreicht, wenn die Salzmasse im Modell mit zunehmender Modellzeit nicht mehr zu- oder abnimmt.

Wie die Grafik des Salzinhaltes in Abhängigkeit der Modellzeit (Abbildung 15) zeigt, nimmt in **R5-02** der Salzinhalt von anfänglich 11'400 t rasch ab und erreicht bei einer Modellzeit von etwa 400'000 Jahren ein Minimum (10'350 t). Zu diesem Zeitpunkt hat sich der Salzgehalt in der Lappwaldscholle und im Allertal weitgehend stabilisiert. Anschließend nimmt der Salzinhalt wieder langsam bis auf 10'965 t bei einer Modellzeit von 3 Mio. Jahren zu (Beendigung der Rechnung vor dem Erreichen einer vollständigen Stabilisierung). Anschließend wurde die Rechnung **R5-02** mit 130 Zeitschritten mit erhöhter Genauigkeit (10^{-16}) abgeschlossen (Phase C).

Der Salzinhalt bei der SoTraCoF Rechnung **R5-02** (10'965 t) nähert sich bis zum Ende der Rechnung an jene der stationären NAMMU-Rechnung **R5-05** (12'030 t, Tabelle 8) an, ohne sie jedoch zu erreichen. Dieser Unterschied begründet sich einerseits durch das Nicht-Erreichen des stationären Zustandes, andererseits jedoch auch durch die etwas unterschiedliche Berechnungsweise in den beiden Programmen (vgl. Kap. 4.1.3.5).

4.1.2.2 Konzentrationsverteilung

Die in Abbildung 14 (unten) für den gesamten Schnitt gezeigte Konzentrationsverteilung ist in Abbildung 16 und Abbildung 17 für die drei strukturellen Bereiche Lappwald, Allertal und Triasplatte detaillierter dargestellt.

In der Lappwaldscholle bewirken die Salzgesteine mit $C=1$ (Flanke der Salzstruktur, Salzlager im Mittleren Muschelkalk (Modellbasis), Salzlager im Unteren und Oberen Gipskeuper) im tieferen Teil eine Salzkonzentration um $C=1$.

Dieser Zustand wird gegen das Allertal hin lokal durch eine Zone unterbrochen, in der die Konzentrationsgrenze mit $C=1$ etwas tiefer liegt und in der die Konzentra-

tionsverteilung gegen oben ausgeweitet ist. Ursache dafür ist der advective Abfluss von Wasser aus der Lappwaldscholle zum Allertal. Dieser Wasserfluss kann in der Verbreitungslücke im Salzlager des Oberen Gipskeuper im Übergangsbereich zum Allertal etwas tiefer greifen. Es ist anzunehmen, dass diese Verbreitungslücke und die tiefergreifende Wasserzirkulation einen Zusammenhang aufweisen: Durch den Wasserabfluss aus dem Lappwald wird das Salzlager des Oberen Gipskeuper vom Allertal her sukzessive weggelöst. Auf die Geschwindigkeit dieses Prozesses soll in Kap. 4.4 eingegangen werden.

Oberhalb des Salzlagers des Oberen Gipskeuper ist durch die Wasserzirkulation, die das aufsteigende Salz wegträgt, eine nur wenig mächtige Zone mit Salzwasser ausgebildet.

Im Allertal bildet die Zone mit erhöhtem Salzgehalt eine an die geringer durchlässigen Einheiten des Hutgesteins und des Keuper der östlichen Talseite gebundene Aufwölbung. Das Vorkommen von etwas besser durchlässigem Schilfsandstein (A11/kmS des Allertals) bewirkt eine Aufweitung der Salzfront in der östlichen Talhälfte. Am Übergang zwischen den Geringleitern und den Aquiferen der Oberkreide und des Quartär kommen insbesondere im Hutgestein sehr große Konzentrationsgradienten vor. Der Einfluss der Schichtenfolge DGL auf die Salzverteilung im Hutgestein ist gering, die geringen Anomalien in den Konzentrationsisolinien deuten auf einen Abwärtsfluss hin.

Auf Grund der Neigung der Konzentrationsisolinien im Hutgestein kann im westlichen Teil auf einen Wasserfluss von West nach Ost gegen die Oberkreidetrog geschlossen werden, während im Hauptteil des Allertals der Wasserfluss im Hutgestein von Ost nach West ebenfalls zum Oberkreidetrog hin erfolgen dürfte.

In der Triasplatte ist die Zone mit erhöhter Salzkonzentration stark aufgeweitet. Die aus dem Ostabfall der Salzstruktur (Abbildung 7, 0,9 km) genährte Salzwasserzone weitet sich nur wenig über die Salzverbreitungsgrenze in die Triasplatte hinein aus (Isolinien C=0,1: 1,6 km, C=0,02: 1,9 km, C=0,002: 2,1 km). Ihre Ausdehnung wird behindert durch den gegen das Allertal gerichteten Süßwasserabfluss. **Druckverteilung**

Während die Potentialwerte in den Süßwasserrechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 einen maximalen Wert von 159 mNN aufweisen, ist der als Süßwasserdruckspiegelhöhe ausgedrückte Wasserdruck in der Salzwasserrechnung **R5-02** um Zehner von Metern höher und erreicht in der Lappwaldscholle Werte bis 220 mNN und in der Triasplatte bis 163 mNN. Im Allertal beträgt die Süßwasserdruckspiegelhöhe am Salzspiegel (Modellbasis) an der SW-Verbreitungsgrenze des Hutgesteins 115 mNN, unterhalb der Kreidesenke 124 mNN und am nordöstlichen Ende des horizontal verlaufenden Salzspiegels 130 mNN.

Der horizontale Verlauf der Isolinien im tieferen Teil des Lappwaldes deutet auf stagnierendes Wasser hin.

4.1.2.4 Darcyflüsse

Die Darcyflüsse in den drei Strukturelementen Lappwald, Allertal und Triasplatte werden in Kap. 4.1.3.4 (Rechenfall R5-05) dargestellt.

4.1.3 Stationäre Salzwasserrechnung R5-05 mit NAMMU

In Kap. 4.1.2 wurden die Ergebnisse der instationären Modellrechnung R5-02 mit SoTraCoF dargestellt. Bei dieser Modellrechnung wurde die Verteilung der Salzkonzentration im Grundwasser, ausgehend von einer möglichst gut geschätzten Anfangsbedingung, in Abhängigkeit der Modellzeit berechnet und das Erreichen eines quasi-stationären Zustandes gesucht. Die zeitliche Entwicklung der Salzmasse im Modell für den Rechenfall R5-02 (Abbildung 15) zeigt, dass sich die Entwicklung nach einer Modellzeit von 3 Mio. Jahren zwar verlangsamt hat, jedoch noch keine Stabilisierung erreicht wurde. Die Analyse der Modellresultate ergab, dass die mangelnde Stabilisierung praktisch nur den zentralen und östlichen Teil der Triasplatte betrifft.

Zur Überprüfung, wie weit der mit SoTraCoF berechnete Zustand noch vom stationären Zustand abweicht, wurde der Rechenfall **R5-02** zusätzlich mit NAMMU und stationär als Rechenfall **R5-05** gerechnet. Diese Rechnung dient überdies zur Kontrolle, ob die mit den beiden Programmen berechneten Resultate übereinstimmen. Die Konzentrationsverteilung der stationären NAMMU-Rechnung **R5-05** dient überdies als Ausgangspunkt für die Einpressrechnungen **R5-06** bis **R5-10** sowie **R5mod-03**.

4.1.3.1 Durchführung der Rechnung

Die Durchführung von stationären Modellrechnungen mit dem Programm NAMMU mit den 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 6 scheiterte zunächst. Dabei wurde das so genannte „parameter stepping“-Verfahren angewendet, bei dem der Parameter D_m ausgehend von einem großen Wert stufenweise dem realistischen Endwert angenähert wird.

Die Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 starteten mit $D_m = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ und mussten lange vor dem Erreichen des angestrebten Endwertes ($5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) bei $D_m = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ abgebrochen werden.

Der Rechenfall R5-05 wurde schließlich stationär mit einer maximalen Wasserdichte ($C=1$) von $1050 \text{ kg}/\text{m}^3$ gerechnet. Die resultierende Konzentrationsverteilung diente als Ausgangspunkt für instationäre Rechnungen bis zu einer Modellzeit von 1 Mio. Jahre. Mit der resultierenden Salzverteilung konvergierte die Rechnung in dem anschließend durchgeführten direkten stationären Lösungsschritt.

Rechenfall	R5-05
Anfangsbedingung der Salzverteilung	Süßwasser
Salzmasse zu Beginn der Rechnung	0 t
Rechenprogramm	NAMMU Version 6.3
Rechenmodus	Instationär und stationär
Berechnung des Salztransportes	Vollständige Formulierung des Salztransportes
Genauigkeit	Direkter Löser 10^{-20} Genauigkeit relativer Änderungen: 10^{-8}
Arbeitsschritte	Phase A: stationär mit einer maximalen Wasserdichte 1050 kg/m^3 ($C=1$) Phase B: Instationär bis Modellzeit 1 Mio. Jahre, maximale Wasserdichte 1200 kg/m^3 ($C=1$) Phase C: stationär
Salzmasse	A, stationär ($C = 1$ mit Dichte $1,050 \text{ t/m}^3$): $10'815 \text{ t}$ B, instationär, 100'000 Jahre: $10'980 \text{ t}$ B, instationär, 1'000'000 Jahre: $11'430 \text{ t}$ C, stationär: $12'010 \text{ t}$

4.1.3.2 Druckverteilung, In- und Exfiltration

Die an der Basis der Schichtenfolge DGL in **R5-05** berechnete äquivalente Süßwasserdruckspiegelhöhe beträgt 125,9 mNN (Abbildung 21, Tabelle 9) und nimmt gegenüber der Süßwasserrechnung R5-01 um rund 10 m zu. Diese Erhöhung ist auf den Salzgehalt im Grundwasser zurückzuführen. Der Salzinhalt im Modell Schnitt 5 beträgt in diesem Rechenfall 12'010 t (Tabelle 8).

Der als Süßwasserdruckspiegelhöhe ausgedrückte Wasserdruck der stationären Salzwasserrechnung **R5-05** erreicht in der Lappwaldscholle Werte bis 224 mNN, im Allertal bis etwa 130 mNN und in der Triasplatte bis etwa 167 mNN (Abbildung 21). In der Rechnung **R5-02** resultieren mit SoTraCoF im Lappwald und im Allertal dieselben Werte. Auch in der Triasplatte ist die Süßwasserdruckspiegelhöhe, in die die Salzverteilung maßgebend eingeht, in R5-05 infolge des in der stationären Rechnung weiteren Vorrückens des Salzwassers in die Triasplatte nur wenige Meter höher als in der Rechnung **R5-02** bei einer Modellzeit von 3 Mio. Jahren.

Exfiltrationen erfolgen in der ungefähr im Zentrum des Allertals liegenden Potentialsenke der Aller und erfahren - wie auch in den übrigen Salzwasserrechenfällen - gegenüber **R5-01** nur geringe Änderungen.

4.1.3.3 Konzentrationsverteilung

Die mit NAMMU 6.3 für den stationären Zustand berechnete Konzentrationsverteilung (Rechenfall R5-05) ist in Abbildung 18 und Abbildung 19 abgebildet. Der Vergleich mit den Ergebnissen der instationären Modellrechnung für die Modellzeit von 3 Mio. Jahren mit SoTraCoF 3.01 (Rechenfall R5-02) in Abbildung 16 und Abbildung 17 erlaubt einen Quervergleich der beiden Programme und zudem eine Aussage, inwieweit im Rechenfall R5-02 ein quasi-stationärer Zustand erreicht wurde.

Im Lappwald ist die Salzverteilung in den beiden Modellrechnungen weitgehend identisch. Geringe Unterschiede bestehen unterhalb des Salzlagers *kmGu*, wo die Isolinie $C=0,98$ auf der Allertalseite in der NAMMU-Rechnung etwas tiefer reicht als in **R5-02**, sowie im Steinmergelkeuper *kmSM*, in dem in der NAMMU-Rechnung die Isolinie 0,02 am Modellrand etwas höher liegt als in **R5-02**. In der detaillierteren

Darstellung der Salzverteilung für niedrige Konzentrationen (Abbildung 19, Abbildung 17) ist die Konzentrationsverteilung in der SoTraCoF-Rechnung etwas unruhiger (vgl. auch Kap. 3.2). Im östlichen Teil der Lappwaldscholle – im Übergang zum Allertal (*kmSM*, *kmGo*, Jura) – ist sie in beiden Rechnungen sehr ähnlich.

Im Allertal ist die Salzverteilung in den beiden Rechnungen praktisch gleich.

Deutliche Unterschiede bestehen hingegen in der Triasplatte. Hier fällt auf, dass in der als annähernd stationär betrachteten Rechnung **R5-02** der Verlauf der Isolinien viel steiler ist und deutlich weniger weit in die Triasplatte hineinreicht als in **R5-05**. Die Unterschiede gehen aus nachstehender Aufstellung der Distanz zwischen dem östlichen Ende des Hutgesteins und der Position der Isolinien $C=0,02$ und $0,002$ an der Modellbasis hervor:

	R5-02	R5-05
Salzrandbedingung $C=1$	bis 0,93 km	
Isolinie $C=0,02$	1,45 km	2,38 km
Isolinie $C=0,002$	1,64 km	2,94 km

4.1.3.4 Darcyflüsse

Die Darcyflüsse für den Rechenfall **R5-05** sind in Abbildung 22 bis Abbildung 25 dargestellt.

Fließgeschwindigkeiten

Die im Rechenfall **R5-05** in den drei Strukturelementen Lappwald, Allertal und Triasplatte berechneten Darcyflüsse sind in ihrer Richtung und ihrem Betrag (Logarithmus des Darcyflusses) in Abbildung 22 dargestellt. Typische Darcygeschwindigkeiten in den drei Strukturelementen sind in nachstehender Aufstellung zusammengefasst.

	Darcygeschwindigkeit, m/s
Lappwald	
Grundwasserleiter L3/142/ko2b, L5-K2/144/ko1	10^{-10} bis 10^{-6}
Grundwasserhemmer L2/132/juhe,ko3c, L4/143/koM, L6/146/kmSM	10^{-11} bis $<10^{-8}$
Grundwasserhemmer L7-K1/147/kmGo, L8-K3/152/kmS, L9/kmGu gegen das Allertal hin	10^{-13} bis 10^{-11}
Schilfsandstein mit erhöhter Durchlässigkeit L8-K2/150/kmS	10^{-12} bis 10^{-10}
Gipskeuper L7/kmGo oberhalb Salzlager L7/kmGo	10^{-12} bis 10^{-10}
Modellraum zwischen den Salzlagern L7/kmGo und L9/kmGu	10^{-15} bis 10^{-12}
Modellraum zwischen dem Salzlager L9/kmGu der Modellbasis (Salzlager mm)	10^{-17} bis 10^{-14}
Salzlager L7/kmGo, L9/kmGu	kmGo 10^{-15} bis 10^{-13} , kmGu 10^{-16} bis 10^{-15}
Allertal	
Quartär A1-A4/210/q	10^{-9} bis $<10^{-7}$
Oberkreidetrog A6/222/kroALo	10^{-9} bis $<10^{-7}$
Jurascholle A8-K1/233/j	10^{-11} bis 10^{-9}
Steinmergelkeuper und Unterrhät A9-K2/246/kmSM+ko1	10^{-10} bis $<10^{-8}$
Keuper ohne A9/kmSM	10^{-13} bis 10^{-11}
Hutgestein A13-K1/271,272/intaktes Hutgestein	10^{-14} bis $<10^{-11}$
Triasplatte	
Solling-Folge und höher (T3/363/smS, T2-K1/361/so, T1-K1/310/q+t	10^{-10} bis ca. 10^{-5}
Volpriehausen-Folge T4/364/smV, T5/365/smVS	10^{-13} bis 10^{-8}
Unterer Buntsandstein T6/su)	10^{-14} bis 10^{-11}
T7/381/NE-Randstörung	10^{-12} bis $<10^{-9}$

Sehr geringe Darcygeschwindigkeiten sind im Lappwald zwischen den Salzlagern L7/kmGo und L9/kmGu (10^{-15} bis 10^{-12} m/s), unterhalb des Salzlagers kmGu bis Modellbasis (10^{-17} bis 10^{-14} m/s) sowie in der Übergangszone zum Allertal (10^{-12} bis 10^{-10} m/s) zu verzeichnen.

Im Hutgestein werden Darcygeschwindigkeiten zwischen 10^{-14} und $<10^{-11}$ m/s berechnet; in der Triasplatte kommen im Unteren Buntsandstein Geschwindigkeiten von 10^{-14} bis 10^{-11} m/s vor.

Fließrichtungen

Unter Süßwasserbedingungen sind die Fließvektoren der Darcyflüsse horizontal vom Lappwald bzw. der Triasplatte zur Eintiefung der Oberkreide (A6/222/kroALo) gerichtet. Im Oberkreidetrog wird das aus dem Hutgestein aufsteigende Süßwasser von dem zur Aller (Exfiltrationszone) hin verlaufenden Abstrom aus dem Lappwald erfasst (vgl. Kap. 4.1.1).

Unter Salzwasserverhältnissen ergeben sich markante Veränderungen in den Fließrichtungen.

Im Lappwald (Abbildung 22 oben) erfolgt der Zufluss in den zwischen dem Salzlager kmGo und der Modellbasis gelegenen Modellraum durch Flüsse, die zunächst entlang der Obergrenze des Salzlagers kmGu gegen SW gerichtet sind.

Das aufgesalzene Wasser sinkt am westlichen Ende des Salzlagers *kmGu* in das aus geringdurchlässigen Sedimenten des Keuper (*L9/kmGu*) und des Muschelkalk (*L10/mm-km*) aufgebaute untere Kompartiment ab und teilt sich dort auf: Ein Teil des Wassers fließt nach Osten und steigt durch die östliche Verbreitungslücke des Salzlagers *L9/kmGu* zum Allertal auf; ein anderer Teil bildet eine Konvektionszelle und steigt anschließend entlang des westlichen Modellrandes in das obere Kompartiment auf und bewegt sich im Gipskeuper und Schilfsandstein gegen das Allertal. Die innerhalb des 2D Modells liegenden Salzlager des Oberen und Unteren Gipskeuper haben eine sehr geringe Durchlässigkeit. Die berechneten Flüsse durch die Salzlager sind sehr gering.

Entlang den Modellgrenzen (Lappwald, Allertalzone, vgl. Abbildung 22) zeigen Vektoren über den Modellrand hinaus. Es handelt sich dabei um einen Interpolationseffekt: In die Berechnung des Darcyflusses (Betrag, Fließrichtung) der Randknoten gehen ebenfalls die Resultate benachbarter, bereits innerhalb des Modellraums liegender Knoten ein.

Wie bereits erwähnt ist der beschriebene Modellraum unterhalb des Salzlagers *L7/kmGo* von Wasser mit einer Konzentration um $C=1$ erfüllt. Die beschriebenen Wasserflüsse in diesem Raum sind außerordentlich klein (10^{-17} bis 10^{-12} m/s).

Das aus dem tieferen Modellraum aufsteigende sowie das oberhalb des Salzlagers *L7/kmGo* nach Westen fließende Salzwasser wird vom Süßwasserfluss im Deckgebirge des Lappwaldes erfasst und durch die Grundwasserhemmer Steinmergelkeuper, Oberer Gipskeuper und Schilfsandstein zum Allertal getragen, wo es durch die Jurascholle und das Hutgestein in den Oberkreidetrog exfiltriert.

In der Weferlinger Triasplatte (Abbildung 22 unten) erfolgen die Infiltrationen im östlichen Teil des Schnittes. Das infiltrierende Wasser gelangt in die Solling-Folge und fließt zum größten Teil in dieser Einheit gegen das Allertal hin. Ein Teil des Wassers dringt aus der Solling-Folge in die tieferliegenden Horizonte (Volpriehausen-Folge und –Sandstein und Unterer Buntsandstein) ein und fließt in diesen Einheiten in Richtung Allertal.

Angetrieben von der durch die Aufsatzung entlang der östlichen Salzstrukturflanke verursachten Dichteströmung fließt Wasser aus der NE-Randstörung in der Einheit *T6/su* Unterer Buntsandstein gegen Osten, wird dort vom Süßwasserabfluss der Triasplatte erfasst und exfiltriert durch die Volpriehausen-Serie und die Solling-Folge in die NE-Randstörung und das Allertal.

Der Wasserfluss in den tieferen Bereich des Allertals wird aus den beiden Talflanken gespeist (Abbildung 22 Mitte). Wasser aus dem Lappwald fließt durch die SW-Randstörung in das Allertal und exfiltriert in den Oberkreidetrog (*A6/222/kroALo*) oder gelangt in das Hutgestein und steigt dann durch den Jura in den Oberkreidetrog auf.

Im Osten erhält das Allertal Zuflüsse aus der Weferlinger Triasplatte. Das aus der NE-Randstörung in die Keupergesteine des Allertals abfließende Wasser steigt auf und exfiltriert an der Geländeoberfläche oder infiltriert in das Hutgestein an dessen Ostflanke. Das durch das Hutgestein nach Westen fließende Wasser exfiltriert auf der Westflanke der Hutgesteinsaufwölbung in den Oberkreidetrog (*A6/222/kroALo*).

Im Hutgestein des Allertals herrschen damit größtenteils horizontale Flüsse vom Lappwald gegen Osten und von der Weferlinger Triasplatte gegen Westen zum

Oberkreidetrog. Weder die DGL noch die Position der Aller ist im Schnitt 5 (Rechenfall **R5-05**) von nennenswertem Einfluss auf den Wasserfluss im Hutgestein.

4.1.3.5 Salzmasse

In der Triasplatte hat die SoTraCoF-Rechnung **R5-02** den stationären Zustand – trotz einer Modellzeit von 3 Mio. Jahren - offensichtlich noch nicht erreicht. Dies geht auch aus der zeitlichen Entwicklung der Salzmasse in den beiden Rechenfällen **R5-02** und **R5-05** hervor:

	R5-02 SoTraCoF	R5-05 NAMMU
Anfangsbedingung	ca. 11'400 t	10'815 t (1)
Modellzeit 10'000 Jahre	11'260 t	
Modellzeit 100'000 Jahre	10'600 t	10'980 t
Modellzeit 200'000 Jahre	10'470 t	
Modellzeit 400'000 Jahre	10'350 t	
Modellzeit 500'000 Jahre	10'375 t	
Modellzeit 1'000'000 Jahre	10'575 t	11'430 t
Modellzeit 3'000'000 Jahre	10'965 t	
Stationärer Zustand		12'010 t

(1) Stationäre Rechnung mit Wasserdichte 1050 kg/m³ für C=1

Die Unterschiede in der Salzmasse zwischen den beiden Rechenfällen (vgl. auch Tabelle 8) gehen auf unterschiedliche Salzinhalte in der Triasplatte zurück. Nach einer Modellzeit von 100'000 Jahren sind die Salzmassen in den beiden Rechenfällen sehr ähnlich. Anschließend steigt die Salzmasse in der NAMMU-Rechnung R5-05 etwas rascher an als in der SoTraCoF-Rechnung R5-02. Dies dürfte mit geringfügigen numerischen Unterschieden bei der Simulation von entgegen gerichteten Transportprozessen durch Advektion einerseits und Dispersion/Diffusion andererseits in den beiden Programmen zusammenhängen. Daraus resultieren unterschiedliche Erstreckungen des salzhaltigen Grundwassers von der Flanke der Salzstruktur in die Triasplatte (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 20).

4.1.3.6 Exfiltrationszonen von Salz

In beiden Rechnungen **R5-02** und **R5-05** erfolgt der Abfluss von Salzwasser aus Volpriehausen-Folge und –Sandstein und untergeordnet aus der Solling-Folge durch die NE-Randstörung in das Allertal (Abbildung 17 und Abbildung 19). Die Exfiltration erfolgt in der Umgebung der Aller.

4.1.3.7 Trajektorienrechnungen

Auf die Veränderung des Darcyfließfeldes gegenüber dem Süßwasserrechenfall ist bereits in Kap. 4.1.3.4 eingegangen worden. Im Hutgestein verstärkt sich im Wesentlichen die horizontale Orientierung des Grundwasserflusses. Der Aufstieg von Wasser aus dem Hutgestein verlagert sich etwas nach Westen direkt unter den Oberkreidetrog (Abbildung 24, zu vergleichen mit Abbildung 12).

Die Trajektorienrechnungen ergeben folgende Resultate:

- Alle 15 in **R5-05** bis an die Modellobergrenze gelangenden Trajektorien sind wie im Rechenfall **R5-01** vom Typ *i*. Die Trajektorien verlaufen entlang der Basis des Hutgesteins nach Westen und steigen in den Oberkreidetrog auf, folgen anschließend dessen Basis nach Osten und exfiltrieren in der Umgebung der Aller (Abbildung 24,

Abbildung 25). Der Verlauf der Fließpfade wird durch die Schichtenfolge DGL nur geringfügig beeinflusst.

- Die Pfadlängen (Tabelle 11) weisen wie in **R5-01** nur eine geringe Variationsbreite von 880 bis 1'060 m auf (Mittelwert 990 m). Gegenüber der Süßwasserrechnung **R5-01** nehmen die Pfadlängen um 200 bis 300 m zu.
- Als Fließzeiten (Tabelle 11) werden Werte zwischen 80'000 und 470'000 Jahren (Mittelwert 207'000 Jahre) berechnet.

4.1.4 Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 zur Salzverteilung in der Triasplatte

Die oben dargestellte, mit dem 2D Modell Schnitt 5 ausgeführten Rechnung **R5-02** und ebenfalls die Rechnung mit Schnitt 6 (**R6-02**, Kap. 4.2.2) zeigen, dass die Salzwasserfront nur sehr langsam in die Weferlinger Triasplatte vorrückt.

Die mit NAMMU direkt ermittelten stationären Verhältnisse (Rechenfall **R5-05**, Kap. 4.1.3) zeigen eine gegenüber **R5-02** nur wenig weiter in die Weferlinger Triasplatte vorrückende Salzwasserfront.

Die instationäre Rechnung **R5-02** und die stationäre Rechnung **R5-05** zeigen eine Salzverteilung, die auf eine 3 km breite Zone (bis Konzentrationsisolinie $C=0,002$ in **R5-05**) entlang des Allertals beschränkt ist. Das Salzwasser kann so weit in die Triasplatte vorrücken, bis der Austrag durch die gegen das Allertal gerichtete Süßwasserströmung dieselbe Größe erreicht. Der gesamte östliche Teil der Triasplatte führt nach den Modellrechnungen Süßwasser. Alle erwähnten Rechenresultate sind weit von der aus wenigen Felddaten (2 Bohrungen) abgeleiteten schematischen Salzverteilung (Abbildung 26) in der Weferlinger Triasplatte entfernt. Dies wird nachfolgend vertieft diskutiert.

4.1.4.1 Hypothesen

Im 2D Modell Schnitt 5 wird in der Triasplatte als einzige Salzquelle ein Kontakt zur Salzstruktur mit einer Ausdehnung quer zum Allertal von 0,93 km angenommen.

Diese Salzquelle genügt nach den Modellrechnungen nicht, um in der Weferlinger Triasplatte eine Salzverteilung aufzubauen, die den Beobachtungen entspricht. Es muss noch eine weitere Salzquelle existieren (oder existiert haben).

Folgende Möglichkeiten kommen in Betracht:

- Eine höhere Durchlässigkeit der Einheit T6/su Unterer Buntsandstein (10^{-10} m/s an Stelle von 10^{-11} m/s) dürfte ein leichteres Vordringen der Salzfront gegen Osten ermöglichen.

Diese Hypothese ist unter Erhöhung des k_f -Wertes der Einheit T6 von 10^{-11} m/s auf 10^{-10} m/s mit dem Rechenfall **R5-03** untersucht worden. Als Anfangsbedingung wurde die Salzverteilung aus dem Rechenfall **R5-02** (Modellzeit 190'000 Jahre) vorgegeben.

Rechenfall	R5-03
Anfangsbedingung der Salzverteilung	Rechenfall R5-02 (Modellzeit 190'000 Jahre)
Salzmasse zu Beginn der Rechnung	10'500 t
Rechenprogramm	SoTraCoF Version 3.01
Rechenmodus	Instationär
Berechnung des Salztransportes und Genauigkeit	Boussinesq extended, Genauigkeit 10^{-6}
Anzahl Zeitschritte	5500
Modellzeit	300'000 Jahre
Mittlere Zeitschrittlänge	20 Jahre
Rechenzeit CPU	5,7 Tage CPU
Modellzeit pro Tag CPU	19'500 Jahre/Tag CPU
Salzmasse zur Modellzeit 300'000 Jahre	10'580 t

Die Erhöhung der Durchlässigkeit der Einheit T6/su der Triasplatte in der Rechnung **R5-03** von 10^{-11} auf 10^{-10} m/s bewirkt zwar eine raschere Angleichung der Salzverteilung in der Nähe des Allertals (d.h. oberhalb des Abschnittes mit Konzentrationsrandbedingung $C=1$), jedoch nur ein geringes weiteres Vordringen der Salzwasserfront in die Triasplatte. Dies kommt auch im Gesamtsalzinhalt zum Ausdruck.

- Vorkommen von „Salzrelikten“ entlang des Kontaktes zwischen der Einheit T6/su mit dem Zechstein östlich der im 2D Modell angenommenen Verbreitungsgrenze der Salzstruktur (Abbildung 7).

Entlang der Oberfläche des Zechstein bestehen heute nur noch hypothetische Salzrelikte, die nicht in die Randbedingungen eingegangen sind. Diese Salzrelikte dürften zu früheren Zeiten eine größere Verbreitung aufgewiesen haben.

- Präsenz eines transienten Zustandes einer früheren Situation der Verbreitung der Salzlager, als z.B. die „Relikte“ an der Basis der Einheit T6 (= Top Zechstein) noch eine größere Ausdehnung aufwiesen und/oder das Rötssalz noch nicht durch Subrosion weggelöst war.

Die Existenz zusätzlicher Salzlager in früheren Zeiten des Quartär (oder des Tertiär) ist gegeben (vgl. [14]).

- Das Rötssalz ist heute auf kleine Vorkommen entlang der NE-Randstörung beschränkt; aus diesem Grund ist dieses Salzlager in den 2D Modellen nicht berücksichtigt worden.

Die Frage, ob es sich bei der im Grundwasser der Weferlinger Triasplatte vorliegenden Salzverteilung um ein (instationäres) Relikt eines früheren Zustandes handeln könnte, wird mit der Rechnung **R5-04** untersucht.

Die Rechnung geht von der Annahme aus, dass das Rötssalz früher über die gesamte Triasplatte verbreitet war und dass daher im tieferen Teil der Triasplatte, zumindest unterhalb der Solling-Folge, hochsalinare Wässer vorlagen. Der Rechenfall **R5-04** unterscheidet sich damit vom Rechenfall **R5-02**_[KLM164] einzig durch eine andere Anfangsbedingung für die Salzverteilung.

Bei dieser Anfangsbedingung, aber einer identischen Verteilung der Salzlager wird ein ähnlicher Endzustand wie in Rechnung **R5-02** bzw. **R5-05** resultieren. Die heutige Salzverteilung entspricht – sofern der Rechenfall R5-04 näherungsweise die

Wirklichkeit beschreibt – einem transienten Zustand aus einer früheren Verteilung von Salinargesteinen. Die instationäre Rechnung **R5-04** sollte daher einen Zustand durchlaufen, der der heutigen Salzverteilung in der Triasplatte ungefähr entspricht.

4.1.4.2 Rechenfall R5-04 mit anfänglicher Salzverteilung von C=1 in den Einheiten unterhalb der Solling-Folge der Triasplatte

Mit dem Rechenfall **R5-04** wurde untersucht, ob die heutige Salzverteilung in der Weferlinger Triasplatte einen transienten Zustand einer früheren Situation der Verbreitung der Salzlager darstellen kann.

Durchführung der Rechnung

Angaben zu den Randbedingungen und Parameter des Rechenfalls R5-04 sind in Tabelle 4 enthalten. Die wesentlichen Elemente zur Durchführung der bis zu einer Modellzeit von 2,5 Mio. Jahren ausgeführten Rechnung **R5-04** sind in nachfolgender Aufstellung enthalten.

Rechenfall	R5-04
Anfangsbedingung der Salzverteilung	vgl. Abbildung 28 oben
Salzmasse zu Beginn der Rechnung	38'400 t
Rechenprogramm	SoTraCoF Version 3.01
Rechenmodus	Instationäre Rechnung
Berechnung des Salztransportes und Genauigkeit	Boussinesq, Genauigkeit 10^{-6}
Modellzeit	2'500'000 Jahre
Mittlere Zeitschrittlänge	20 Jahre
Rechenzeit CPU	127 Tage
Modellzeit pro Tag CPU	20'000 Jahre
Salzinhalt	Modellzeit 100'000 Jahre = 33'600 t Modellzeit 500'000 Jahre = 28'500 t Modellzeit 700'000 Jahre = 27'000 t Modellzeit 1'000'000 Jahre = 24'900 t Modellzeit 2'000'000 Jahre = 20'400 t Modellzeit 2'500'000 Jahre = 18'900 t

Als Anfangsbedingung der Salzverteilung für den Rechenfall **R5-04**_[KLM180] wird für den Lappwald und das Allertal die Salzverteilung übernommen, wie sie sich im Rechenfall **R5-02**_[KLM181] bei einer Modellzeit 190'000 Jahre_[KLM182] präsentiert. Zu diesem Zeitpunkt wies der gesamte Schnitt eine Salzmasse von 10'470 t_[KLM183] auf (vgl. Tabelle 8). In der Weferlinger Triasplatte wird der Salzgehalt der unterhalb des Hauptaquifers Solling-Folge liegenden Einheiten auf C=1 erhöht. Aus dieser Erhöhung der Salzkonzentration resultiert für die Anfangsbedingung der Salzverteilung der Rechnung **R5-04**_[KLM184] eine Salzmasse von 38'400 t_[KLM185] (also gut dreimal mehr als in **R5-02**, _[KLM186]Tabelle 8).

Konzentrationsverteilung

Die zeitliche Entwicklung der Salzmasse im 2D Modell geht aus Abbildung 27 hervor. Die Salzmasse nimmt kontinuierlich von 38'400 t_[KLM187] im Anfangszustand auf 33'600 t_[KLM188] zur Modellzeit 100 ka und 24'900 t_[KLM189] zur Modellzeit 1000 ka ab. Auch am Ende der Rechnung bei einer Modellzeit von 2,5 Mio. Jahren ist die Salzmasse mit 18'900 t_[KLM190] noch nicht stabilisiert und ist immer noch um mehr als das 1,5-fache größer als in **R5-02**_[KLM191].

Als sichtbare Veränderung der Salzverteilung steigt zu Beginn der Simulation Salz aus dem Bereich mit $C=1$ in die Solling-Folge auf, unter Bildung eines schmalen Saums von Salzwasser mit einem hohen Konzentrationsgradienten (Abbildung 28, oben).

Bis zur Modellzeit 100'000 Jahre (Abbildung 28, Mitte) sinkt die Konzentrationsisolinie $C=0,02$ aus der Solling-Folge bis in die Mitte der Volpriehausen-Folge ab. Gleichzeitig verschiebt sich die Obergrenze des gesättigten Salzwassers (Isolinie $C=0,98$) in das obere Drittel des Unteren Buntsandstein T6.

Der Abbau des Salzwasserkörpers mit $C=1$ setzt sich bis zur Modellzeit 500'000 weiter fort (Isolinie $C=0,98$ wenig über der Modellbasis); die Obergrenze des Salzwassers (Isolinie $C=0,02$) verbleibt in der Mitte der Volpriehausen-Folge.

Bis zum Ende der Rechnung bei einer Modellzeit von 2,5 Mio. Jahren verbleibt die Obergrenze des Salzwassers (Isolinie $C=0,02$) in der Volpriehausen-Folge T4/364/smV. Der Salzabfluss erfolgt durch die NE-Randstörung gegen das Allertal. Die Salzverteilung im östlichen Teil des Allertals erfährt bis zur Modellzeit 2'500'000 Jahre nur geringe Veränderungen (Abbildung 29, unten).

Mit zunehmender Modellzeit nehmen die Konzentrationsgradienten in der Triasplatte sukzessive ab. Die relative Salzkonzentration an der Modellbasis auf halbem Weg zwischen Allertal und rechtem Modellrand geht von anfänglich $C=1$ auf $C=0,88$ zur Modellzeit 1 Mio. Jahre über $C=0,66$ zur Modellzeit 2 Mio. Jahre auf $C=0,60$ zur Modellzeit 2,5 Mio. Jahre zurück.

Ab einer Modellzeit von 1 Mio. Jahre beginnt sich in den tieferen Abschnitten (Buntsandstein) entlang des Allertals eine Salzverteilung zu entwickeln, die sich jener in **R5-02** (Abbildung 16, Abbildung 17) annähert.

Es kann angenommen, dass der stationäre Endzustand von **R5-04** jenem von **R05-02 / R5-05** entspricht.

Die heutige Salzverteilung in der Weferlinger Triasplatte kann damit als transienter Zustand interpretiert werden: Aus der früheren Verteilung der Salzlager (Verbreitung des Röt-Salzes) resultierte in der Triasplatte ein hoher Salzgehalt. Die Salzlager sind heute vollständig abgebaut (subrodiert), die Salzverteilung im Grundwasser hat aber noch nicht einen stationären Zustand erreicht, der der heutigen Verteilung der Salzlager entspricht.

4.2 Rechnungen mit Schnitt 6

Mit dem 2D Modell Schnitt 6 sind zwei Rechenfälle ausgeführt worden: die Süßwasserrechnung **R6-01** und die Salzwasserrechnung **R6-02**, in der als Anfangsbedingung eine Salzverteilung aus einer vereinfachten Modellrechnung vorgegeben wurde.

Die Druckrandbedingung (Festpotential) an der Modellobergrenze wurde erneut dem 3D Rechenfall R44 ([10], ohne die heutigen Entnahmen durch Förderbrunnen) entnommen.

Die Süßwasserrechnung **R6-01** mit dem 2D Modell Schnitt 6 hat wie bei der Rechnung **R5-01** für das 2D Modell Schnitt 5 die Überprüfung der 2D Näherung zum Ziel. Die Potentialverteilung des Süßwasserrechenfalls **R6-01** wird mit der im 3D Süßwasser-

modell, Rechenfall **R44**, entlang der Schnittlage 6 ermittelten Potentialverteilung verglichen.

Nach der Bestätigung der Dirichlet-Randbedingung am oberen Modellrand und der Anwendbarkeit des 2D Modells Schnitt 6 wird mit dem 2D Modell Schnitt 6 die instationäre Salzwasserrechnung **R6-02** ausgeführt.

Die Parameter und Randbedingungen der mit dem 2D Modell Schnitt 6 durchgeführten Rechnungen sind in Tabelle 7 enthalten.

4.2.1 Süßwasserrechnung R6-01

Die Potentialverteilung im 3D Süßwassermodell (Rechenfall **R44**) entlang Schnitt 6 ist in Abbildung 30 (oben) dargestellt. Die mit CGM berechnete Süßwasser-Potentialverteilung geht aus Abbildung 30 (unten) hervor. Auch bei Schnitt 6 ist zu beachten, dass das 3D Süßwassermodell an der Basis des Schilfsandstein (Lappwald) bzw. des Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte) endet, während im 2D Modell Schnitt 6 die Modellbasis im Lappwald entlang der Oberkante des Salzlagers des Mittleren Muschelkalk, in der Triasplatte entlang jener der Zechsteinsedimente verläuft.

Die für wesentliche Einheiten resultierenden Potentiale in **R44** und in der Süßwasserrechnung mit Schnitt 6 gehen aus nachstehender Aufstellung hervor.

Einheit	Berechnetes Potential, mNN	
	3D Süßwassermodell, R44 [10]	Süßwasserrechnung R6-01
Lappwald		
L3/142/ko2b, Mittelrhät-Sandstein	133	133
L5-K2/144/ko1, Unterrhät-Sandstein	129	130
L6/146/kmSM, Steinmergelkeuper	127 – 120	129 – 120
L8/151,152/kmS, Schilfsandstein	127 – 123	129 – 123
Weferlinger Triasplatte		
T/363/smS, Solling-Folge	130 – 124	130 – 125
T5/365/smVS, Volpriehausen-Sandstein	152 – 124	152 – 125

Wie in der Süßwasserrechnung **R5-01** stimmt auch die im Rechenfall **R6-01** mit dem 2D Modell Schnitt 6 berechnete Potentialverteilung mit der Potentialverteilung in der 3D Süßwasserrechnung **R44** entlang des Verlaufs des Schnittes 6 befriedigend überein. Unterschiede bestehen im Lappwald: In den Einheiten unterhalb der Mergelhorizonte des Unterrhät L4/143/koM werden im 2D Modell größere Gradienten berechnet als in den 3D Rechnungen. Es handelt sich dabei um einen 3D Effekt und ist eine Auswirkung des talparallelen Flusses vor allem im Unterrhät-Sandstein L5-K2/144/ko1.

Die Randbedingung der Rechnung **R6-01** wird als Festpotential-Randbedingung für die Salzwasserrechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 6 verwendet.

4.2.2 Salzwasserrechnung R6-02

Die Anfangsbedingungen für die Salzverteilung im Grundwasser wurden wie bei den Rechnungen für den Schnitt 5 mit vereinfachten Modellrechnungen ermittelt. Sie sind in Abbildung 31 (oben) dargestellt.

Die Salzmasse der Anfangsverteilung beträgt rund 9'600 t_[KLM204] (vgl. Tabelle 8).
[KLM205]

4.2.2.1 Durchführung der Rechnung

Angaben über Parameter und Randbedingungen der Rechnung **R6-02**_[KLM206] sind in Tabelle 7 enthalten. Die nachfolgende Aufstellung enthält Angaben zur Durchführung der Rechnung.

Rechenfall	R6-02 [KLM207]
Anfangsbedingung der Salzverteilung	Abbildung 31 (oben)
Salzmasse zu Beginn der Rechnung	ca. 9600 t [KLM208]
Rechenprogramm	SoTraCoF Version 3.01
Rechenmodus	Instationär bis Erreichen eines quasi-stationären Zustandes, Ausführung in vier Phasen A bis D
Berechnung des Salztransportes	A: Boussinesq extended, Genauigkeit 10^{-6} B, C: Boussinesq, Genauigkeit 10^{-6} D: Boussinesq, Genauigkeit 10^{-16}
Anzahl Zeitschritte	A 10'000 Zeitschritte, B 10'000 Zeitschritte, C 10'000 Zeitschritte, D 135 Zeitschritte
Modellzeit	78'800 Jahre
Mittlere Zeitschrittlänge	A bis C: rund 1,7 Jahre, D rund 1,4 Jahre
Rechenzeit CPU	A bis C: 19 Tage, D: 5 Tage
Modellzeit pro Tag CPU	A bis C: rund 4000 Jahre, D: 40 Jahre
Salzgehalt quasi-stationär (Modellzeit 78'700 Jahre)	10'435 [KLM210]t

Der Rechenfall **R6-02** wurde bis zu einer Modellzeit von 78'700 Jahre gerechnet. Die Rechnung wurde mit 135 Zeitschritten mit einer Genauigkeit von 10^{-16} abgeschlossen (Phase D).

Wie die Entwicklung des Salzinhaltes in Schnitt 6 in Abhängigkeit der Modellzeit zeigt (Abbildung 32), nimmt in der Rechnung **R6-02** die Salzmasse von anfänglich rund 9'600 t_[KLM215] bis zur Modellzeit 78'700 Jahre auf den Wert von etwa 10'435 t zu.

4.2.2.2 Konzentrationsverteilung

Konzentrationsverteilung

Die in Abbildung 31 (oben) gezeigte Anfangsbedingung der Salzverteilung entwickelt sich während einer Modellzeit von rund 79'000 Jahre zumindest im Lappwald und Allertal zu einem quasi-stationären Zustand (Abbildung 31, unten). Die Konzentrationsverteilung C von 0 bis 1 bzw. von 0 bis 0,1 zur Modellzeit 78'700 Jahre ist in Abbildung 33 und Abbildung 34 für die drei strukturellen Bereiche Lappwald, Allertal und Triasplatte dargestellt.

In der Lappwaldscholle bewirken die Salzlager des Gipskeuper mit C=1 in größeren Tiefen wie in Schnitt 5 und aus denselben Gründen eine Salzkonzentration um C=1.

Jedoch zeigt die Salzverteilung in Schnitt 6 gegenüber Schnitt 5 (**R5-02**, Abbildung 16, Abbildung 17) auch Unterschiede: Der Tiefgang der Isolinie C=0,98 ist in den beiden Schnitten unterschiedlich. In Schnitt 5 ist sie auf eine schmale Zone entlang des Allertals beschränkt und reicht bis zum Top des Salzlagers im Unteren Gipskeuper. In Schnitt 6 ist die Verbreitungslücke der Salzlager des Oberen und Unteren Gipskeuper entlang des Allertals doppelt so breit wie in Schnitt 5 und die Isolinie 0,98 liegt nahe der

Basis des Unteren Gipskeuper L9/kmGu. Weiter reicht in Schnitt 6 entlang des westlichen Modellrandes die Isolinie 0,98 in der Verbreitungslücke des Salzlagers im Oberen Gipskeuper bis in die Mitte der Tonsteine des mittleren Muschelkalkes L10/mm-km.

Oberhalb des Salzlagers des Oberen Gipskeuper ist im Steinmergelkeuper L6/146/kmSM entlang des westlichen Modellrandes im „Schatten“ eines Störungsversatzes eine Zone erhöhten Salzgehaltes ausgebildet, die in Schnitt 5 nicht vorkommt. Die Konzentrationsisolinie $C=0,02$ reicht in Schnitt 6 bis in den Mittelrhät-Sandstein L3/142/ko2b und liegt damit deutlich höher als in Schnitt 5.

Die angeführten Unterschiede gehen im Wesentlichen auf die unterschiedliche Geometrie der Salzlager des Gipskeuper zurück. Aus der Grundkonfiguration „Vorkommen von Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper“ und „Existenz oder Fehlen von Verbreitungslücken und/oder Störungsversätzen“ ergibt sich einerseits generell eine Salzkonzentration von $C=1$ in den Modellkompartimenten unterhalb der beiden Salzlager, andererseits erlauben die erwähnten Verbreitungslücken die Ausbildung von Zonen, in denen der Süßwassereinfluss tiefer reicht, oder im Gegenteil erhöhte Salzgehalte in relativ hoher Position möglich sind. Die Unterschiede zwischen den beiden Schnitten zeigen, dass die Salzverteilung durch den komplexen Bau der Lappwaldscholle beeinflusst wird.

Im Allertal (Abbildung 33 Mitte, Abbildung 34 Mitte) bildet die Zone erhöhten Salzgehalts eine Aufwölbung, die wie in Schnitt 5 an die geringer durchlässigen Einheiten des Hutgesteins gebunden ist. Der Keuper der östlichen Talseite des Allertals besteht in Schnitt 6 zu einem großen Teil aus A9-K2/246/kmSM+ko1 Steinmergelkeuper und Unterrhät mit $k_f 4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s, während in Schnitt 5 gering durchlässige Einheiten dominieren (A11/248/kmS/6 $\cdot 10^{-9}$ m/s, A10/247/kmGo/1,3 $\cdot 10^{-11}$ m/s). Die weite Verbreitung von A9-K2/246/kmSM+ko1 in Schnitt 6 hat zur Folge, dass die Isolinie 0,02 auch im östlichen Teil des Allertals größtenteils im Hutgestein verläuft.

Der Salzaustrag aus dem Lappwald führt in der Übergangszone vom Lappwald zum Allertal in den Aquitarden L5-K1/145/ko1, L6/146/kmSM und A8-K1/233/j zu Salzkonzentrationen bis $C=0,03$ (Abbildung 34, Mitte).

In der Triasplatte (Abbildung 33 unten, Abbildung 34 unten) ist die aus dem Ostabfall der Salzstruktur (Randbedingung $C=1$ auf einer Breite von 0,92 km) genährte Salzwasserzone an ihrer östlichen Grenze wie in Schnitt 5 (R5-02) steil; die Isolinie $C=0,02$ befindet sich an der Modellbasis 1,46 km, die Isolinie 0,002 1,92 km von der Ostgrenze des Hutgesteins entfernt. Aufgrund der Ergebnisse der stationären Rechnung **R5-05** (Kap. 4.1.3) und dem noch nicht abgeschlossenen Anstieg der Salzmasse nach der Modellzeit 78'700 Jahre in der instationären Rechnung R6-02 (Abbildung 32) kann davon ausgegangen werden, dass die Salzverteilung der Rechnung **R6-02** in der Triasplatte den stationären Zustand noch nicht ganz erreicht hat. Auf die Gründe dafür ist bereits bei den Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 eingegangen worden (vgl. Kap. 4.1).

4.2.2.3 Druckverteilung

Während die Potentialwerte in den Süßwasserrechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 6 (**R6-01**) einen maximalen Wert von 152 mNN aufweisen, ist der als Süßwasserdruckspiegelhöhe ausgedrückte Wasserdruck in der Salzwasserrechnung **R6-02** um

Zehner von Metern höher und erreicht in der Lappwaldscholle Werte bis 224 mNN, im Allertal bis etwa 135 mNN und in der Triasplatte bis etwa 160 mNN.

4.2.2.4 Darcyfluss

Fließgeschwindigkeiten

Die im Rechenfall **R6-02** in den drei Strukturelementen Lappwald, Allertal und Triasplatte berechneten Darcyflüsse sind in ihrer Richtung und Betrag (Logarithmus des Darcyflusses) in Abbildung 35 dargestellt. Die typischen Darcygeschwindigkeiten in den drei Strukturelementen sind ähnlich wie in Schnitt 5 (vgl. R5-05, Kap. 4.1.3.4) und gehen aus nachstehender Tabelle hervor.

	Darcygeschwindigkeit, m/s
Lappwald	
Grundwasserleiter L3/142/ko2b, L5-K2/144/ko1	10^{-10} bis $<10^{-7}$
Grundwasserhemmer L2/132/juhe,ko3c, L4/143/koM, L6/146/kmSM	10^{-11} bis $<10^{-8}$
Grundwasserhemmer L7-K1/147/kmGo, L8-K3/152/kmS, L9/kmGu gegen das Allertal hin	10^{-13} bis 10^{-11} , L9 10^{-14} bis 10^{-13}
Gipskeuper L7/kmGo oberhalb Salzlager L7/kmGo	10^{-15} bis 10^{-13}
Modellraum zwischen dem Salzlager L7/kmGo und der Modellbasis (Salzlager mm)	10^{-15} bis 10^{-12}
Salzlager L7/kmGo, L9/kmGu	kmGo 10^{-16} bis 10^{-14} , kmGu 10^{-16} bis 10^{-15}
Allertal	
Quartär A1-A4/210/q	10^{-9} bis 10^{-7}
Oberkreidetrog A6/222/kroALo	10^{-10} bis 10^{-8}
Jurascholle A8-K1/233/j	10^{-11} bis 10^{-10} , lokal 10^{-12} bis 10^{-11}
Steinmergelkeuper und Unterrhät A9-K2/246/kmSM+ko1	10^{-10} bis $<10^{-8}$
Keuper ohne A9/kmSM	10^{-13} bis 10^{-12}
Hutgestein A13-K1/271,272/intaktes Hutgestein	10^{-13} bis 10^{-12} lokal 10^{-14} bis 10^{-13} und 10^{-12} bis 10^{-11}
Triasplatte	
Solling-Folge und höher (T3/363/smS, T2-K1/361/so, T1-K1/310/q+t	10^{-10} bis 10^{-7}
Grundwasserhemmer und –geringleiter (Volpriehausen-Folge und tiefer, T4/364/smV, T5/365/smVS, T6/su)	10^{-15} bis 10^{-12} , Volpriehausen-Serie nahe des Modellrandes 10^{-12} bis 10^{-11}
T7/381/NE-Randstörung	10^{-11} bis $<10^{-9}$

Sehr geringe Darcygeschwindigkeiten sind im Lappwald unterhalb des Salzlagers kmGo (10^{-15} bis 10^{-12} m/s) sowie in den Einheiten L7-K1/147/kmGo, L8-K3/152/kmS in der Übergangszone zum Allertal (10^{-14} bis 10^{-11} m/s) zu verzeichnen.

Im Hutgestein resultieren Darcygeschwindigkeiten meist von 10^{-13} bis 10^{-12} m/s (lokal eine Größenordnung höher oder niedriger). In der Triasplatte betragen die Geschwindigkeiten im Modellabschnitt unterhalb der Solling-Folge 10^{-15} bis 10^{-12} m/s (lokal nahe des Modellrandes 10^{-12} bis 10^{-11} m/s).

Fließrichtungen

Das Fließfeld der beiden Schnitte 5 und 6 (Abbildung 22 und Abbildung 35) ist sehr ähnlich, so dass hier nur auf die hauptsächlichen Unterschiede und ihre Ursachen eingegangen werden soll. Die Unterschiede konzentrieren sich auf den tieferen Teil der Lappwaldscholle, die Allertalzone und die Solling-Folge und darüberliegende Einheiten der Triasplatte.

In der Lappwaldscholle führt die Störung, entlang der die beiden Salzlager des Oberen und Unteren Gipskeuper etwas verstellt sind, dazu, dass die Zuflüsse zu den tiefen Kompartimenten durch die dadurch geschaffenen Lücken erfolgen. Die Wasserflüsse entlang des westlichen Modellrandes werden in Schnitt 6 durch die Verbreitungslücke des Salzlagers kmGo erleichtert. Die gegenüber Schnitt 5 unterschiedliche Ausbildung der Zone zwischen den Salzlager des Gipskeuper und dem Allertal führt in diesem Gebiet zu einem leicht anders ausgebildeten Fließfeld.

Im Allertal weist der geologische Aufbau der beiden Schnitte deutliche Unterschiede auf: Die Keuperschichten der östlichen Talhälfte sind in Schnitt 6 stärker durchlässig (Dominanz der Einheit A9-K2/246/kmSM+ko1), das Hutgestein ist mächtiger, der Oberkreidetrog weniger tief und die Schichtenfolge DGL stößt nur wenige Dekameter unter der Geländeoberfläche an Jura/Oberkreide.

Diese Unterschiede haben folgende Auswirkungen auf das berechnete Fließfeld: Die Fließgeschwindigkeit im Keuper der östlichen Talhälfte ist in Schnitt 6 deutlich höher als in Schnitt 5. In der NE-Flanke der Hutgesteinsaufwölbung bewirkt die Überdeckung im östlichen Teil des Allertals durch Steinmergelkeuper einen verstärkten Aufstieg des aus der Triasplatte abfließenden Wassers. In den tieferen Bereichen des intakten Hutgesteins fließt jedoch weiterhin Wasser aus der Triasplatte nach SW zum Oberkreidetrog ab.

In der Weferlinger Triasplatte sind die Fließrichtungen in den beiden Rechnungen praktisch gleich, jedoch sind die Darcyflüsse im Schnitt 6 in der Solling-Folge und den darüberliegenden Einheiten um eine halbe bis eine Größenordnung höher. Dies ist auf die größere Hangneigung entlang des Schnittes 6 zurückzuführen (Schnitt 5 verläuft in der Triasplatte noch teilweise durch das Tal des Hauptgrabens, Anlage 1).

4.3 Vergleich der Resultate der instationären Rechnungen mit Messwerten

Der Salzgehalt des Grundwassers ist mit zwei Arten von Wasserproben bestimmt worden: [KLM223]

- aus Wasserproben, die in den Bohrungen durch Pumpen aus wasserführenden Horizonten entnommen werden konnten (Kluftwasserproben),
- aus immobilem Porenwasser, das durch Mikrofiltration aus Bohrkernen gewonnen wurde.

An insgesamt 149 Wasserproben aus den Bohrungen ist die Grundwasserdichte bzw. die elektrische Leitfähigkeit ermittelt worden ([4], Anlage 7.2.1[KLM224], [5], Tabellen A.11 und A.12)[KLM225]. Anlage 1 zeigt die räumliche Verteilung der 129 Einzelbohrungen oder Bohrungen von Bohrgruppen, aus denen diese Wasserproben stammen. Es liegen vor allem Resultate aus der Allertalzone und dem Lappwald vor, jedoch nur wenige aus der Weferlinger Triasplatte. Die Proben stammen aus Grundwasserleitern und nur gelegentlich aus Grundwasserhemmern, zu einem großen Teil aus der südlichen Hälfte des Modellgebietes. Die Tiefenlage der Proben ist damit an die Verbreitung der Wasserleiter gebunden und entsprechend limitiert (bis -243 mNN).

In [4][KLM226] (Anlage 7.1.1, Blatt 8 bis 10) sind die aus Wasserproben gewonnenen Wasserdichten der wichtigsten Einheiten der Lappwaldscholle, der SW-Randstörung, der Allertalzone, der NE-Randstörung und der Triasplatte graphisch dargestellt. [KLM227]

Andererseits ist die Salinität des immobilen Porenwassers an Bohrkernen aus 24 Bohrungen untersucht worden ([5] Tabellen A.1 bis A.10, [6]).^[KLM228] Die rund 260 Proben decken insbesondere die vertikale Verteilung des Salzgehaltes im immobilen Porenwasser bis in eine Tiefe von 750 m ab. Die Lage der untersuchten Bohrungen geht aus Anlage 1 hervor. Die Verteilung des NaCl-Gehaltes entlang der beprobten Bohrungen ist in [6] dargestellt. ^[KLM229]

Zum Vergleich wurde aus den Modellergebnissen für die relativen Konzentrationen (R5-02 in Abbildung 16 und Abbildung 17; R6-02 in Abbildung 33 und Abbildung 34) für jede hydrogeologische Einheit die Bandbreite der entsprechenden Grundwasserdichte ermittelt. Diese berechneten Bandbreiten sind den Bandbreiten der o.g. Messwerte in der Tabelle 12 und der Abbildung 36 gegenübergestellt.

Beim Vergleich der Modellergebnisse mit den Messwerten ist zu beachten, dass:

- Die Messwerte stammen aus einem geographisch weiter gezogenen Bereich als von den beiden Schnitten abgedeckt wird und erfassen damit auch hydrogeologische Situationen, die in den beiden 2D Modellen nicht gleichwertig abgebildet sind.
- Die Messwerte stammen aus Kluftwasserproben, Proben also, die nicht unbedingt die über das Gestein gemittelten Verhältnisse abbilden müssen.

Der Vergleich zeigt folgendes:

- Im Gebiet des Lappwaldes sind in Schnitt 5 die berechneten Werte leicht geringer als die Messwerte. Die höheren Rechenwerte in Schnitt 6 hängen mit den Störungen zusammen, welche das Salzlager L7/kmGo versetzen.
- Im Gebiet der SW-Randstörung liegen die Rechenwerte innerhalb der Bandbreite der Messwerte, sind jedoch meist etwas kleiner. Im Schilfsandstein dagegen werden höhere Werte als die an Kluftwasserproben ermittelten Dichtewerte berechnet.
- Auch in der Allertalzone sind v.a. in den besser durchlässigen Einheiten des Quartär und der Oberkreide die berechneten Werte etwas kleiner als die Messwerte. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass die hydraulischen Durchlässigkeiten dieser Einheiten in den Modellen mit der Tiefe nicht abnehmen, wodurch der Grundwasserfluss und damit auch der Salzaustrag im Modell – im Gegensatz zu den tatsächlichen Verhältnissen – bis an deren Basis hoch ist.
- Messwerte aus den Einheiten A10/247/kmGo, A11/248/kmS, A12/249/kmGu-mu fehlen in [4], im darüber folgenden Steinmergelkeuper und Unterrhät A9-K1/245/kmSM+ko1 und A9-K2/246/kmSM+ko1 sind die Rechenwerte etwas niedriger als die Messwerte.
- Aus der Triasplatte ist die Salinität und Grundwasserdichte nur aus wenigen, untiefen Kluftwasserproben bekannt. Die Bandbreite der Wasserdichte in den 2D Rechnungen ist deutlich größer, was in erster Linie damit zusammenhängt, dass die Einheiten (z.B. die NE-Randstörung) in den 2D Modellen deutlich tiefer reichen als die Probenahmen.
- Im Lappwald zeigte die 750 m tiefe Bohrung Dp Mors 52A (Lokation siehe Abbildung 37, Anlage 1) das in Abbildung 39 wiedergegebene Tiefenprofil der Salzverteilung der Porenwasserproben. Unterhalb des Steinmergelkeuper mit mäßig mineralisiertem Wasser (10 – 30 g/l) steigt die Mineralisierung im

Oberen Gipskeuper (mit Salzlager) auf eine gesättigte Salzlösung an. In den darunterliegenden Einheiten Schilfsandstein, Unterer Gipskeuper, Unterer Keuper und im gesamten Muschelkalk wurden gesättigte Porenwässer angetroffen. Die Darstellung der Messwerte aus Kluft- und Porenwässern in Abbildung 38 zusammen mit der berechneten Salinitätsverteilung in den Vertikalprofilen **A** und **B** (Lage siehe Abbildung 37) zeigen, dass die Modellrechnungen recht gut mit den Messwerten übereinstimmen: Insbesondere wird die Dichteverteilung in der Tiefe des Lappwaldes – durch die Vorgabe der Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper – gut nachgebildet.

Gesamthaft ist die Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwerten befriedigend, befinden sich doch die meisten Rechenwerte – trotz der angeführten Einschränkungen - innerhalb der Bandbreiten der Messwerte aus Kluftwasserproben.

4.4 Salzaustrag_[KLM230]

4.4.1 Salzaustrag in den Rechenfällen **R5-02**_[KLM231] und **R6-02**_[KLM232]

Für die beiden Rechenfälle **R5-02**_[KLM233] und **R6-02**_[KLM234] wurde der Salzaustrag aus dem 2D Modell berechnet:

- Schnitt 5 59,1 kg/Jahr_[KIm235]
- Schnitt 6 54,8 kg/Jahr

Bei einer Erstreckung des Modellgebietes entlang des Allertals von 8000 m würde der Mittelwert dieser beiden Werte hochgerechnet auf das gesamte Modellgebiet einem Gesamtaustrag von rund 460 t/Jahr entsprechen_[KIm236].

Der berechnete Salzaustrag aus den 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 6 stammt zu einem beträchtlichen Teil aus den je 10-15 m mächtigen Salzlager des Oberen und Unteren Gipskeuper.

Unter der Annahme, dass 50 % des Salzaustrages von 57 kg/Jahr⁴ aus dem Salzlager des Oberen Gipskeuper im Lappwald stammen, ergibt sich eine Ausweitung der Verbreitungslücke gegen das Allertal hin von 1 m bis 2 m in 1000 Jahren.

4.4.2 Vergleich mit der Chloridbilanz der Felduntersuchungen

Für *Abschätzungen von im Untergrund ablaufenden Subrosionsprozessen* wurde für das Einzugsgebiet der *Aller zwischen Alleringersleben und südlich Schwanefeld [..] (Meßstation des StAU) [..], die Chloridfracht der Aller als Gesamtaustrag aus dem Gebiet ermittelt, diese mit den Stoffeinträgen in das Gebiet [..] verglichen und so die gesuchte Größe separiert* [4], Kap. 4.3).

Grundsätzlich läßt sich die geogen-salinare Fracht und damit die rezente Subrosion im Bilanzierungsgebiet nur als Differenzbetrag zu den übrigen Chlorideinträgen gegenüber dem Gesamtaustrag abschätzen. Dieser summarische Betrag setzt sich aus verschiedenen Anteilen unterschiedlicher Herkunftsgebiete zusammen. [..] Wie die

⁴ Für Ausdehnung des Modells senkrecht zur Modellebene = 1 m

Untersuchungsergebnisse [...] zeigen, kann mit einem relativ großen Anteil von Salzaustrag aus der Lappwaldscholle (Keupersalze) und einem relativ kleinen Anteil aus der Triasplatte gerechnet werden. In der Allertalzone sind sowohl primäres Zechsteinsalz, als auch Sekundärsalze aus dem Hutgestein als potentielle Chloridlieferanten verantwortlich.

Die einzelnen Salzfrachtanteile sind aus den hydrogeologischen Erkundungsergebnissen allein nicht quantifizierbar; sie sind weder hydraulisch abzuschätzen noch hydrochemisch differenzierbar.

Es konnte deshalb nur eine grobe Abschätzung eines summarischen Subrosionsbetrages für das Bilanzgebiet vorgenommen werden.

Quelle	Menge [t Cl/a]
Austräge	
<i>berechnet aus der Salzfrachtbilanz der Aller</i>	1365
<i>Grundwasserentnahme</i>	45
Summe Einzelausträge	1410
Einträge	
<i>– Niederschlag</i>	70
<i>– Düngung</i>	55
<i>– Streusalz</i>	5
<i>– industrielle und kommunale Abwässer</i>	8
<i>– oberirdische Ablaugung von Salzhalden</i>	ca. 240
Summe Einzeleinträge	380
Eintrag aus Subrosion (<i>aus der Lappwaldscholle, der Allertalzone und der Triasplatte</i>) (<i>Einträge minus Austräge</i>):	1030
<i>– davon aus Solquelle Ernst Andreas</i>	ca. 250
<i>– aus Grubenwässer</i>	73

(aus [4], Kap. 4.3.10)

Dem jährlichen Salzeintrag in die Aller aus Subrosion von rund 1'000 t Cl entsprechen 1'660 t Steinsalz. Mit den 2D Salzwasserrechnungen mit Schnitt 5 und 6 wird demgegenüber nur ein auf das Modellgebiet hochgerechneter Salzaustrag von etwa 460 t Steinsalz pro Jahr berechnet. Der Unterschied ist mit einem Faktor 4 relativ groß, jedoch ist folgendes zu berücksichtigen:

- Im Lappwald ist ein Abfluss des aufsteigenden Salzes im Rhätsandstein nach Norden möglich (vgl. Isolinien der Basisfläche des Rhät, Abbildung 25 in [10]); der mittlere Salzaustrag im Lappwald dürfte daher größer sein als in den 2D Modellrechnungen senkrecht zum Allertal.
- In der Triasplatte dürfte in ähnlicher Weise aufsteigendes Salz in der Solling-Folge (vgl. Isolinien der Basisfläche der Solling-Folge, Abbildung 26 in [10]) nach Norden abfließen.

Die Größenordnung der Mess- und Rechenwerte steht daher mit den geologischen Gegebenheiten nicht in Widerspruch.

5 Rechnungen mit Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude

5.1 Einleitung

Die Ausbreitung von Lösung im Hutgestein und im Deckgebirge, welche an der Basis der Schichtenfolge DGL aus dem Grubengebäude ausgepresst wird, wurde in [12] unter Vernachlässigung von Dichteeffekten mit einem 3-dimensionalen Modell untersucht. Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus diesen Modellrechnungen sind in der Einleitung zum vorliegenden Bericht, in Kap. 1.1, zusammengefasst. Sie begründen insbesondere die Anwendung von vertikalen 2D Modellen zur Untersuchung von Dichteeinflüssen.

Es wird unterstellt, dass in der Nachbetriebsphase Wasser aus dem Hutgestein in das Grubengebäude zutreten und sich durch Subrosion des Kaliflözausbisses am Salzspiegel eine Subrosionsrinne bildet, die – geologisch bedingt – praktisch längs der Basis der Schichtenfolge DGL verläuft. Sobald im weiteren Verlauf der Nachbetriebsphase Lösung aus der Grube ausgepresst wird, verteilt sich diese in der Subrosionsrinne und wird von dort in die Schichtenfolge DGL und das so genannte intakte Hutgestein eingepresst. Aus der Länge der hochdurchlässigen Subrosionsrinne und der gesamten Auspressrate aus dem Grubengebäude ergibt sich die spezifische Einpressrate in die DGL pro Meter Länge der Subrosionsrinne. Die letztgenannte Größe ist die Randbedingung für vertikale 2D Modellrechnungen, bei denen die Modellebene senkrecht zum Allertal, zur Schichtenfolge DGL und damit auch zur Subrosionsrinne verläuft.

Die nachfolgend beschriebenen Modellrechnungen zur Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung im Hutgestein und Deckgebirge unter Berücksichtigung von Dichteeinwirkungen wurden mit spezifischen Einpressraten von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$, $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ und $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ durchgeführt. Diese Werte decken ein weites Spektrum möglicher künftiger Zustände ab, wie aus Tabelle 2 hervorgeht. Die genannte Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen der gesamten Auspressrate aus dem Grubengebäude, der wirksamen Länge der Subrosionsrinne und der daraus resultierenden spezifischen Einpressrate.

Die Modellrechnungen werden mit den beiden 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 5mod mit dem Programm NAMMU 6.3 durchgeführt.

5.2 2D Modelle

Für die Berechnung der Auswirkungen von Auspressungen aus dem Grubengebäude wird das 2D Modell Schnitt 5 (Abbildung 7) verwendet. Weitere drei Rechnungen werden mit dem modifizierten 2D Modell Schnitt 5mod durchgeführt, in dem der Obere Gipskeuper (A10/247/kmGo) durch Steinmergelkeuper (A9-K2/246/kmSM+ko1) ersetzt wird. Auf die Argumente für diese Modelländerung wird in Kap. 5.7.1 eingegangen.

5.3 Rechenfälle

Aufbauend auf den in Kap. 4 dokumentierten Rechnungen zu den Verhältnissen ohne die heutigen Entnahmen durch Brunnen werden zur Untersuchung der Auswirkungen einer Auspressung NaCl-gesättigter Lösung aus dem Grubengebäude folgende Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5 durchgeführt:

- Rechenfälle **R5-06**^[KLM242], **R5-07**^[KLM243], **R5-08** mit einem k_f -Wert des Hutgesteins von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s und mit spezifischen Einpressraten am Salzspiegel in die Schichtenfolge DGL von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$, $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ und $1,0 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$. Da die zu erwartende Auspressung aus dem Grubengebäude etwa $10 \text{ m}^3/\text{a}$ beträgt, würde eine spezifische Einpressrate von $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ bedeuten, dass die wirksame Subrosionsrinne lediglich eine Länge von 10 m aufweisen würde. Dies würde Flüsse senkrecht zur Modellebene bewirken. 2D Modellrechnungen mit einer spezifischen Einpressrate von $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ entsprechen deshalb einem Zustand, bei dem eine große Lösungsmenge in eine kurze Subrosionsrinne eingepresst wird.
- Mit einer auf 10^{-11} m/s verringerten Durchlässigkeit des Hutgesteins werden die Rechenfälle **R5-09** und **R5-10** gerechnet (spezifische Einpressrate von $0,02$ bzw. $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$)
- Um die Durchlässigkeitsverhältnisse des Schnittes 5 an jene entlang Schnitt 4 anzugleichen (Abbildung 2), wird im 2D Modell Schnitt 5mod die Durchlässigkeit der Modelleinheit A10/247/kmGo (Oberer Gipskeuper) von $1,3 \cdot 10^{-11}$ m/s auf den Wert der Einheit A9-K2/246/kmSM+ko1 (Steinmergelkeuper, $4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s) erhöht. Der Rechenfall **R5mod-03** wird mit einer spezifischen Einpressrate von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ durchgeführt.
- Zu Vergleichszwecken werden die Süßwasserrechenfälle **R5-01** und **R5mod-01** sowie die Salzwasserrechnungen **R5-05** und **R5mod-02** ohne Einpressung mit dem k_f -Wert des Hutgesteins von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s herangezogen.

Es bestehen damit drei Gruppen von Auspressrechnungen:

- Mit dem 2D Modell Schnitt 5: **R5-06** bis **R5-08** mit einem k_f -Wert des Hutgesteins von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s
- Mit dem 2D Modell Schnitt 5: **R5-09** und **R5-10** mit einem k_f -Wert des Hutgesteins von 10^{-11} m/s
- Mit dem 2D Modell Schnitt 5mod: **R5mod-03** mit einem k_f -Wert des Hutgesteins von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s

Die verwendeten spezifischen Einpressraten für die aufgeführten Rechenfälle sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 zusammengestellt. Die für die hydrostratigraphischen Einheiten verwendeten k_f - und Porositätswerte gehen aus Tabelle 1 hervor.

5.4 Randbedingungen, Parameter

Mit Ausnahme der Durchlässigkeit des Hutgestein und der Einpressrate gelten die Parameter und Randbedingungen des Rechenfalls R5-05 (Kap. 4.1.3).

5.5 Durchführung der Rechnungen mit NAMMU 6.3

Die Rechnungen zu den Auspressszenarien wurden stationär gerechnet. Ausgehend von **R5-05** konnte für einzelne Rechenfälle mit NAMMU 6.3 direkt eine stationäre Lösung erreicht werden. In den meisten Rechenfällen (insbesondere **R5mod-03** war jedoch zuerst eine instationäre Simulation bis zur Annäherung an den stationären Zustand erforderlich, bevor die stationäre Lösung ermittelt werden konnte. Im Rechenfall **R5-08** konnte der stationäre Zustand nicht berechnet werden; die dargestellten Resultate entsprechen dem instationären Zustand bei einer „Modellzeit“ von 20 Mio. Jahre.

5.6 Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5

5.6.1 Rechenfall R5-01

Die Rechnung **R5-01** stellt den mit den Parametern des Salzwasser-Basisfalls **R5-05** berechneten Süßwasserrechenfall dar. Er soll dazu dienen, die Unterschiede in den Darcyflüssen und den Ergebnissen der Trajektorienrechnungen im Allertal gegenüber dem Salzwasser-Basisfall aufzuzeigen.

Die Potentialverteilung und die Wasserflüsse über die Modelobergrenze in der Süßwasserrechnung **R5-01** und der Vergleich mit den 3D Süßwasserrechnungen [10] sind bereits in Kap. 4.1.1 dargestellt worden.

Wie Abbildung 11 zeigt, weisen die tieferen Einheiten des Allertals, ausgehend vom Lappwald und der Triasplatte, ungefähr vertikal verlaufende Potentiallinien auf. Die Exfiltrationen erfolgen ungefähr im Zentrum des Allertals. Im östlichen Teil des Allertals bildet sich im wenig durchlässigen Oberen Gipskeuper (A10/247/kmGo), der den besser durchlässigen Schilfsandstein (A11/248/kmS) überlagert, ein prägnanter vertikaler Potentialgradient. Das an der Basis der Schichtenfolge DGL berechnete (Süßwasser-) Potential beträgt 116,2 mNN (Tabelle 9).

Die Trajektorienrechnungen (Kap. 4.1.1.3) für die in der Schichtenfolge DGL angeordneten Startpunktgruppen A und B bilden das oben skizzierte Potential- bzw. Darcyfließfeld ab (Tabelle 11).

- Alle bis zur Modelobergrenze verlaufenden 29 Fließpfade (von 31) sind vom Typ *i*, d.h. sie verlaufen durch das Hutgestein nach SW und steigen durch den Oberkreidetrog zur Exfiltrationszone bei der Aller auf.
- Die Pfadlängen (Tabelle 11) weisen nur eine geringe Variationsbreite von 670 m bis 820 m auf (Mittelwert 720 m).
- Dies trifft ebenfalls für die Fließzeiten mit einer Bandbreite von 53'000, bis 175'000 Jahren (Mittelwert 94'000 Jahre) zu. [KLM270]

5.6.2 Rechenfall R5-05

Die Rechnung **R5-05** stellt den mit den Parametern des 3D Süßwasserrechenfalls R44 (ohne Grundwasserentnahme im Brunntal) gerechnete Salzwasser-Basisfalls dar. Er soll dazu dienen, die Darcyflüssen bei den Verhältnissen von R44 (ohne Grundwasserentnahme im Brunntal) unter Salzwasserbedingungen aufzuzeigen.

Die Potentialverteilung und die Wasserflüsse über die Modelobergrenze in der Salzwasserrechnung **R5-05** (Salzwasser-Basisfall, stationär) sind bereits in Kap. 4.1.3 detailliert dargestellt worden.

Wie Abbildung 23 zeigt, verstärkt sich im Hutgestein die im Wesentlichen horizontale Orientierung des Grundwasserflusses. Der Aufstieg von Wasser aus dem Hutgestein verlagert sich etwas nach Westen direkt unter den Oberkreidetrog (Abbildung 24). Der an der Basis der Schichtenfolge DGL berechnete Wasserdruck – ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe, erhöht sich infolge des Salzwassereinflusses gegenüber **R5-01** auf 125,9 mNN (Tabelle 9).

Die Trajektorienrechnungen (Kap. 4.1.3.7) ergeben folgende Resultate (Tabelle 11):

- Alle 15 in **R5-05** bis an die Modelobergrenze gelangenden Trajektorien sind wie im Rechenfall **R5-01** vom Typ *i*. Die Trajektorien verlaufen entlang der Basis des Hutgesteins nach Westen und steigen in den Oberkreidetrog auf, folgen anschließend dessen Basis nach Osten und exfiltrieren in der Umgebung der Aller (Abbildung 24, Abbildung 25). Der Verlauf der Fließpfade wird durch die Schichtenfolge DGL nur geringfügig beeinflusst.
- Die Pfadlängen weisen wie in **R5-01** nur eine geringe Variationsbreite von 880 bis 1'060 m auf (Mittelwert 990 m). Gegenüber der Süßwasserrechnung **R5-01** nehmen die Pfadlängen um 200 bis 300 m zu.
- Als Fließzeiten werden Werte zwischen 80'000 und 470'000 Jahren (Mittelwert 207'000 Jahre) berechnet.

5.6.3 Rechenfälle R5-06 bis R5-08

In den Salzwasserrechenfällen **R5-06** bis **R5-08** wird gegenüber **R5-05** an der Basis der Schichtenfolge DGL gesättigte Salzlake eingepresst, mit spezifischen Einpressraten von 0,02, 0,2 und 1 m³/m·a (Tabelle 5).

Die Resultate der erwähnten drei Rechenfälle sind in Abbildung 40 bis Abbildung 49 sowie in Tabelle 8 bis Tabelle 11 dokumentiert. Die Rechnungen ergeben folgende Resultate:

- Bereits in **R5-06**, bei einer spezifischen Einpressrate 0,02 m³/m·a, sind gegenüber **R5-05** deutliche Unterschiede zu beobachten. Die Konzentration im Hutgestein und im Keuper steigt markant an. Die Konzentrationsisolinie C=0,5 – ca. 50 m über dem Salzspiegel in **R5-05** – befindet sich nur noch wenige Dekameter unterhalb der Hutgesteinsobergrenze. An der Obergrenze der Schichtenfolge DGL beträgt die relative Konzentration C=0,6. Die Darcyflüsse in der Schichtenfolge DGL sind jetzt über die gesamte Höhe des Hutgesteins nach oben gerichtet (Abbildung 42). Dabei beträgt der Wasserübertritt aus der Schichtenfolge DGL in den Schilfsandstein A11/248/kmS lediglich 2,7 % der spezifischen Einpressrate an der Basis DGL (Tabelle 10). Im Schilfsandstein bildet sich eine Konvektionswalze aus (Abbildung 41).

Die an der Basis der Schichtenfolge DGL berechnete Süßwasserdruckspiegelhöhe nimmt auf 151,8 mNN zu und ist damit rund 26 m höher als in der Salzwasserrechnung **R5-05** (Tabelle 9). Der gesamte Salzinhalt steigt durch die Einpressung von Salzlake von 12'010 t in **R5-05** auf 12'820 t an (Tabelle 8).

- In **R5-07**, mit einer spezifischen Einpressrate von $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$, steigt gegenüber **R5-06** der Salzgehalt weiter stark an, besonders im Keuper. Die Isolinie $C=0,9$ befindet sich nun an der Obergrenze des Schilfsandsteins; die Isolinie $C=0,5$ steigt bis auf zwei Drittel der Höhe des Steinmergelkeuper (A9-K2/246/kmSM+ko1) an. Die Veränderungen im westlichen Teil des Hutgesteins sind nur gering. Der gesamte Salzinhalt erhöht sich von 12'820 t (**R5-06**) auf 14'940 t (Tabelle 8).

Die an der Basis der Schichtenfolge DGL berechnete Süßwasserdruckspiegelhöhe nimmt durch die Erhöhung der spezifischen Einpressrate auf $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ deutlich auf 245,2 mNN (Tabelle 9) zu (151,8 mNN in **R5-06**).

Der Fluss ist im zentralen Teil des Hutgesteins ab der Einpressstelle an der Basis DGL radial nach oben gerichtet (Abbildung 45).

Der Aufwärtsfluss von 10^{-10} bis 10^{-9} m/s in den unteren 2/3 der Schichtenfolge DGL nimmt im oberen Drittel der Schichtfolge DGL auf 10^{-10} bis 10^{-11} m/s ab (Abbildung 45). Der Wasserübertritt aus der Schichtenfolge DGL in den Schilfsandstein beträgt $1,27 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$, entsprechend 6,4 % der spezifischen Einpressrate an der Basis DGL (Tabelle 10).

- In **R5-08** mit einer spezifischen Einpressrate von $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ sind die Unterschiede in der Konzentrationsverteilung gegenüber **R5-07** im Hutgestein nur noch gering. Im Keuper steigt $C=0,96$ bis in den Schilfsandstein an und $C=0,5$ verschiebt sich im Oberen Gipskeuper A10/247/kmGo weiter nach oben. In der Triasplatte bewirkt die Einpressung von 1 m^3 Salzlake pro Jahr und Meter einen merklichen Salzanstieg (Abbildung 47); in der Lappwaldscholle ist dieses Phänomen – infolge der Existenz des Oberkreidetroges – nicht zu beobachten.

Der Salzinhalt nimmt infolge der Erhöhung des Salzgehaltes in der Triasplatte markant von 14'940 t in **R5-07** auf 16'475 t zu (Tabelle 8). Dieser verstärkte Salztransport in die Triasplatte ist nicht allein durch den Dichteeinfluss zu erklären, sondern dürfte wesentlich eine Folge des durch die Einpressung bewirkten massiven Anstiegs des Wasserdruckes an der Basis DGL darstellen. Dieser – ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe – erreicht den Wert von 648,4 mNN und ist damit mehr als 400 m höher als in **R5-07** (Tabelle 9). Dieser sehr hohe Wert entspricht ungefähr dem lithostatischen Überlagerungsdruck am Salzspiegel.

Trotz dieses hohen Wasserdruckes an der Basis DGL nimmt – infolge des Widerstands der Keuper-Deckschichten und des direkten Abflusses durch das intakte Hutgestein – der direkte Wasserabfluss aus der DGL in den Schilfsandstein nur mäßig von 12,7 l/a auf 66,1 l/a zu (Tabelle 10) (dessen Anteil an der Einpressrate verbleibt mit 6,6 % gegenüber **R5-07** praktisch konstant).

Der Verlauf, die Fließpfadlängen und Fließzeiten der Trajektorien (Tabelle 11) erfahren gegenüber **R5-05** wie erwartet signifikante Änderungen, ebenfalls die Verteilung auf die Fließwegtypen *i* bis *iii* (Kap. 3.4):

	Typ <i>i</i>	Typ <i>ii</i>	Typ <i>iii</i>
R5-05 (1)	15	--	--
R5-06 (1)	11	8	--
R5-07 (1)	11	--	19
R5-08 (1)	15	--	16
(1) Berücksichtigt sind die Trajektorien, die bis an die Modelobergrenze gelangen. Gesamtzahl der Startpunkte = 31			

In **R5-05** (ohne Einpressung) resultieren ähnliche Fließwegverläufe wie in der Süßwasserrechnung, wobei erneut alle Trajektorien zum Typ *i* gehören, diese jedoch etwas weiter SW in den Oberkreidetrog aufsteigen. Die geringe Einpressung in **R5-06** verursacht einen etwas höher gelegenen Verlauf durch das Hutgestein nach SW (Typ *i*) sowie Fließwege des Typs *ii*, die nach einem mehr oder weniger langen Teilverlauf in der DGL nach NE und durch den Keuper an die Geländeoberfläche aufsteigen.

In **R5-07** und **R5-08** mit höheren Einpressraten bleibt diese Aufteilung in Trajektorien, die nach SW (Typ *i*) und nach NE abfließen, erhalten. Letztere werden jedoch durch die Verstärkung des Dichteeffektes (und des Einpressdruckes) nach meist längerem Verlauf in der DGL nach NE in die Triasplatte getragen (Typ *iii*).

Die Fließwege des Typs *i* weisen die kürzesten Pfadlängen und die geringsten Laufzeiten auf. Die Pfadlängen nehmen von **R5-05** (Mittelwert 990 m) über **R5-06** (Mittelwert 930 m), **R5-07** (Mittelwert 580 m) bis **R5-08** (Mittelwert 540 m) kontinuierlich ab.

Eine gleich laufende, jedoch ausgeprägtere Entwicklung ist bei den Fließzeiten des Typs *i* zu beobachten, wo sich die Mittelwerte (**R5-05**_[KLM321]: 207'000 Jahre, **R5-06**_[KLM322] 43'000 Jahre) auf 2'260 Jahre in **R5-07**_[KLM323] und 1'130 Jahre in **R5-08**_[KLM324] verringern.

Bei den nach einem Teilverlauf in der Schichtenfolge DGL nach NE abfließenden Trajektorien des Typs *ii* und *iii* ergibt sich dieselbe Tendenz.

Während diese beiden Typen in **R5-05** fehlen, kommen in **R5-06** acht Trajektorien des Typs *ii* vor, die nach dem Austritt aus der Schichtenfolge DGL oder dem Hutgestein in den Keuper der östlichen Talhälfte und zur Modelobergrenze aufsteigen. Die mittlere Fließweglänge (Bandbreite 1'100-1'750 m, Mittelwert 1'490 m) ist größer als jene von Typ *i*, die Fließzeiten sind sehr hoch (Mittelwert rund 230'000 Jahre).

In **R5-07**_[KLM327] und **R5-08**_[KLM328] werden die Trajektorien des Typs *ii* von Trajektorien des Typs *iii*, also solchen, die zur Triasplatte abfließen, abgelöst. Deren Pfadlänge beträgt 2'000 m bis 2'300 m.

Die Trajektorien des Typs *iii* verlaufen zuerst in der Schichtenfolge DGL, treten aus ihr in das Hutgestein über, gelangen in den Schilfsandstein (1 Trajektorie direkt aus der DGL) und laufen anschließend durch die NE-Randstörung in die Triasplatte, wo sie durch die Volpriehausen-Folge, die Solling-Folge und den oberen Buntsandstein an die Modelobergrenze gelangen.

Die Fließzeiten verringern sich gegenüber Typ *ii* in **R5-06** infolge des erhöhten Einpressdruckes in **R5-07** auf 58'000 Jahre (Mittelwert) und reduzieren sich in **R5-08** auf 21'200 Jahre (Mittelwert).

Die Fließzeiten werden durch den Transport im Schilfsandstein, in der NE-Randstörung und in der Triasplatte bestimmt. Allerdings dürften in Wirklichkeit die Fließwege in der Triasplatte von 3D Effekten beeinflusst werden: So kann z.B. das in die Solling-Folge eintretende Salz in dieser entlang ihrem Gefälle nach Norden abfließen (vgl. Abb. 26 in [10]). Auch im Schilfsandstein erscheinen 3D Effekte möglich.

5.6.4 Rechenfälle R5-09 und R5-10 mit k_f Hutgestein = 10^{-11} m/s

In den beiden Rechnungen **R5-09** und **R5-10** mit spezifischen Einpressraten wie in **R5-06** und **R5-07** ($0,02$ und $0,2$ $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$) wird die Durchlässigkeit des Hutgesteins auf 10^{-11} m/s verringert. Demgegenüber betrug der k_f -Wert des intakten Hutgesteins in den bisherigen Rechenfällen $5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Die Konzentrationsverteilung (Abbildung 50, Abbildung 53) ist jener in **R5-06** und **R5-07** sehr ähnlich (Abbildung 40, Abbildung 43), abgesehen vom Salzgehalt im Keuper, der in **R5-09** und **R5-10** durch die Verstärkung des Flusses entlang der Schichtenfolge DGL etwas ansteigt.

Zwischen den beiden Rechenfällen **R5-09** und **R5-10** erfolgt eine ähnliche Zunahme des Salzinhaltes wie zwischen **R5-06** und **R5-07**, jedoch ist infolge der Verstärkung des Abflusses entlang der Schichtenfolge DGL der Salzinhalt rund 500 t höher (Tabelle 8).

Der Anstieg des Salzgehaltes und der erhöhte hydraulische Widerstand des intakten Hutgesteins (vor allem in **R5-10**) macht sich durch einen Anstieg des als Süßwasserdruckspiegelhöhe ausgedrückten Wasserdruckes an der Einpressstelle bemerkbar (**R5-09** 166,5 mNN, **R5-10** 371,9 mNN). Der Druckanstieg gegenüber den Rechenfällen mit k_f (Hutgestein) von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s ist besonders markant in **R5-10**, wo eine um rund 130 m größere Druckhöhe als in **R5-07** (245,2 mNN) berechnet wird (Tabelle 9).

Die Druckdifferenz (Süßwassersäule) zwischen der Basis und dem Top der Schichtenfolge DGL beträgt 47,5 m in **R5-09** und 241 m in **R5-10** (Tabelle 9).

Als Folge der geringeren Durchlässigkeit des Hutgesteins verstärkt sich der Fluss entlang der Schichtenfolge DGL. Der Anteil des direkten Abflusses aus der Schichtenfolge DGL in den Schilfsandstein beträgt in den beiden Rechenfällen 17 % bzw. 23 % der Einpressrate, während in **R5-06** und **R5-07** Werte von 2,7 % und 6,4 % berechnet wurden (Tabelle 10).

Die Fließwegverläufe (Abbildung 51, Abbildung 52 bzw. Abbildung 54, Abbildung 55) sind ähnlich wie in **R5-06** und **R5-07** (mit k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s). In **R5-10**_[KLM363] mit einer Einpressrate von $0,2$ $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ scheint sich der Anteil der Fließwege der Typen *ii* und *iii* gegenüber **R5-07**_[KLM364] etwas zu vergrößern. Die Fließzeiten bleiben für Typ *i* mit 2'100 Jahren (Mittelwert) ungefähr gleich, für Typ *iii* nehmen sie um 30 % auf 41'000 Jahre ab (Tabelle 11).

Die mittlere Fließzeit von Typ *i* in **R5-10**_[KLM365] (k_f Hutgestein 10^{-11} m/s) ist etwas geringer als jene in **R5-07**_[KLM366] (k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s). Dieses Ergebnis ist nicht sonderlich repräsentativ, da die Anzahl Trajektorien im Rechenfall R5-10 gering ist und einige Trajektorien des Typs *i* im Rechenfall R5-07 über längere Abschnitte in den gering durchlässigen Schichten entlang der Basis des Oberkreidetrogs verlaufen.

	k_f Hutgestein	Einpressrate	Typ <i>i</i>	Typ <i>ii</i>	Typ <i>iii</i>
	m/s	$m^3/m \cdot a$	n	n	n
R5-06 [KLM367]	$5 \cdot 10^{-11}$	0,02	11	8	--
R5-07 [KLM368]		0,2	11	--	19
R5-09 [KLM369]	10^{-11}	0,02	4	8	-- (abgebrochen)
R5-10 [KLM370]		0,2	4	2	19

Berücksichtigt werden die Trajektorien, die bis an die Modellobergrenze gelangen. Gesamtzahl der Startpunkte = 31

5.7 Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5mod

5.7.1 2D Modell Schnitt 5mod_[KLM371]

In der östlichen Hälfte des Allertals verändern sich zwischen Schnitt 5 und Schnitt 4 (Abbildung 2) die Verhältnisse wie folgt:

- Im Schnitt 5 wird die Schichtenfolge DGL an der Hutgesteinsobergrenze von Schilfsandstein A11/248/kmS überlagert. Dieser ist seinerseits überdeckt von Oberem Gipskeuper A10/247/kmGo und von Steinmergelkeuper A9-K2/246/kmSM+ko1.
- Im Schnitt 4 befindet sich die Verbreitungsgrenze des Gipskeuper A10/247/kmGo und des Schilfsandstein A11/248/kmS näher bei der Triasplatte. Oberhalb des Hutgesteins nimmt die Mächtigkeit und Verbreitung des Steinmergelkeuper A9-K2/246/kmSM+ko1 zu.

Dieser Unterschnitt von Schnitt 4 und Schnitt 5 wird im Modell Schnitt 5mod näherungsweise nachgebildet. Dazu wird im Modell Schnitt 5 der Obere Gipskeuper A10/247/kmGo ($1,3 \cdot 10^{-11}$ m/s) durch Steinmergelkeuper A9-K2/246/kmSM+ko1 ($4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s) ersetzt (rot in Abbildung 7).

5.7.2 Randbedingung

Im 2D Modell Schnitt 5mod wird entlang der Modellobergrenze dieselbe Dirichlet-Randbedingung aus **R5-01**_[KLM372] wie in den Salzwasserrechnungen mit 2D Modell Schnitt 5 (R5-02 bis R5-10) vorgegeben.

Trotz der etwas anderen Ausbildung des Keuper im östlichen Teil des Allertals im 2D Modell Schnitt 5mod (vgl. Abbildung 7) ist die Potentialverteilung im Keuper des Allertals jener in **R5-01**_[KLM373] sehr ähnlich (Abbildung 11, Abbildung 56).

Der für **R5mod-01** berechnete Wasserfluss über die Modellobergrenze ist mehr als fünfmal größer als in **R5-01**. Dies ist eine Folge der veränderten Permeabilitäten im Modell unter Beibehaltung der Potentialverteilung entlang der Modellobergrenze. Die in den Darstellungen der Potentialverteilung sichtbaren Unterschiede zwischen **R5mod-01** (Abbildung 56) und **R5-01** (Abbildung 11 unten) sind sehr gering.

Da die Modellwerte nicht zur Abschätzung der Verdünnung in Oberflächennähe verwendet werden und kein Einfluss auf die Trajektorienrechnungen zu erwarten ist, bewirken die größeren Flüsse in der Nähe der Modellobergrenze keine Beeinträchtigung der Modellresultate.

5.7.3 Rechenfälle

Die Süßwasserrechnung **R5mod-01**_[KLM377] soll zeigen, wie sich die Fließverhältnisse und die Trajektorienaten durch diese näherungsweise Anpassung des Schnittes 5 an die Verhältnisse in der Schnittlage 4 gegenüber **R5-01**_[KLM378] verändern.

Als Salzwasserrechnungen werden **R5mod-02**_[KLM379] ohne Einpressung und **R5mod-03**_[KLM380] mit einer spezifischen Einpressrate von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ durchgeführt.

5.7.4 Rechenfall **R5mod-01**_[KLM381]

Die Darcyflüsse und Trajektorienverläufe für den Süßwasserrechenfall mit modifiziertem Keuper (**R5mod-01**_[KLM382]) gehen aus Abbildung 57 und Abbildung 58 hervor.

Infolge der erhöhten Durchlässigkeit des Keuper stellt sich im östlichen Teil des Allertals ein tieferes Potential ein (an der Basis der Schichtenfolge DGL 112,3 mNN anstelle von 116,2 mNN in **R5-01**_[KLM383], Tabelle 9).

Die erhöhte Durchlässigkeit des Keuper erleichtert den Wasserabfluss aus der Triasplatte zur Aller und bewirkt im Hutgestein des östlichen Teils des Allertals einen Aufstieg von Grundwasser in den Keuper. Dadurch ergibt sich gegenüber **R5-01**_[KLM384] eine deutliche Veränderung des Fließfeldes und der Position des Wasserabflusses aus dem Hutgestein: Während in **R5-01**_[KLM385] der Wasserfluss im Hutgestein im wesentlichen nach Westen zum Oberkreidetrog erfolgt, stellt in **R5mod-01**_[KLM386] der Oberkreidetrog keine Exfiltrationszone für das Hutgestein mehr dar: Im Hutgestein fließt das Wasser gegen Osten und steigt in den darüberliegenden Keuper auf. In der Schichtenfolge DGL ist ein geringer Aufwärtsfluss zu beobachten. _[KLM387]

Das in **R5mod-01**_[KLM388] gegenüber **R5-01**_[KLM389] geringere Potential im Keuper der östlichen Talseite hat in den Trajektorienrechnungen zur Folge, dass alle Fließpfade entlang der Basis des Hutgesteins nach NE verlaufen und dann durch Hutgestein und Keuper sehr steil an die Modellobergrenze aufsteigen (Typ ii). Dieser direkte Verlauf zur Oberfläche führt gegenüber **R5-01**_[KLM390] zu einer Verkürzung der Pfadlänge um 200 m auf 490 m (Mittelwert, Bandbreite 460-520 m). Die resultierenden Fließzeiten, ebenfalls mit einer geringen Bandbreite (141'000 bis 197'000 Jahre) sind von derselben Größenordnung wie jene von Typ *i* in **R5-01** (Tabelle 11)._{[KLM391] [KLM392]}

5.7.5 Rechenfall **R5mod-02**_[KLM393]

Die Salzwasserrechnung **R5mod-02** ohne Einpressung wird lediglich mit der berechneten Konzentrationsverteilung im Allertal (Abbildung 59) dokumentiert.

Die Isolinie $C=0,5$ weist ungefähr dieselbe Position wie in der Rechnung **R5-05** mit dem 2D Modell Schnitt 5 auf (Abbildung 18). Die höhere Durchlässigkeit des Keuper in der NE-Talhälfte des Allertals bewirkt jedoch insbesondere, dass im oberen Teil des Hutgesteins Süßwasser vorliegt.

Der Fluss in der DGL ist wie in der Süßwasserrechnung nach oben gerichtet. Infolge des durch den Dichteeinfluss verstärkten Abflusses in das angrenzende Hutgestein ist in **R5mod-02** der direkte Abfluss in den Schilfsandstein geringer als in **R5mod-01**.

5.7.6 Rechenfall R5mod-03

In der Rechnung **R5mod-03** wird an der Basis der Schichtenfolge DGL wie in **R5-06** gesättigte Salzlake mit einer Rate von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ eingepresst (Tabelle 6). Die Resultate dieses Rechenfalls sind in Abbildung 60 bis Abbildung 62 dargestellt.

Die Konzentrationsisolinie $C=0,5$ steigt von einer Position 40 m über dem Salzspiegel in **R5mod-02** bis an die Obergrenze der Schichtenfolge DGL an. Wie in **R5mod-02** erfolgt der Salzaustrag durch den bis an die Basis des Steinmergelkeuper (hier: Oberer Gipskeuper mit erhöhter Durchlässigkeit) hinunter reichenden Süßwasserfluss aus der Triasplatte zur Aller.

Der Salzinhalt beträgt $11'410 \text{ t}_{[\text{KLM403}]}$ und steigt gegenüber **R5mod-02**_[KLM404] um $150 \text{ t}_{[\text{KLM405}]}$ an. In **R5-06**_[KLM406] dagegen wurde mit $12'820 \text{ t}_{[\text{KLM407}]}$ ein deutlich höherer Salzinhalt berechnet (Tabelle 8).

Die an der Basis der Schichtenfolge DGL berechnete Süßwasserdruckspiegelhöhe nimmt gegenüber **R5mod-02** um 24 m auf 145,2 m zu und ist – infolge des höheren k_f -Wertes des Keuper – um 6,6 m geringer als in **R5-06**_[KLM409] (Tabelle 9).

Wie in den beiden anderen Rechnungen mit dem 2D Modell Schnitt 5mod erfolgt ein geringer Wasseraustritt aus der Schichtenfolge DGL in den Schilfsandstein von $(0,48 \text{ l}/\text{m}\cdot\text{a})$ entsprechend 2,4 % der Einpressrate) (Tabelle 10).

Trajektorienrechnungen wurden ab den Startpunkten A und B durchgeführt (Abbildung 61, Abbildung 62). Dominierend sind wie in **R5mod-01** Fließwege des Typs *ii*. Daneben treten einige Fließwege des Typs *i* auf, die jedoch deutlich weniger häufig sind als in **R5-06** (Tabelle 11).

Die 27 Trajektorien des Typs ii verlaufen nach dem Austritt aus dem Hutgestein im Schilfsandstein zuerst nach NE, bis sie vom Wasserfluss aus der Triasplatte erfasst werden und durch den Steinmergelkeuper zur Exfiltrationszone Aller getragen werden. Dadurch verdoppelt sich die mittlere Pfadlänge gegenüber **R5mod-01** (490 m) auf $1'010 \text{ m}$. Die mittlere Fließzeit beträgt $82'000 \text{ Jahre}$.

Auch bei einem Vorkommen von höher durchlässigem Steinmergelkeuper (hier: Oberer Gipskeuper mit erhöhter Durchlässigkeit) in der östlichen Talhälfte treten bereits bei einer geringen Einpressrate erneut einige Trajektorien des Typs i (Hutgestein-Oberkreide-Quartär) auf. Sie weisen eine ähnliche mittlere Fließzeit ($85'000 \text{ Jahre}$) wie jene des Typs *ii* ($82'000 \text{ Jahre}$) auf; die minimale Fließzeit ($17'600 \text{ Jahre}$) ist etwas kürzer als jene des Typs *ii* ($25'100 \text{ Jahre}$).

Gegenüber der Rechnung **R5-06** mit dem 2D Modell Schnitt 5 ist die Häufigkeit der Trajektorien Typ *i* (Hutgestein-Oberkreide-Quartär) bei ähnlichen Fließzeiten geringer. Es dominieren Aufstiegswege im östlichen Allertal durch den Keuper (Typ *ii*). Die Trajektorien *ii* weisen einen mehr oder weniger langen Teilverlauf in der Schichtenfolge DGL auf.

5.8 Zusammenfassende Diskussion der Auswirkungen

Basierend in erster Linie auf der Konzentrationsverteilung und den Resultaten der Trajektorienrechnungen⁽⁵⁾ werden nachfolgend die Auswirkungen einer Einpressung von Salzlösung an der Basis der Schichtenfolge DGL in das Deckgebirge zusammengefasst und interpretiert.

Wie in Kap. 3.5 ausgeführt, werden die Fließpfade vom Einpressort an der Basis der Schichtenfolge DGL zur Geländeoberfläche in drei Typen eingeteilt:

- Typ *i*: Hutgestein im SW der Schichtenfolge DGL (A13-K2/273/DGL) – Oberkreidetrog (Jura, z.T. Oberkreide) - Quartär (z.T. Teilverläufe im Jura und im obersten Bereich des Keuper)
- Typ *ii*: Schichtenfolge DGL⁽⁶⁾- Hutgestein im NE (A13-K1/272/intaktes Hutgestein) – Schilfsandstein – Aufstieg an die Oberfläche durch Oberen Keuper – Quartär innerhalb der Allertalzone
- Typ *iii*: Schichtenfolge DGL⁽⁶⁾ - Hutgestein im NE (A13-K1/272/intaktes Hutgestein) – Schilfsandstein - übriger Keuper – Aufstieg an die Oberfläche in der Triasplatte

5.8.1 Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5 und k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s

Süßwasserfluss ohne Einpressung

Im Süßwasserrechenfall (**R5-01**) sind alle Fließpfade vom Typ *i*. Die Pfadlängen betragen 670–820 m (Mittelwert 720 m), die Fließzeiten 53'000 bis 175'000 Jahre (Mittelwert 94'000 Jahre).

Salzwasserfluss ohne Einpressung

Auch im Basisfall Salzwasser (**R5-05**) gehören alle Fließwege zum Typ *i*. Durch die Berücksichtigung des Salzwassereinflusses nehmen die Pfadlängen um 200-300 m auf 880-1'060 m (Mittelwert 990 m) zu. Der Mittelwert der Fließzeiten verdoppelt sich (207'000 Jahre), deren Bandbreite weitet sich aus (80'000 bis 470'000 Jahre).

Salzwasserfluss mit Einpressung

Die Einpressungen mit einer spezifischen Einpressrate von 0,02, 0,2 und 1 m³/m-a zeigen folgende Auswirkungen:

(a) Konzentrationsverteilung

Bereits bei einer geringen Einpressrate von 0,02 m³/m-a steigt die Konzentrationsisolinie $C=0,5$ bis wenige Dekameter unterhalb der Obergrenze des Hutgesteins, in der östlichen Talhälfte bis gegen die Obergrenze des Oberen Gipskeuper A10/247/kmGo an. Im Keuper erfolgt ebenfalls ein starker Anstieg des Salzgehaltes.

⁵ Die Anzahl der Trajektorien, die die Modellobergrenze erreichen, ist nicht in allen Rechnungen gleich (vgl. Tabelle 11).

⁶ Teilweise direkt in den Schilfsandstein austretend.

Bei spezifischen Einpressraten von 0,2 und 1 m³/m·a steigt die Konzentrationsisolinie C=0,5 bis 50 m unterhalb der Obergrenze des Steinmergelkeuper A9-K2/246/kmSM+ko1; bei einer Einpressung von 1 m³/m·a erfolgt zudem ein Anstieg der Salzkonzentration im Buntsandstein T6/su der Triasplatte.

(b) Druckhöhe

Die Einpressung bewirkt durch die Erhöhung des Salzgehaltes und - bei den Einpressraten von 0,2 m³/m·a und 1,0 m³/m·a – des hydraulischen Widerstands des Deckgebirges (Hutgestein, Keuper) eine Zunahme des Druckes an der Basis DGL. Diese beträgt 25 m (ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe) bei einer Einpressrate von 0,02 m³/m·a, 120 m bei 0,2 m³/m·a und sogar 520 m bei 1 m³/m·a. Rund 25 m der Druckspiegelerhöhung gehen auf den Anstieg des Salzgehaltes zurück, d.h. bei einer Einpressrate von 0,02 m³/m·a geht praktisch die gesamte Erhöhung des Druckes an der Einpressstelle auf den Anstieg des Salzgehaltes zurück.

(c) Fluss entlang der Schichtenfolge DGL

Der Wasserfluss entlang der Schichtenfolge DGL erfährt durch die Erhöhung der Einpressrate eine Verstärkung, ist aber in allen Fällen gering. Ohne Einpressung, im Rechenfall R5-05, fließt am oberen Ende der Schichtenfolge DGL etwas Wasser aus dem Schilfsandstein in die Schichtenfolge zu. Mit Einpressung am Salzspiegel dreht die Fließrichtung auch an der Grenze zwischen der Schichtenfolge und dem Schilfsandstein. Der Abfluss nimmt mit steigender spezifischer Einpressrate zu und erreicht 66 l/m·a bei einer spezifischen Einpressrate von 1 m³/m·a. Der Anteil des direkten Abflusses aus der DGL in den Schilfsandstein bezogen auf die Einpressrate beträgt 2,7 % bei 0,02 m³/m·a und rund 6,5 % bei 0,2 und 1 m³/m·a.

(d) Trajektorien

Während ohne Einpressung alle Trajektorien dem Fließweg Typ *i* angehören, treten mit Einpressung in nennenswertem Maße auch Fließwege der beiden anderen Typen auf. Bei einer spezifischen Einpressrate von 0,02 m³/m·a sind es solche vom Typ *ii* (Direktaufstieg durch den Keuper), bei einer höheren spezifischen Einpressrate verlaufen sie weiter im Osten und gehören zum Typ *iii* (Hutgestein-Keuper-Triasplatte). Die Trajektorienabschnitte innerhalb der Schichtenfolge DGL variieren bei den Typen *ii* und *iii* stark, der Typ *i* verläuft – wenn überhaupt – höchstens über eine sehr kurze Strecke in der Schichtenfolge.

Die mittleren Pfadlängen der Trajektorien Typ *i* nehmen mit zunehmender Einpressrate von 930 m bei 0,02 m³/m·a auf 540 m bei 1 m³/m·a ab. Die Fließwege des Typs *iii* bei Einpressraten von 0,2 und 1 m³/m·a sind 2'000 bis 2'300 m lang.

Die Mittelwerte der Fließzeiten der Trajektorien Typ *i* verringern sich vom hohen Wert von 43'000 Jahre bei 0,02 m³/m·a auf 2'260 Jahre und 1'130 Jahre bei einer Einpressrate von 0,2 bzw. 1 m³/m·a. Die Fließwege Typ *ii* und Typ *iii* weisen bei einer spezifischen Einpressrate von 0,2 m³/m·a lange Fließzeiten (>50'000 Jahre) auf. Bei einer hohen Einpressrate (1 m³/m·a) werden ebenfalls für Typ *iii* geringere, jedoch mit 21'200 Jahren noch beträchtliche Fließzeiten berechnet. Die hohen Fließzeiten rühren v.a. vom Verlauf im Schilfsandstein, in der NE-Randstörung, in der Triasplatte bzw. im Schilfsandstein/Oberem Gipskeuper her.

(e) Schlussfolgerungen für die Hutgesteinsdurchlässigkeit $5 \cdot 10^{-11}$ m/s

Bei einer geringen Einpressrate ($0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$) erfolgt der Abfluss der eingepressten Lösung zu einem nennenswerten Teil durch das Hutgestein in die Oberkreide und das Quartär. Der Rest fließt – nach einem mehr oder weniger langen Transportabschnitt in der Schichtenfolge DGL – gegen NE in den Keuper und steigt durch diesen an die Geländeoberfläche (Typ *ii*). Die Schichtenfolge DGL spielt dabei nur in beschränktem Ausmaß als Austragsweg eine Rolle.

Bei einer Einpressrate von $0,2$ und $1 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ weisen erneut die Trajektorien des Fließweges Typ *i* die kürzesten Fließzeiten auf. Diese nehmen sehr stark ab ($2'260$ bzw. $1'130$ Jahre), die Häufigkeit der zum Typ *i* zählenden Fließwege geht zurück. Dafür bilden sich Fließwege gegen NE mit langen Fließzeiten (Typ *iii*, $>50'000$ Jahre bei der Einpressrate von $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$) aus. Die Fließzeiten der Trajektorien von Typ *iii* sind auch bei einer (in 2D Rechnungen) unrealistisch hohen Einpressrate von $1 \text{ m}^3/\text{m}$ (vgl. Kap. 5.3) beträchtlich ($>20'000$ Jahre).

Die Rolle der DGL als Austragsweg ist in Schnitt 5 eher beschränkt. Dies ist auf die angenommene relativ hohe Durchlässigkeit des Hutgesteins zurückzuführen.

5.8.2 Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5 und k_f Hutgestein 10^{-11} m/s

Die Verringerung der Hutgesteinsdurchlässigkeit auf 10^{-11} m/s in den Rechenfällen **R5-09** und **R5-10** mit Einpressraten von $0,02$ und $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ hat eine stärkere Kanalisierung des Wasserflusses in der Schichtenfolge DGL, eine Zunahme des Direktabflusses aus der DGL in den Schilfsandstein sowie einen Anstieg des Salzgehaltes im Keuper zur Folge.

Wie in den Rechnungen mit der höheren Hutgesteinsdurchlässigkeit kommen alle drei Fließwegtypen vor. Jedoch nimmt die Häufigkeit des Typs *i* ab, jene von Typ *ii* (bei $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$) und Typ *iii* (bei $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$) nimmt zu. Bei einer Einpressrate von $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ verringert sich für Typ *iii* gegenüber der Rechnung mit k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s die mittlere Fließzeit um 30 % auf rund $40'000$ Jahre.

5.8.3 Rechenfälle mit dem 2D Modell Schnitt 5mod (Durchlässigkeit Keuper modifiziert) und k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s

Mit dem Modell Schnitt 5mod wird die unterschiedliche Anbindung der Schichtenfolge DGL an das Deckgebirge im Schnitt 4 näherungsweise nachgebildet (vgl. Kapitel 5.7.1).

In der Süßwasserrechnung und ohne Einpressung (**R5mod-01**) verlagert sich der Aufstieg der Trajektorien gegenüber dem 2D Modell Schnitt 5 (**R5-01**) nach NE: Die Fließpfade gehören durchwegs dem Typ *ii* an und steigen aus dem Hutgestein durch den Keuper steil an die Modellobergrenze auf. Die Fließweglängen nehmen gegenüber der Süßwasserrechnung **R5-01** um 200 m auf 490 m (Mittelwert) ab; die Fließzeiten dagegen werden durch den Verlauf im Keuper etwas länger.

Im Salzwasser-Rechenfall ohne Einpressung **R5mod-02** weist die Konzentrationsisolinie $C=0,5$ dieselbe Position wie in der Rechnung **R5-05** mit dem 2D Modell Schnitt 5 auf. Die Versalzungsgrenze ($C=0,02$) verläuft von der Basis des Oberkreidetrgs quer

durch das Hutgestein zur Obergrenze der Schichtenfolge DGL und liegt damit deutlich tiefer als in **R5-05**.

Bei einer Einpressung von $0,02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ in **R5mod-03** steigt die Versalzung des Hutgesteins deutlich an.

In beiden Rechenfällen erfolgt der Salzaustrag durch den bis an die Basis des als relativ gut durchlässig angenommenen „Steinmergelkeuper“ hinunter reichenden Süßwasserfluss aus der Triasplatte zur Aller.

Bei den berechneten Fließwegen sind wie im Rechenfall ohne Einpressung Fließwege des Typs *ii* dominierend. Es treten nur wenige Fließwege des Typs *i* auf (nur 4 von 31 Trajektorien), deutlich weniger als in **R5-06**.

Die Trajektorien des Typs ii verlaufen zunächst über eine mehr oder weniger lange Strecke in der Schichtenfolge DGL und nach dem Austritt aus dem Hutgestein im Schilfsandstein zuerst nach NE, bis sie vom Wasserfluss aus der Triasplatte erfasst und durch den Steinmergelkeuper zur Exfiltrationszone Aller getragen werden. Dadurch verdoppelt sich die mittlere Pfadlänge gegenüber **R5mod-01** (490 m) auf 1'010 m. Die mittlere Fließzeit beträgt rund 80'000 Jahre.

Die Trajektorien des Typs i weisen eine ähnliche mittlere Fließzeit (rund 85'000 Jahre) wie jene des Typs *ii* auf. Ihre minimale Fließzeit von 17'600 Jahre ist allerdings etwas kürzer.

Gegenüber der Rechnung **R5-06** mit dem 2D Modell Schnitt 5 ist die Häufigkeit des Fließweges Typ *i* (Hutgestein-Oberkreide-Quartär) bei ähnlichen Fließzeiten geringer.

5.8.4 Rolle der Schichtenfolge DGL

Nach den durchgeführten Modellrechnungen spielt die Schichtenfolge DGL als Abflussweg für die eingepresste Salzlauge eine merkliche Rolle.

Nahe der Einpressstelle am Salzspiegel wirkt die Schichtenfolge DGL in starkem Maße kanalisierend. Der größte Teil der Trajektorien verläuft zunächst über eine mehr oder weniger lange Strecke in der Schichtenfolge DGL und tritt danach meist in das angrenzende Hutgestein aus. Der Direktabfluss aus der Schichtenfolge DGL in den Schilfsandstein beträgt in den Rechnungen mit k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ zwischen rund 3 % und 7 %. Bei einer geringeren der Durchlässigkeit des Hutgesteins von 10^{-11} m/s erhöht sich dieser auf rund 20 % der Einpressrate.

Im 2D Modell Schnitt 5mod (Keuper modifiziert) ist der Direktabfluss aus der Schichtenfolge DGL in den Schilfsandstein – zumindest bei einer geringen Einpressrate und einem k_f -Wert des Hutgesteins von $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ – ebenfalls gering.

6 Austragswege

Die in Kap. 5.8 beschriebenen Fließpfadtypen *i* bis *iii* der vorliegenden Süß- und Salzwasserrechnungen mit den 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 5mod lassen sich wie folgt den Austragswegen W2 bis W4 (Definition siehe Kap. 3.5) zuordnen:

	Spez. Einpressrate m ³ /m·a	Anz. gültiger Trajektorien (1)	Austragswege		
			W2	W3	W4
2D Modell Schnitt 5, k_r Hutgestein 5·10⁻¹¹ m/s					
R5-06[KLM432]	0,02	19	--	<i>ii</i> / 42 %	<i>i</i> / 58 %
R5-07[KLM433]	0,2	30	--	<i>iii</i> / 63 %	<i>i</i> / 37 %
R5-08[KLM434]	1	31	--	<i>iii</i> / 52 %	<i>i</i> / 48 %
2D Modell Schnitt 5, k_r Hutgestein 10⁻¹¹ m/s					
R5-09[KLM435]	0,02	12	--	<i>ii</i> / 67 %	<i>i</i> / 33 %
R5-10[KLM436]	0,2	25	--	<i>ii</i> / 8 % <i>iii</i> / 76 %	<i>i</i> / 16 %
2D Modell Schnitt 5_mod, k_r Hutgestein 5·10⁻¹¹ m/s					
R5mod-03[KLM437]	0,02	31	<i>ii</i> / 87 %	--	<i>i</i> / 13 %

(1) Anzahl Trajektorien der 31 Startpunkte A und B, die die Modellobergrenze erreichen

Im Vergleich dazu ergab die 3-dimensionale Analyse der Austragswege unter Vernachlässigung der Dichteeffekte [12] folgende Aufteilung für den k_r-Wert des intakten Hutgesteins von 1·10⁻¹¹ m/s und bei einer spezifischen Einpressrate von 0,05 m³/m·a:

	W2	W3	W4
Schnitt 5	0 %	45 %	55 %
Schnitt 4 (1)	28 %	0 %	72 %

(1) ungefähr vergleichbar mit R5mod-03

Der Vergleich zeigt, dass durch die Dichteeffekte die Austragswege durch das intakte Hutgestein direkt in den Oberkreidetrog (Austragsweg W1) deutlich weniger häufig auftreten als bei einer Vernachlässigung dieser Effekte. Aufgrund der Dichteeffekte tritt die am Salzspiegel in die Schichtenfolge DGL eingepresste Lösung zum größeren Teil nach unten, d.h. gegen NE aus der Schichtenfolge DGL in das intakte Hutgestein über. Dieser Effekt kann in Süßwasserrechnungen nicht berücksichtigt werden.

Eine zusammenfassende Beurteilung der Austragswege W1 bis W4 erfolgt in Kap. 7.2.

7 Schlussfolgerungen

7.1 Referenzfall (basierend auf R44, ohne die heutigen Entnahmen durch Förderbrunnen)

Die Salzwasserrechnungen mit den 2D Modellen Schnitt 5 und Schnitt 6 erlauben folgende Aussagen zum Fließfeld ohne die heutigen Entnahmen durch Brunnen im Gebiet Lappwald – Allertal - Triasplatte:

- Die Verhältnisse in der Lappwaldscholle und im Allertal stellen einen stationären Zustand dar. Dabei wird das Fließfeld im Lappwald – neben dem oberflächennahen Süßwasserfluss – wesentlich durch das Absinken des Salzspiegels (Zechstein und Salzlager des Mittleren Muschelkalk) unter die Lappwaldscholle, insbesondere aber durch die Salzlager des Unteren und Oberen Gipskeuper bestimmt.
- Die Anwesenheit der Gipskeuper-Salzlager verhindert durch die Aufsaltung der tieferen Teile der Lappwaldscholle dort nennenswerte Wasserflüsse. Die Fließraten sind dort extrem gering (10^{-15} bis 10^{-13} m/s). Salzlösung erfolgt im Lappwald im Wesentlichen entlang des Salzlagers des Oberen Gipskeuper. Der Abtransport des gelösten Salzes geschieht gegen das Allertal in die Oberkreidemulde. Durch die Salzlösung wird die Lücke in der Verbreitung dieses Salzlagers langsam erweitert, in der Größenordnung von 1 bis 2 m pro 1000 Jahre.
- Die Subrosion an der SW-Flanke der Salzstruktur ist aufgrund der geringen Wasserbewegung und der Versalzung durch die Gipskeuper-Salzlager sehr gering.
- Im Allertal wirkt der tiefreichende, gut durchlässige Oberkreide-Trog als Senke für die Salzwasserabflüsse aus dem Lappwald. Die salzwasserbetonten Flüsse aus dem zentralen und dem NE-Teil der Allertalzone erfolgen ebenfalls ungefähr horizontal zum Oberkreide-Trog, allerdings aus der entgegengesetzten Richtung, von NE. Die Fließgeschwindigkeiten (10^{-14} bis 10^{-11} m/s), die dabei stattfindende Salzlösung und der Salztransport sind sehr gering.
- In der Weferlinger Triasplatte fehlt ein durchgehendes Salzlager an der Basis des Buntsandstein. Das Zechsteinsalz der Allertalzone reicht nur ca. 1 km weit unter die Triasplatte. Die früheren Salzlager des Röt sind bis auf geringe Reste (die in den Modellrechnungen vernachlässigt wurden) subrodiert.

Die Rechnungen mit einer Salzrandbedingung entlang des Zechsteinsalzes in der oben genannten Ausdehnung zeigen, dass dieses Salzlager nicht die Versalzung im tieferen Teil der Triasplatte (Unterer Buntsandstein) erklären kann. Nach den Salzwasserrechnungen R5-02 und R6-02 sollte in der Triasplatte vorwiegend Süßwasser vorkommen. Die Salzverteilung ohne die heutigen Entnahmen durch Förderbrunnen in der Triasplatte (die sich allerdings nur auf sehr wenige Daten stützt) muss deshalb ein Relikt einer früheren, ausgedehnteren Verbreitung der Salzlager – vor der Subrosion des Rötosalzes – sein. Diese Hypothese wurde mit der Rechnung R5-04 überprüft. Das

Angleichen des Salzgehaltes in den tieferen Bereichen der Triasplatte an die heutige Verteilung der Salzlager erfolgt sehr langsam und dauert hunderttausende bis Millionen von Jahren. Die Rechnung R5-04 und ihr Vergleich mit R5-02 zeigen, dass sich dieser instationäre Zustand infolge der Anwesenheit des Zechstein-Salzlagers in der Übergangszone Triasplatte – Allertal kaum auf die Abflussverhältnisse in der nordöstlichen Talflanke auswirkt. Der Salzaustrag aus der Triasplatte erfolgt am topographischen Übergang zum Allertal (NE-Randstörung) oder durch die Keupersedimente der östlichen Talhälfte des Allertals in das geringmächtige Quartär NE der Aller.

7.2 Einpressungsrechnungen

Die Auspressung von Salzlösungen aus dem Grubengebäude in der Größenordnung von $10 \text{ m}^3/\text{a}$ und deren Einpressung am Salzspiegel in die Schichtenfolge DGL des Hutgesteins bewirken einen massiven Anstieg des Bereichs mit stark versalztem Grundwasser im Hutgestein sowie in den geringdurchlässigen Keupersedimenten der NE-Talhälfte des Allertals. Die Abflusswege dieser in die Schichtenfolge DGL eingepressten Salzlösungen wurden mit 2D Modellrechnungen unter Berücksichtigung der Dichteeffekte untersucht. Dabei sind die Ergebnisse mit dem Modell Schnitt 5 repräsentativ für eine Auspressung aus dem Bereich des Zentralteils der Grube Bartensleben, jene mit dem Modell Schnitt 5mod für eine Auspressung aus dem Bereich des Nordfeldes. Die Rechnungen erlauben eine genauere Charakterisierung der bereits in den 3D Einpressrechnungen beschriebenen, potentiellen Austragswege.

In den Gebieten des Zentralteils und des Nordfeldes können die zu erwartenden Austragswege W2 bis W4 (Kap. 3.5) nach den 3D Süßwasser- und 2D Salzwasserrechnungen wie nachfolgend beschrieben charakterisiert werden:

7.2.1 Austragswege Schnitt 5 (Zentralteil)

Bei einer Einpressung bei Schnitt 5 (Gebiet des Zentralteils) erfolgt die Ausbreitung entlang der Wege W3 und W4.

Für die Beurteilung der relativen Häufigkeit der beiden Wegklassen und die Ableitung ihrer charakteristischen Kennzahlen ist folgendes zu berücksichtigen:

- Die Modellrechnungen im vorliegenden Bericht wurden für k_f -Werte des intakten Hutgesteins von $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ und $5 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ durchgeführt. Diese Modellparameter wurden festgelegt, bevor die Auswertung der Daten aus den hydraulischen Tests abgeschlossen war. Als bester Schätzwert für den k_f -Wert des intakten Hutgesteins wird heute ein Wert von $1 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$ oder weniger betrachtet. Modellergebnisse für die niedrigere Hutgesteinsdurchlässigkeit sind deshalb besser geeignet, um Aussagen zur Ausbreitung der ausgepressten Lösung zu machen.
- Die Häufigkeit der beiden Wege wurde in Kapitel 6 gestützt auf die Anzahl der Trajektorien ermittelt, die bis zur Geländeoberfläche gerechnet werden konnten. Die Abbildungen mit Trajektorien zeigen jedoch durch blosses Nachzählen, dass durch dieses Vorgehen die Häufigkeit der Trajektorien vom Typ *i* überschätzt, jene vom Typ *ii* oder *iii* unterschätzt werden. Diesem Umstand wird bei den folgenden Angaben Rechnung getragen.

- Die Auspressrate aus dem Grubengebäude beträgt für eine längere, repräsentative Zeitperiode rund $10 \text{ m}^3/\text{a}$, die Länge der aufgrund von Subrosionsprozessen gut durchlässigen Subrosionsrinne dürfte wenige 100 m betragen. Ein typischer Wert für die spezifische Einpressrate ist somit $0,05 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$. Die folgenden Angaben zu den Ausbreitungswegen beruhen auf vorsichtigen Inter- und Extrapolationen der Modellergebnisse.

Aufgrund der Modellergebnisse und der oben aufgeführten Sachverhalte lassen sich die Ausbreitungswege bei einer Auspressung aus dem Zentralteil (nahe Schnitt 5) wie folgt charakterisieren.

Austragswege im Gebiet des Zentralteils (Schnitt 5)		
Schlussfolgerungen aus Modellergebnissen, interpoliert für eine Einpressrate von $0,05 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ und einen k_f -Wert des Hutgesteins von 10^{-11} m/s		
W3	Relative Häufigkeit	83 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Schilfsandstein – Aufstieg durch Gipskeuper an GOK SE der Aller (Typ ii) bzw. Schilfsandstein – NE-Randstörung – Aufstieg durch Oberen Buntsandstein an GOK Triasplatte (Typ iii)
	Weglänge	Typ ii: 750 m (600 m – 1000 m) Typ iii: 2'000 m (keine Angabe zur Bandbreite)
	Fließzeit	Typ ii: 110'000 a (100'000 a – 130'000 a) Typ iii: 80'000 a (50'000 a – 120'000 a)
W4	Relative Häufigkeit	17 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Oberkreidetrog (Basis: Jura) – Quartär – Exfiltration SE der Aller
	Weglänge	600 m (500 m – 700 m)
	Fließzeit	4'200 a (4'000 a – keine obere Bandbreite)

7.2.2 Austragswege Schnitt 4 (Nordfeld)

Aus den Modellergebnissen für den Schnitt 5mod lassen sich mit denselben Überlegungen wie für den Schnitt 5 die folgenden charakteristischen Angaben ableiten:

Austragswege im Gebiet des Nordfeldes (Schnitt 4)		
Schlussfolgerungen aus Modellergebnissen, interpoliert für eine Einpressrate von $0,05 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$ und einen k_f -Wert des Hutgesteins von 10^{-11} m/s		
W2	Relative Häufigkeit	87 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Unterer Gipskeuper – Schilfsandstein – Aufstieg durch Steinmergelkeuper und Exfiltration im SE der Aller
	Weglänge	500 m (400 m – 800 m)
	Fließzeit	20'000 a (5'000 a – 100'000 a)
W4	Relative Häufigkeit	13 %
	Verlauf der Fließpfade, Exfiltrationsort	DGL/Hutgestein – Basis Oberkreidetrog (obere Alleringerslebener Schichten) – Quartär – Exfiltration SE der Aller
	Weglänge	600 m (500 m – 700 m)
	Fließzeit	5'000 a (4'500 a – keine Angaben zur oberen Bandbreite)

7.3 Schlussfolgerungen zu den Austragswegen

Die relativ hoch durchlässige Schichtenfolge DGL beeinflusst die Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung stark. Die Schichtenfolge ist in Streichrichtung zerblockt, wobei die Ausdehnung der einzelnen Blöcke einige 100 m beträgt [12].

Für die Analyse der Ausbreitungswege wurden in [12] vier Austragswege W1 bis W4 definiert, in Kapitel 3.5 sind sie nochmals umschrieben. Wie in [12] gezeigt wurde, erfolgt einerseits aufgrund der Permeabilitätskontraste, andererseits und insbesondere wegen der Zerblockung der Schichtenfolge DGL keine Ausbreitung in deren Streich-

richtung: Der Ausbreitungsweg W1 ist für den Nachweis der Langzeitsicherheit nicht zu unterstellen.

Bei einer Auspressung im Bereich des Zentralteils der Grube Bartensleben erfolgt die Ausbreitung der ausgepressten Lösung entlang der Wege W3 und W4. Die charakteristischen Daten dieser Wege sind in Kapitel 7.2.1 tabellarisch zusammengestellt. Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen ihren Verlauf in einer Aufsicht und einem Vertikalschnitt. Die Aufteilung der ausgepressten Lösung auf die beiden Austragswege ist entsprechend der in Kapitel 7.2.1 angegebenen relativen Häufigkeit von 83 % für den Weg W3 und 17 % für den Weg W4 zu erwarten.

Lösung, die im Bereich des Nordfeldes ausgepresst wird, breitet sich entlang der Wege W2 und W4 aus (Abbildung 63, Abbildung 64), mit den in Kapitel 7.2 angeführten charakteristischen Daten. Die zu erwartenden relativen Anteile betragen 87 % für Weg W2 und 13 % für Weg W4.

Die an der Geländeoberfläche austretenden Lösungen aus dem Grubengebäude erfahren dort eine weitere Verdünnung. Die Verdünnung im Quartär wurde in [12] (Kapitel 2) behandelt. Um den örtlich unterschiedlichen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, wird als verdünnender Grundwasserfluss für alle Wege ein niedriger Wert von $25'000 \text{ m}^3/\text{a}$ unterstellt.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Voss, C. I. (1984): SUTRA: A finite-element simulation model for saturated-unsaturated fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. - U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 84-4369
- [2] Genter, M. und Schindler, M. (1996): Projekt Gorleben. 3D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Das Programm CGM. - CPC-Bericht 4073/4, Januar 1996, Colenco Power Consulting AG, Baden/CH
- [3] Hartley, L.J., Jackson, C.P. and Watson, S.P. (1996): NAMMU (Release 6.3) User Guide. AEA Technology. – February 1996, AEA-ES-0138, Harwell/United Kingdom
- [4] Langkutsch, U., Käbel, H., Margane, A. & Schwamm, G. (1998): Projekt ERA Morsleben, Hydrogeologische Standortbeschreibung und Modellgrundlagen. – Archiv-Nr. 116906, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover
- [5] Lippmann, J. (1998): Isotopengeologische Untersuchungen zum Wasser- und Stofftransport im Gebiet des ERA Morsleben. – Inaugural-Dissertation, Ruprechts-Karls-Universität, Heidelberg
- [6] Lippmann, J. und Sonntag C. (1998): Edelgasuntersuchungen an Porenwässern und Untersuchungen zum Salinitätsprofil. – Oktober 1998, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg
- [7] GFE & CPE (1999): Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches Schacht Bartensleben im Oberen Allertal. – Geologische Forschung und Erkundung – Mai 1999, Geologische Forschung und Erkundung GmbH, Halle / Colenco Power Engineering AG, Baden/CH
- [8] Genter, M.A. (1999): Three-dimensional transport in a coupled groundwater-flow system: a fast finite-element code for solving large problems. – CPE-Memorandum 1971/1, April 1999, Colenco Power Engineering AG, Baden/CH
- [9] Genter, M. and Rivera, A. (1999): SoTraCoF (Solute Transport Coupled Flow). Description & User Guide. – Colenco Report No. 1971-04, November 1999, Colenco Power Engineering AG, Baden/CH
- [10] Klemenz, W., Klubertanz, G., Oswald, S. und Siegel, P. (2000): Endlager Morsleben. 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Modellaufbau, Modellkalibrierung R42, Rechenfall R43 und Referenzfall R44. - CPE-Bericht 4305/33, Colenco Power Engineering AG, Baden/CH
- [11] Klemenz, W. und Siegel, P. (2001): Endlager Morsleben. 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Abschätzung der möglichen Lösungszutritte aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude. – CPE Bericht 4305/38, Colenco Power Engineering AG, Baden/CH
- [12] Siegel, P., Klemenz, W. und Resele, G. (2002): Endlager Morsleben. 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhält-

nissen. Rechnungen zur Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösungen. – Bericht CPE 4305/39, Colenco Power Engineering AG; Baden/CH

[13] Niemeyer, M., Resele, G., Skrzyppek, J., Wilhelm, St., Jaquet, O., Klubertanz, G., Poppei, J. und Schwarz, R. (2002). – Endlager Morsleben. Langzeitsicherheitsnachweis für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. – CPE Bericht 4651/50, Colenco Power Engineering AG; Baden/CH

[14] Käbel, H. (2002): ERA Morsleben. Geowissenschaftliche Bewertung der Langzeitentwicklung sowie der Zufluss- und Austrittsszenarien nach Verfüllung des Endlagers. Abschlussbericht. – April 2002, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

9 Definitionen

Auspressrate aus dem Grubengebäude	Rate der durch Gebirgskonvergenz und ggf. Gasbildung bewirkten Auspressung von Salzlösung aus dem Grubengebäude (in m^3/a).
Einpressung in das Deckgebirge	Die aus dem Grubengebäude ausgepresste Salzlösung kann entlang einer Wegsamkeit Grubengebäude/Salzspiegel an den Salzspiegel gelangen und in das Deckgebirge (insbesondere in die Schichtenfolge DGL) eingepresst werden.
Spezifische Einpressrate in Schichtenfolge DGL	Für eine bestimmte Auspressrate ergeben sich bei unterschiedlichen Längen der an die Wegsamkeit im Salzstock angebundenen Wegsamkeit Schichtenfolge DGL/Salzspiegel unterschiedliche Einpressraten in die Schichtenfolge DGL pro Meter Längenausdehnung der DGL (in $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{a}$).

10 Tabellen

ERA
ERA
Morsleben

Modell-einheit	K-Klasse		Stratigraphie	k _r -Wert (3D Modell, Rechenfälle R43, R44 [10])	Effektive Matrixporosität (4) * in Einheiten mit k _r ≥ 10 ⁻⁶ m/s = Fließporosität	Effektive Porosität (4) (3D Modell, Rechenfälle R43, R44 [10])		
	3D Modell	2D Modelle Schnitte 5 und 6				Rechenwert	Bandbreite	
				m/s	%	%	%	
LAPPWALDSCHOLLE								
L1	131	--	<i>jusi</i> <i>juhe</i>	Sinemurium (Ton- bis Schluffstein) Hettangium (Schluff-, Feinsand-, Tonstein)	9,0·10 ⁻⁶	10	3	1 – 5
L2	132	3	<i>juhe</i> <i>ko3c</i>	Hettangium (Schluff-, Feinsand-, Tonstein) Oberrhät (Tonstein)	2,1·10 ⁻⁹	5	1,75	0,5 – 3
L3a	141	--	<i>koGl</i>	„Versturz- und Gleitsedimente aus Oberkeupermaterial“	3,1·10 ⁻⁷	--	--	--
L3	142	4	<i>ko2b</i>	Mittelhät-Sandstein	1,5·10 ⁻⁵	7,5 *	6,5	3 – 10
L4	143	5	<i>koM</i>	Mergelhorizont des Unterrhät	1,0·10 ⁻⁸	5	1,75	0,5 – 3
L5-K2	144	6	<i>ko1</i>	Unterrhät	7,9·10 ⁻⁵	7,5 *	7,5	5 – 10
L5-K1	145	7	<i>ko1</i>	Unterrhät	2,7·10 ⁻⁷	10	3	1 – 5
L6	146	8	<i>kmSM</i>	Steinmergelkeuper	2,3·10 ⁻⁷	7,5	3	1 – 5
L7-K1	147	9	<i>kmGo</i>	Oberer Gipskeuper	1,7·10 ⁻¹¹	5	1,5	0,5 – 3
L7-K2	148	10	<i>kmGo</i>	Oberer Gipskeuper	4,7·10 ⁻¹²	5	0,5	< 1
L7-K3	149	--	<i>kmGo</i>	Oberer Gipskeuper	2,6·10 ⁻⁹	5	1,5	0,5 – 3
L7	(2)	12	<i>kmGo</i>	Oberer Gipskeuper (Salzlager)	1·10 ⁻¹⁴ (3)	0,1 (3)	--	--
L8-K2	150		<i>kmS</i>	Schilfsandstein	2,7·10 ⁻⁸	7,5	2,5	1 – 5
L8-K1	151	14	<i>kmS</i>	Schilfsandstein	1,4·10 ⁻¹¹	2,5	0,5	0,5 – 3
L8-K3	152	15	<i>kmS</i>	Schilfsandstein	7,7·10 ⁻¹⁰	5	3,0	0,5 – 5
L9	(2)	16	<i>kmGu</i>	Unterer Gipskeuper (Tonsteine)	1·10 ⁻¹¹ (3)	5 (3)	--	--
L9	(2)	17	<i>kmGu-Salz</i>	Unterer Gipskeuper (Salzlager)	1·10 ⁻¹⁴ (3)	0,1 (3)	--	--
L10	(2)	18	<i>mm-km</i>	Mittlerer Muschelkalk (Tonsteine)	1·10 ⁻¹¹ (3)	5 (3)	--	--
ALLERTALZONE								
A1-A4	210	19	<i>q</i>	Quartär	Horizontal: 3,2·10 ⁻⁶ Vertikal: 2,1·10 ⁻⁷	12,5 *	12,5	A1: 15 – 20 A2: 5 – 15 A3: 10 – 15 A4: 8 – 12
T1-K1	211	20	<i>q+t</i>	Quartär und Tertiär	9,0·10 ⁻⁷	10 *	10	5 – 15
A5	221	21	<i>kroWAu</i>	Oberkreide, Untere Walbeckerschichten	4,5·10 ⁻⁵	12,5 *	12,5	10 – 15
A6	222	22	<i>kroALo</i>	Oberkreide, obere Alleringerslebener Schichten	2,8·10 ⁻⁶	10	10	8 – 12
A7	223	23	<i>kroALu</i>	Oberkreide, untere Alleringerslebener Schichten	6,0·10 ⁻⁹	7,5	5	5
A8-K1	233	24	<i>j</i>	Jura	8,2·10 ⁻¹⁰	7,5	3	0,5 – 5
A8-K2	234		<i>j</i>	Jura	1,3·10 ⁻⁸	10	3	0,5 – 5
A8-K3 z>mNN	235		<i>j</i>	Jura	5,7·10 ⁻⁸	15	5	--
A9-K1	245		<i>kmSM+ko1</i>	Steinmergelkeuper und Unterrhät	1,6·10 ⁻⁹	7,5	1,5	1 – 5
A9-K2	246	28	<i>kmSM+ko1</i>	Steinmergelkeuper und Unterrhät	4,5·10 ⁻⁸	10	3	1 – 10
A10	247 (1)	29	<i>kmGo</i>	Oberer Gipskeuper	1,3·10 ⁻¹¹ (1)	5	1,5	0,5 – 3
A11	248	30	<i>kmS</i>	Schilfsandstein	6,9·10 ⁻⁹	7,5	3	1 – 5
A12	249	31	<i>kmGu – mu</i>	Unterer Gipskeuper, Unterer Muschelkalk	5,2·10 ⁻¹²	5	1,5	0,5 – 3
A13-K1	271	32	<i>cr (z2-z4)</i>	„intaktes Hutgestein“	5,0·10 ⁻¹¹ R5-09, R5-10: 10 ⁻¹¹	0,25	0,25	0,1 – 1
A13-K1	272	45	<i>cr (z2-z4)</i>	„intaktes Hutgestein“	5,0·10 ⁻¹¹ R5-09, R5-10: 10 ⁻¹¹	0,25	0,25	0,1 – 1
A13-K2	273	33	<i>cr (z2-z4)</i>	Hutgestein, Schichtenfolge DGL	1·10 ⁻⁹	30	25	Fließpor. 11-31 % Gesamtporos. 22-33 %
WEFERLINGER TRIASPLATTE								
T1-K1	310	34	<i>q + t</i>	Quartär und Tertiär	7,3·10 ⁻⁶	10 *	10	5 – 15
A1-A4	311	--	<i>q</i>	Quartär	Horizontal: 1,3·10 ⁻⁵ Vertikal: 1,1·10 ⁻⁷	12,5 *	12,5	A1: 15 – 20 A2: 5 – 15 A3: 10 – 15 A4: 8 – 12
T1-K2	351	--	<i>mu</i>	Deckschichten	5,2·10 ⁻⁸	10	5	3 – 10
T2-K1	361	37	<i>so</i>	Oberer Buntsandstein	4,0·10 ⁻⁷	7,5	2,5	0,5 – 5
T2-K2	362	--	<i>so Gipskarst</i>	Oberer Buntsandstein, Gipskarst	2,9·10 ⁻⁷	7,5	3	0,5 – 5
T3	363	39	<i>smS</i>	Solling-Folge	6,2·10 ⁻⁵	10 *	7,5	5 – 15
T4	364	40	<i>smV</i>	Volpriehausen-Folge	3,5·10 ⁻¹¹	5	2,5	0,5 – 5
T5	365	41	<i>smVS</i>	Volpriehausen-Sandstein	3,5·10 ⁻¹⁰	7,5	7,5	5 – 15
T6	(2)	42	<i>su</i>	Unterer Buntsandstein (Schluff- und Tonsteine mit seltenen Feinsandstein-Einlagerungen)	1·10 ⁻¹¹ (3)	5 (3)	--	--
T7	381	43		NE-Randstörung	2,4·10 ⁻⁸	7,5	5	0,5 – 5

- (1) Im 2D Modell Schnitt 5mod wird die Einheit A10/247/kmGo durch die mit 4,5·10⁻⁸ m/s stärker durchlässige Einheit A9-K2/246/kmSM+ko1 ersetzt (Angleichung von Schnitt 5 an Schnitt 4, vgl. Abbildung 7)
- (2) Einheit nicht im 3D Süßwassermodell enthalten
- (3) Festgelegter Wert
- (4) Effektive Porositäten wie in den 3D Süßwasserrechnungen, Rechenfälle R43 und R44 [10] (Tabellen 4 bis 6), basierend auf [4] Matrixporositäten basierend auf [4]

> 10 ⁻⁷ m/s	Grundwasserleiter
≤ 10 ⁻⁷ bis > 10 ⁻⁹ m/s	Grundwasserhemmer
≤ 10 ⁻⁹ m/s	Grundwassergeringleiter

Tabelle 1 Hydrostratigraphische Einheiten, k_r- und Porositätswerte im 3D Süßwassermodell und in den 2D Salzwassermodellen

Länge der Wegsamkeit entlang DGL/Salzspiegel (Subrosionsrinne)	Auspressrate aus dem Grubengebäude, m ³ /a		
	1	10	30
	spezifische Einpressraten in die Schichtenfolge DGL, m ³ /m·a		
5 m	0,2	2	6
10 m	0,1	1	3
50 m	0,02	0,2	0,6
100 m	0,01	0,1	0,3
200 m	0,005	0,05	0,15
500 m	0,002	0,02	0,06
1000 m	0,001	0,01	0,03

Legende:

	≤ 0,02 m ³ /m·a
	> 0,02 bis 0,2 m ³ /m·a
	> 0,2 bis 1 m ³ /m·a
	> 1 bis 5 m ³ /m·a
	> 5 m ³ /m·a
0,05	3D Süßwasserrechnungen [12]
	2D Salzwasserrechnungen des vorliegenden Berichts

Tabelle 2 Auspressraten aus dem Grubengebäude (m³/a) und spezifische Einpressraten in die Schichtenfolge DGL (m³/m·a)

Rechenfall	Programm	Berechnung	k_f Hutgest.	Bemerkungen
Schnitt 5				
Süßwasserrechnungen				
R44	CGM	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	Darstellung der Potentialverteilung in R44 entlang des Schnittes 5
R5-01	CGM, NAMMU			Süßwasserrechnung mit Vorgabe der Potentialverteilung in R44 entlang des oberen Randes
Salzwasserrechnungen				
R5-02	SoTraCoF	instationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	Anfangssalzverteilung aus einer vereinfachten Salzwasserrechnung Instationäre Rechnung bis Modellzeit 400 ka (quasi-stationärer Zustand)
R5-03				Anfangssalzverteilung aus R5-02 (Modellzeit 190 ka) Erhöhung k_f -Wert T6 von 10^{-11} auf 10^{-10} m/s Instationäre Rechnung bis Modellzeit 300'ka
R5-04				Anfangsbedingungen: (1) Salzverteilung in der Lappwaldscholle und im Allertal aus R5-02 (2) Erhöhung Salzgehalt in T4/364/smV, T5/365/smVS und T6/su auf C=1. Instationäre Rechnung bis Modellzeit 2 Mio. a
R5-05	NAMMU	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	Direkte Berechnung des stationären Zustandes mit Parameter Stepping von D_m . Beginn mit $D_m 7,5 \cdot 10^{-6}$ m ² /s, bei $D_m 1 \cdot 10^{-6}$ m ² /s abgebrochen. Stationäre Rechnung mit Wasserdichte C=1 von 1,050 kg/m ³ . Danach instationär bis Modellzeit 1 Mio. Jahre. Abschluss als stationäre Rechnung
Salzwasserrechnungen mit Auspressung aus dem Grubengebäude				
R5-06	NAMMU	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	spez. Einpressrate 0,02 m ³ /m·a
R5-07				spez. Einpressrate 0,2 m ³ /m·a
R5-08				spez. Einpressrate 1 m ³ /m·a
R5-09				spez. Einpressrate 0,02 m ³ /m·a
R5-10			spez. Einpressrate 0,2 m ³ /m·a	
R5-10			10^{-11} m/s	
Schnitt 5mod				
Süßwasserrechnungen				
R5mod-01	CGM, NAMMU	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	
Salzwasserrechnung ohne Einpressung				
R5mod-02	NAMMU	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	k_f Keuper modifiziert
Salzwasserrechnung mit Einpressung				
R5mod-03	NAMMU	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	k_f Keuper modifiziert, spez. Einpressrate 0,02 m ³ /m·a
Schnitt 6				
R44	CGM	stationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	Darstellung der Potentialverteilung in R44 entl. von Schnitt 6
R6-01				Süßwasserrechnung mit Vorgabe der Potentialverteilung in R44 entlang des oberen Randes
R6-02	SoTraCoF	instationär	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	Anfangssalzverteilung aus einer vereinfachten Salzwasserrechnung Instationäre Rechnung bis Modellzeit 79 ka (quasi-stationärer Zustand)

Tabelle 3 Überblick über die mit den 2D Modellen Schnitt 5, Schnitt 6 und Schnitt 5mod durchgeführten Süß- und Salzwasserrechnungen

2D Modell Schnitt 5 – Stationäre Süßwasserrechnungen			
Rechenfall	R5-01		
Typ der Rechnung	Süßwasser stationär		
Rechenprogramm	CGM, NAMMU 6.3		
Hydraulische Parameter	k _f -Werte nach Tabelle 1		
	Porosität gemäß Tabelle 1		
	spezifische Speicherkapazität S _s = 1·10 ⁻⁶ m ⁻¹		
Randbedingungen	Hydraulisch <ul style="list-style-type: none"> • Oberer Rand: Vorgegebene Potentialverteilung (Festpotential, Dirichlet-Randbedingung) aus 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44) • seitliche Ränder und Modellbasis: undurchlässig 		
2D Modell Schnitt 5 – Instationäre Salzwasserrechnungen			
Rechenfall	R5-02	R5-03	R5-04
Typ der Rechnung	Salzwasser		
Rechenprogramm	SoTraCoF 3.01		
Hydraulische Parameter	k _f -Werte gemäß Tabelle 1	k _f -Wert von T6 von 10 ⁻¹¹ auf 10 ⁻¹⁰ m/s erhöht	k _f -Werte gemäß Tabelle 1
	Porosität gemäß Tabelle 1		
	spezifische Speicherkapazität S _s = 1·10 ⁻⁶ m ⁻¹		
Transportparameter	molekulare Diffusion D _m = 5·10 ⁻¹⁰ m ² /s		
	longitudinuale Dispersionslänge α _L = 30 m		
	Transversale Dispersionslänge α _T = 3 m		
	Viskosität μ = 1·10 ⁻³ Pa·s		
Numerische Parameter	ρ ₀ = 1000 kg/m ³ dp/dC = 200 kg/m ³ (Veränderungsfaktor Wasserdichte) Lineare numerische Interpolation von p und C Diskontinuierliche Geschwindigkeitsberechnung an Elementgrenzen		
	Formulierung des Salztransports		
	Boussinesq extended und Boussinesq	Boussinesq extended	Boussinesq
	Genauigkeit		
	10 ⁻⁶ / 10 ⁻¹⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
Randbedingungen	Hydraulisch <ul style="list-style-type: none"> • Oberer Rand: Vorgegebene Potentialverteilung (Festpotential, Dirichlet-Randbedingung) aus 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44 • seitliche Ränder und Modellbasis: undurchlässig 		
	Transport <ul style="list-style-type: none"> • Vorgeschiedene maximale Salzkonzentration C=1 (279 g/l, SoTraCoF) entlang der Modellbasis (Salzspiegel im Lappwald, Allertal und im Randgebiet der Triasplatte) sowie entlang der Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper • seitliche Ränder: undurchlässig • Oberer Rand: Advektiver Salzaustrag möglich, kein Austritt durch Diffusion/Dispersion 		
	Anfangsbedingung der Salzverteilung im Modellraum		
	Anfangssalzverteilung aus einer vereinfachten Salzwasserrechnung	Salzverteilung R5-02, Modellzeit 190'000 a	Salzverteilung – Lappwald und Allertal: wie R5-02 (190 ka) – Triasplatte: C=1 unterhalb Solling-Folge

Tabelle 4 2D Modell Schnitt 5. Parameter und Randbedingungen der Süßwasser- (Programme CGM, NAMMU 6.3) (oben) und der Salzwasserrechnungen (Programm SoTraCoF) (unten)

2D Modell Schnitt 5 – Stationäre Salzwasserrechnungen						
Rechenfall	R5-05	R5-06	R5-07	R5-08	R5-09	R5-10
Typ der Rechnung	Salzwasser					
Rechenprogramm	NAMMU 6.3					
Hydraulische Parameter	k _r -Werte gemäß Tabelle 1				k _r -Wert des Hutgesteins von 5·10 ⁻¹¹ m/s auf 10 ⁻¹¹ m/s verringert	
	Porosität gemäß Tabelle 1					
	spezifische Speicherkapazität S _s = 1·10 ⁻⁶ m ⁻¹					
Einpressrate, m ³ /a·m ²	--	0,02	0,2	1,0	0,02	0,2
Transportparameter	molekulare Diffusion D _m = 5·10 ⁻¹⁰ m ² /s longitudinale Dispersionslänge α _L = 30 m transversale Dispersionslänge α _T = 3 m Viskosität μ = 1·10 ⁻³ Pa·s					
Numerische Parameter	ρ ₀ = 1000 kg/m ³ dp/dC = 200 kg/m ³ (Veränderungsfaktor Wasserdichte) Annähernd lineare numerische Interpolation von p und C Diskontinuierliche Geschwindigkeitsberechnung an Elementgrenzen Volle Formulierung des Salztransports Direkter Löser 10 ⁻²⁰ Genauigkeit relativer Änderungen 10 ⁻⁸					
Randbedingungen	Hydraulisch					
	<ul style="list-style-type: none"> • Oberer Rand: Vorgegebene Potentialverteilung (Festpotential, Dirichlet-Randbedingung) aus 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44) • seitliche Ränder und Modellbasis: undurchlässig 					
	Transport					
	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgeschiedene maximale Salzkonzentration C=1 (≙ 311 g/l in NAMMU) entlang der Modellbasis (Salzspiegel im Lappwald, Allertal und im Randgebiet der Triasplatte) sowie entlang der Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper • seitliche Ränder: undurchlässig • Oberer Rand: Advektiver Salzaustrag möglich, Austritt durch Diffusion/Dispersion (dC/dz) =0 					
Anfangsbedingung der Salzverteilung im Modellraum						
Süßwasser		Salzverteilung aus R5-05				

Tabelle 5 Parameter und Randbedingungen der mit dem Programm NAMMU mit dem 2D Modell Schnitt 5 ausgeführten Salzwasserrechnungen

2D Modell Schnitt 5mod – Stationäre Süßwasserrechnung	
Rechenfall	R5mod-01
Typ der Rechnung	Süßwasser stationär
Rechenprogramm	CGM, NAMMU 6.3
Hydraulische Parameter	k_f -Werte nach Tabelle 1 und Erhöhung des k_f -Wertes der Modellschicht A10/247/kmGo ($1,3 \cdot 10^{-11}$ m/s) auf den Wert der Einheit A9-K2/246/kmSM+ko1 mit $4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s k_f Hutgestein = $5 \cdot 10^{-11}$ m/s Porosität gemäß Tabelle 1 spezifische Speicherkapazität $S_s = 1 \cdot 10^{-6} m^{-1}$
Randbedingungen	Hydraulisch <ul style="list-style-type: none"> • Oberer Rand: Vorgegebene Potentialverteilung (Festpotential, Dirichlet-Randbedingung) aus 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44) • seitliche Ränder und Modellbasis: undurchlässig

2D Modell Schnitt 5mod – Stationäre Salzwasserrechnungen		
Rechenfall	R5mod-02	R5mod-03
Typ der Rechnung	Salzwasser, stationär	
Rechenprogramm	NAMMU 6.3	
Hydraulische Parameter	k_f -Werte gemäß Tabelle 1, k_f A10/247/kmGo modifiziert (s. R5mod-01) Porosität gemäß Tabelle 1 spezifische Speicherkapazität $S_s = 1 \cdot 10^{-6} m^{-1}$	
Einpressrate, $m^3/a \cdot m^2$	--	0,02
Transportparameter	molekulare Diffusion $D_m = 5 \cdot 10^{-10} m^2/s$ longitudinale Dispersionslänge $\alpha_L = 30$ m transversale Dispersionslänge $\alpha_T = 3$ m Viskosität $\mu = 1 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$	
Numerische Parameter	$\rho_o = 1000 kg/m^3$ $dp/dC = 200 kg/m^3$ (Veränderungsfaktor Wasserdichte) Annähernd lineare numerische Interpolation von p und C Diskontinuierliche Geschwindigkeitsberechnung an Elementgrenzen Volle Formulierung des Salztransports Direkter Löser 10^{-20} Genauigkeit relativer Änderungen 10^{-8}	
Randbedingungen	Hydraulisch <ul style="list-style-type: none"> • Oberer Rand: Vorgegebene Potentialverteilung (Festpotential, Dirichlet-Randbedingung) aus 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44) • seitliche Ränder und Modellbasis: undurchlässig 	
	Transport	
	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgeschriebene maximale Salzkonzentration $C=1$ ($\triangleq 311$ g/l in NAMMU) entlang der Modellbasis (Salzspiegel im Lappwald, Allertal und im Randgebiet der Triasplatte) sowie entlang der Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper • seitliche Ränder: undurchlässig • Oberer Rand: Advektiver Salzaustrag möglich, Austritt durch Diffusion/Dispersion ($dC/dz = 0$) 	
	Anfangsbedingung der Salzverteilung im Modellraum	
	Süßwasser	Salzverteilung aus R5mod-02

Tabelle 6 2D Modell Schnitt 5mod. Parameter und Randbedingungen der durchgeführten Süßwasser- (Programme CGM, NAMMU) und Salzwasserrechnungen (Programm NAMMU)

Rechenfall	R6-01	R6-02
Typ der Rechnung	Süßwasser	Salzwasser
Rechenprogramm	CGM	SoTraCoF 3.01
Hydraulische Parameter	k _r -Werte gemäß Tabelle 1	
	Porosität gemäß Tabelle 1	
	spezifische Speicherkapazität S _s = 1·10 ⁻⁶ m ⁻¹	
Transport-Parameter	molekulare Diffusion D _m = 5·10 ⁻¹⁰ m ² /s	
	longitudinale Dispersionslänge α _L = 30 m	
	transversale Dispersionslänge α _T = 3 m	
	Viskosität μ 1·10 ⁻³ Pa·s	
Numerische Parameter	ρ ₀ = 1000 kg/m ³ dp/dC = 200 kg/m ³ (Veränderungsfaktor Wasserdichte) Lineare numerische Interpolation von p und C Diskontinuierliche Geschwindigkeitsberechnung an Elementgrenzen	
	Formulierung des Salztransports: Boussinesq	
	Genauigkeit: 10 ⁻⁶ / 10 ⁻¹⁶	
Randbedingungen	Hydraulisch: <ul style="list-style-type: none"> • Oberer Rand: Vorgegebene Potentialverteilung (Festpotential, Dirichlet-Randbedingung) aus 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44) • seitliche Ränder und Modellbasis: undurchlässig 	
		Transport <ul style="list-style-type: none"> • Vorgeschriebene maximale Salzkonzentration C=1 (≙ 279 g/l in SoTraCoF) entlang der Modellbasis (Salzspiegel im Lappwald, Allertal und im Randgebiet der Triasplatte) sowie entlang der Salzlager im Oberen und Unteren Gipskeuper • Seitliche Ränder: undurchlässig • Oberer Rand: Advektiver Salzaustrag möglich, Austritt durch Diffusion/Dispersion (dC/dz = 0)
		Anfangsbedingung der Salzverteilung aus einer vereinfachten Salzwasserrechnung

Tabelle 7 2D Modell Schnitt 6. Parameter und Randbedingungen der mit dem Programm CGM durchgeführten Süßwasser- und der mit dem Programm SoTraCoF durchgeführten Salzwasserrechnungen

RECHNUNGEN ZU DEN VERHÄLTNISSEN OHNE DIE HEUTIGEN ENTNAHMEN AUS FÖRDERBRUNNEN						
Rechenfall	k_f Hutgestein, m/s	spez. Einpressrate, $m^3/m \cdot a$	Modellzeit, Jahre	Salzmasse, t	Bemerkungen	
2D Modell Schnitt 5						
R5-01	$5 \cdot 10^{-11}$	ohne Einpressung	Stationär	0	Süßwasserrechnung zur Überprüfung der hydraulischen Randbedingungen	
R5-02			0	$\approx 11'400$	Anfangsbedingung, instationäre Rechnung	
			10'600	11'260	Instationäre Rechnung	
			109'000	10'600		
			200'000	10'470		
			300'000	10'380		
			400'000	10'350		
			500'000	10'375		
			1'000'000	10'575		
			3'000'000	10'965		
R5-03			190'000	10'500		Erhöhung $k_f T_6$ auf 10^{-10} m/s
			300'000	10'580		Anfangsbedingung aus R5-02, 190 ka
R5-04			0	38'400	Anfangsbedingung: (a) Lappwald und Allertal: aus R5-02, instationäre Rechnung Modellzeit 190 ka (b) Triasplatte: C=1 unterhalb Solling-Folge	
			100'000	33'600	Instationäre Rechnung Phasen A und B, Genauigkeit 10^{-6}	
			500'000	28'500		
			700'000	27'000		
			1'000'000	24'900		
			2'000'000	20'400		
			2'500'000	18'900		
R5-05			Stationär	10'815	Phase A: Stationäre Rechnung mit Wasserdichte 1050 kg/m^3 für C=1	
	100'000	10'980	Phase B: Instationäre Rechnung			
	1'000'000	11'430				
	Stationär	12'010	Phase C: Stationäre Rechnung			
2D Modell Schnitt 6						
R6-01	$5 \cdot 10^{-11}$	ohne Einpressung	Stationär	0	Süßwasserrechnung zur Überprüfung der hydraulischen Randbedingungen	
R6-02			0	$\approx 9'600$	Anfangsbedingung, instationäre Rechnung	
			17'800	10'240	Instationäre Rechnung, Phase A, Genauigkeit 10^{-6}	
			34'600	10'310	Phase B, Genauigkeit 10^{-6}	
			78'500	10'430	Phase C, Genauigkeit 10^{-6}	
			78'700	10'435	Phase D mit Genauigkeit 10^{-16}	
RECHNUNGEN ZUR AUSPRESSUNG AUS DEM GRUBENGEBÄUDE						
Rechenfall	k_f Hutgestein, m/s	spezifische Einpressrate, $m^3/m \cdot a$	Modellzeit, Jahre	Salzinhalt / Differenz zu R5-05, t	Bemerkung	
2D Modell Schnitt 5						
R5-01	$5 \cdot 10^{-11}$	--	stationär	0		
R5-05		--		12'010		
R5-06		0,02		12'820 / 810		
R5-07		0,2		14'940 / 2'930		
R5-08		1		16'475 / 4'465		
R5-09	10^{-11} m/s	0,02	stationär	13'255 / 1'245		
R5-10		0,2		15'510 / 3'000		
2D Modell Schnitt 5mod						
R5mod-01	$5 \cdot 10^{-11}$ m/s	--	stationär	0	k_f der Einheit A10/247/kmGo von $1,3 \cdot 10^{-11}$ auf den Wert von A9-K2/246/kmSM+ko1 ($4,5 \cdot 10^8$ m/s) erhöht (= Angleichung an Schnitt 4) mit mächtigem Steinmergelkeuper	
R5mod-02		--		11'255 / -755		
R5mod-03		0,02		11'410 / -600		

Definition des Salzinhaltes im 2D Schnitt: t pro Meter Modell"dicke"

Tabelle 8 Salzmasse in den 2D Modellen

Rechenfall	spezifische Einpressrate an Basis DGL	Süßwasserdruckspiegelhöhe, mNN		Differenz der Süßwasserdruckspiegelhöhen zwischen Basis und Top DGL
	m ³ /m·a	Basis DGL	Top DGL	m
2D Modell Schnitt 5, k_f Hutgestein 5·10⁻¹¹ m/s				
R5-01 (Süßwasser)	--	116,2	119,4	-3,2
R5-05	--	125,9	119,7	6,2
R5-06	0,02	151,8	118,2	33,6
R5-07	0,2	245,2	126,5	118,7
R5-08	1	648,4	149,9	498,5
2D Modell Schnitt 5, k_f Hutgestein 10⁻¹¹ m/s				
R5-09	0,02	166,5	119,0	47,5
R5-10	0,2	371,9	130,9	241,0
2D Modell Schnitt 5_mod, k_f Hutgestein 5·10⁻¹¹ m/s				
R5mod-01 (Süßwasser)	--	112,3	110,7	1,6
R5mod-02	--	121,1	110,9	10,2
R5mod-03	0,02	145,2	111,6	33,6

Tabelle 9 Wasserdruck (ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe) an der Basis und am Top der Schichtenfolge DGL in den stationären NAMMU-Rechnungen

Rechenfall	spezifische Einpressrate an Basis DGL		Fluss am Top der Schichtenfolge DGL		Anteil des Abflusses am Top DGL an der Einpressrate Basis DGL
	m ³ /m·a	l/m·a	m ³ /m·a	l/m·a	
2D Modell Schnitt 5, k_r Hutgestein 5·10⁻¹¹ m/s					
R5-01 (Süßwasser)	--	--	-1,44·10 ⁻³ ↓	-1,44 ↓	--
R5-05	--	--	-1,19·10 ⁻³ ↓	-1,19 ↓	--
R5-06	0,02	20	0,54·10 ⁻³ ↑	0,54 ↑	2,7 %
R5-07	0,2	200	1,27·10 ⁻² ↑	12,7 ↑	6,4 %
R5-08	1	1'000	6,61·10 ⁻² ↑	66,1 ↑	6,6 %
2D Modell Schnitt 5, k_r Hutgestein 10⁻¹¹ m/s					
R5-09	0,02	20	3,33·10 ⁻³ ↑	3,33 ↑	17 %
R5-10	0,2	200	4,6·10 ⁻² ↑	46,0 ↑	23 %
2D Modell Schnitt 5_mod, k_r Hutgestein 5·10⁻¹¹ m/s					
R5mod-01 (Süßwasser)	--	--	6,6·10 ⁻⁴ ↑	0,66 ↑	--
R5mod-02	--	--	4,0·10 ⁻⁴ ↑	0,40 ↑	--
R5mod-03	0,02	20	4,8·10 ⁻⁴ ↑	0,48 ↑	2,4 %

+ aufwärts gerichteter Fluss ↑
 - abwärts gerichteter Fluss ↓

Tabelle 10 Wasserfluss am Top der Schichtenfolge DGL - am Kontakt zu A11/248/kmS Schilfsandstein – in den stationären NAMMU-Rechnungen

Rechenfall	n (1)	Pfadtyp <i>i</i>			Pfadtyp <i>ii</i>			Pfadtyp <i>iii</i>		
		n	Mittel	Bandbreite	n	Mittel	Bandbreite	n	Mittel	Bandbreite
Pfadlängen, m										
2D Modell Schnitt 5, k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s										
R5-01	29	29	720	670–820	--	--	--	--	--	--
R5-05	15	15	990	880–1060	--	--	--	--	--	--
R5-06	19	11	930	820–1'000	8	1'490	1'100–1'750	--	--	--
R5-07	30	11	580	510–650	--	--	--	19	2'070	2'010–2'140
R5-08	31	15	540	450–640	--	--	--	16	2'220	2'180–2'310
2D Modell Schnitt 5, k_f Hutgestein 10^{-11} m/s										
R5-09	12	4	720	710–740	8	800	750–930	(2)	--	--
R5-10	25	4	570	520–620	2	730	690–780	19	2'150	2'060–2'220
2D Modell Schnitt 5_mod, k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s										
R5mod-01	30	--	--	--	30	490	460–520	--	--	--
R5mod-02	nicht ermittelt									
R5mod-03	31	4	960	910–990	27	1'010	830–1'110	--	--	--
Fließzeiten, Jahre										
2D Modell Schnitt 5, k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s										
R5-01	29	29	93'700	52'700–175'000	--	--	--	--	--	--
R5-05	15	15	206'800	79'800–470'100	--	--	--	--	--	--
R5-06	19	11	43'000	9'200–78'200	8	229'300	131'400–299'100	--	--	--
R5-07	30	11	2'260	1'130–4'470	--	--	--	19	58'200	36'300–86'600
R5-08	31	15	1'130	680–2'320	--	--	--	16	21'200	13'000–33'800
2D Modell Schnitt 5, k_f Hutgestein 10^{-11} m/s										
R5-09	12	4	39'200	22'400–46'300	8	199'500	182'700–223'300	(2)	--	--
R5-10	25	4	2'100	2'000–2'180	2	57'700	54'100–61'300	19	41'100	24'600–60'300
2D Modell Schnitt 5_mod, k_f Hutgestein $5 \cdot 10^{-11}$ m/s										
R5mod-01	30	--	--	--	30	153'300	141'100–196'900	--	--	--
R5mod-02	nicht ermittelt									
R5mod-03	31	4	85'100	17'600–113'700	27	81'600	25'100–996'100	--	--	--

(1) Anzahl Trajektorien der 31 Startpunkte A und B, die den oberen Rand erreichen.

(2) abgebrochen

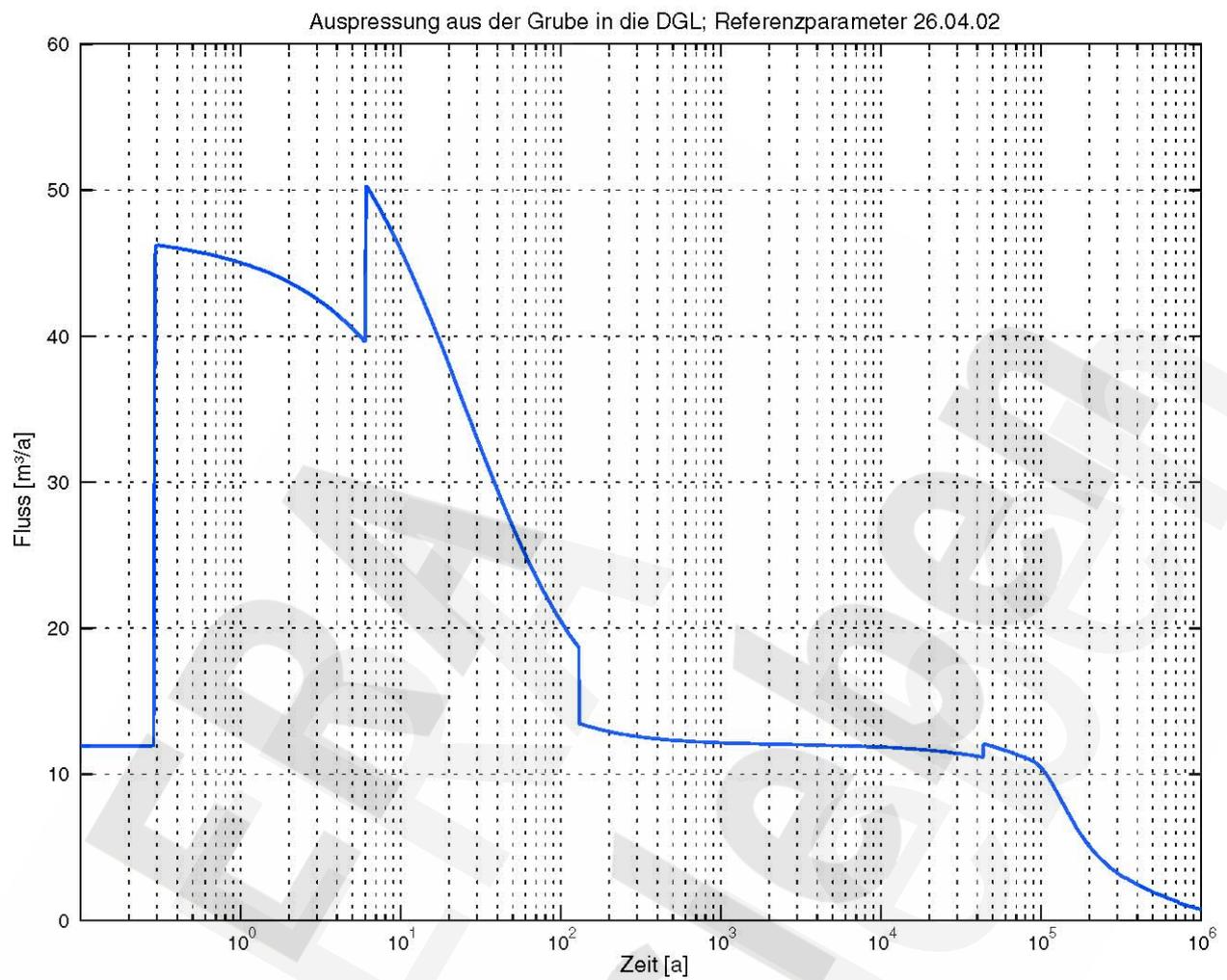
Tabelle 11 Alle NAMMU-Rechenfälle, Trajektorienrechnungen. Gruppierung der Fließwege, Pfadlängen und Fließzeiten

Einheit / K-Klasse 2D Modelle	Grundwasserdichte, kg/m ³			Bemerkungen
	Messwerte	Rechenwerte		
	[4] (Anlage 7.1.1, Blatt 8 bis 10)	2D Modell Schnitt 5 R5-02	2D Modell Schnitt 6 R6-02	
A – Lappwaldscholle				
L1/131/ <i>jusi,juhe</i>	geringe Werte 1,000-1,003	in Schnitt nicht enthalten		R5-02: Berechnete Werte geringer als Messwerte. Grund: zu wenig Auslauf im Lappwald (Modellgrenze) R6-02: Berechnete Werte in L3 bis L5 deutlich höher. Auswirkungen der Modellgeometrie, d.h. der die Salzlager des kmGo versetzenden Störungen
L2/132/ <i>juhe,ko3c</i>		1,0	1,0 - 1,0008	
L3/142/ <i>ko2b</i>		1,0	1,0 - 1,006	
L4/143/ <i>koM</i>		1,0	1,0 - 1,011	
L5/144, 145/ <i>ko1</i>		1,0 - 1,0012	1,0 - 1,02	
L6/146/ <i>kmSM</i>	1,0 – 1,034	1,0 - 1,02	1,0 - 1,2	R5-02: Berechnete Werte den Messwerten sehr ähnlich R6-02: Berechnete Werte höher als Messwerte, Auswirkung der Modellgeometrie (s. oben)
L8/150,151,152/ <i>kmS</i>	keine Werte	1,08 – 1,2	1,0 - 1,2	--
Bereich der SW-Randstörung = Übergang Lappwald-Allertal				
SW-L3a/141/ <i>koGl</i>	1,0 – 1,067	in Schnitt nicht enthalten	1,0 - 1,001	R6-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer.
SW-L6/146/ <i>kmSM</i>	1,0 – 1,035	1,0 - 1,02	1,0 - 1,008	R5-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer. R6-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer.
SW-L8/150,151,152/ <i>kmS</i>	1,015 - 1,035	1,04 – 1,2	1,0 - 1,2	R5-02: Bandbreite der Rechenwerte oberhalb jener der Messwerte R6-02: Bandbreite der Rechenwerte deutlich größer als jene der Messwerte
Allertalzone				
A1-A4/210/ <i>q</i>	1,0 – 1,045	1,0	1,0	R5-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer. R6-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer.
A5/221/ <i>kroWAu</i>		in Schnitt nicht enthalten	1,0	--
A9/245,246/ <i>kmSM+ko1</i>		1,0 - 1,002 (245 nicht in Schnitt enthalten)	1,0 – 0,001	R5-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer. R6-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer.
A11/248/ <i>kmS</i>	--	1,0 – 1,006	in Schnitt nicht enthalten	--
A12/249/ <i>kmGu-mu</i>	--	1,075 – 1,2	in Schnitt nicht enthalten	--
A6+A7/222, 223/ <i>kroALo, kroALu</i>	1,0 – 1,030	1,0 - 1,002	1,0 - 1,0008	R5-02, R6-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer.
A13/271,272,273/ <i>intaktes Hutgestein, DGL</i>	1,001 – 1,2	1,0 - 1,2	1,0 - 1,2	--
Triasplatte				
T7/381/ <i>NE-Randstörung</i>	1,0 – 1,002	1,0 - 1,2	1,0 – 1,2	R5-02, R6-02: Markant höhere Bandbreite der Rechenwerte als jene der Messwerte
T2/361,362/ <i>so</i>	1,0	1,0	1,0 – 1,0006	--
T3/363/ <i>smS</i>	1,0 – 1,011	1,0 - 1,002	1,0 – 1,0012	R5-02, R6-02: Rechenwerte innerhalb Bandbreite Messwerte, jedoch geringer.

Tabelle 12 Vergleich der Messwerte der Wasserdichte mit den Rechenwerten in R5-02 und R6-02

11 Abbildungen

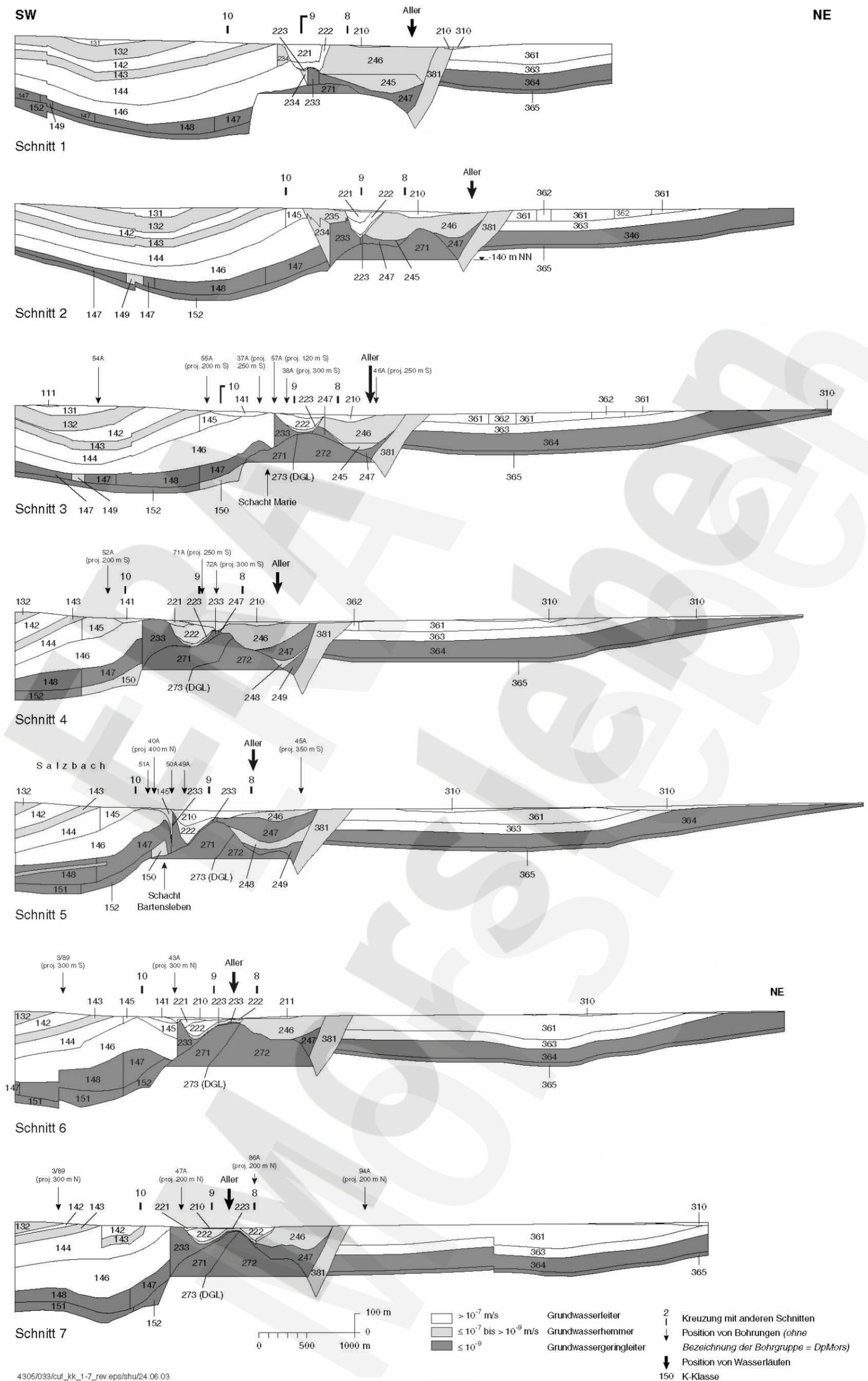
ERA
ERA
Morsleben



4305/033/einpress/q_dgl.eps/shu/04.09.02

Ref. [13]

Abbildung 1 Auspressung aus der Grube in die DGL, Referenzfall



4305/033/cut_kk_1-7_rev.eps/shu/24.06.03

Abbildung 2 3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 1 bis 7 quer zum Allertal, K-Klassen siehe Tabelle 1.

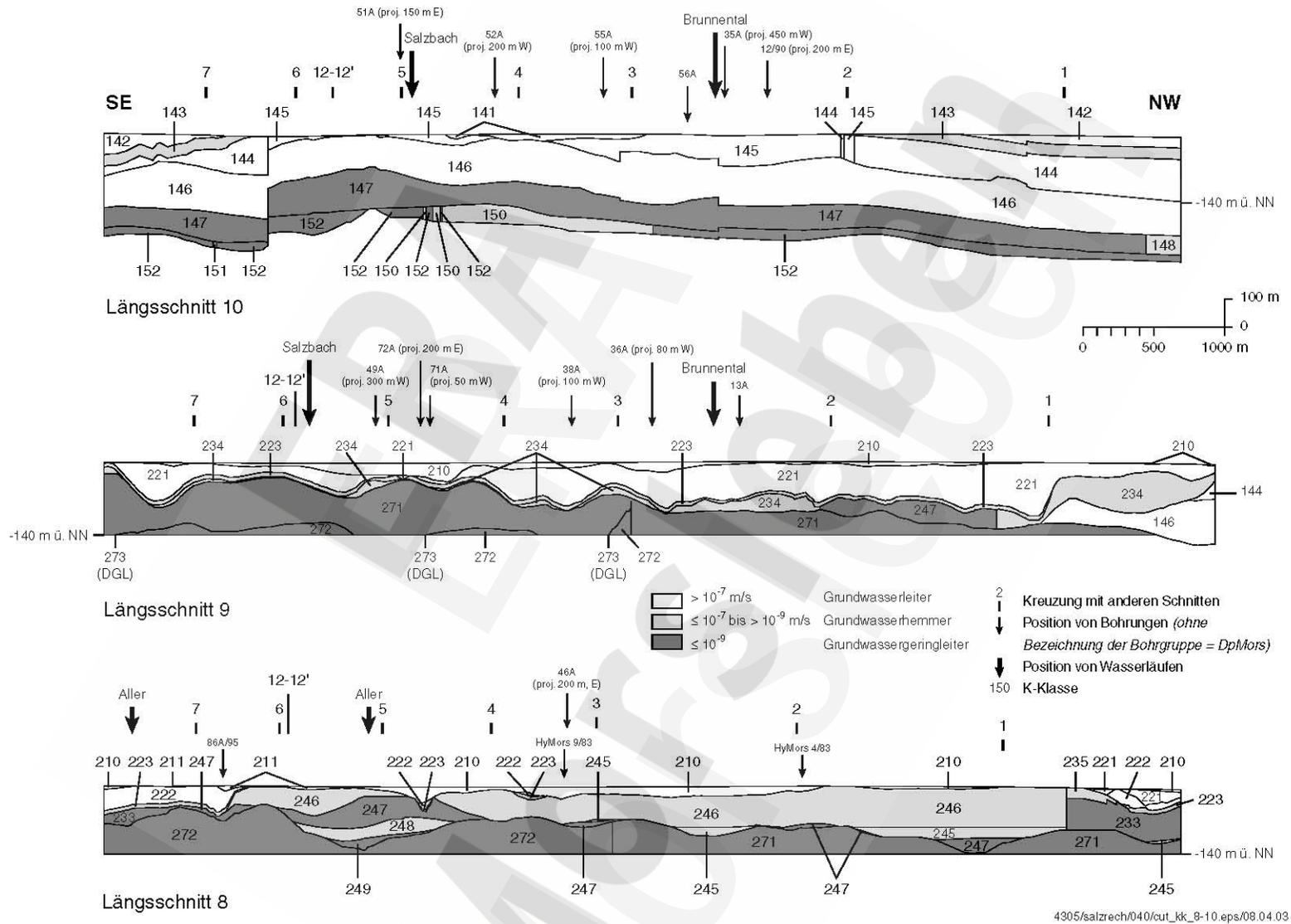


Abbildung 3 3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 8 bis 10 längs des Allertals, K-Klassen siehe Tabelle 1

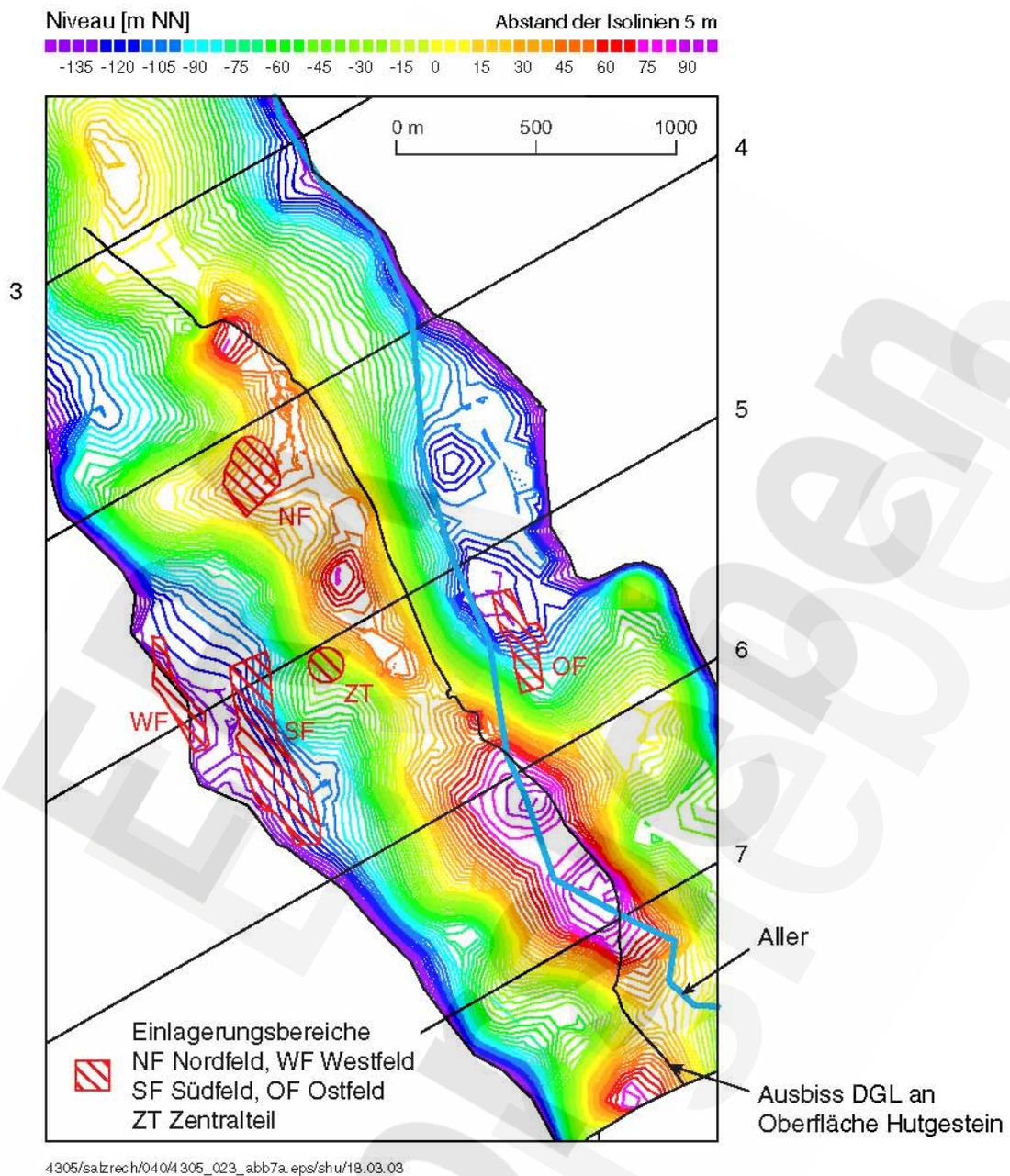
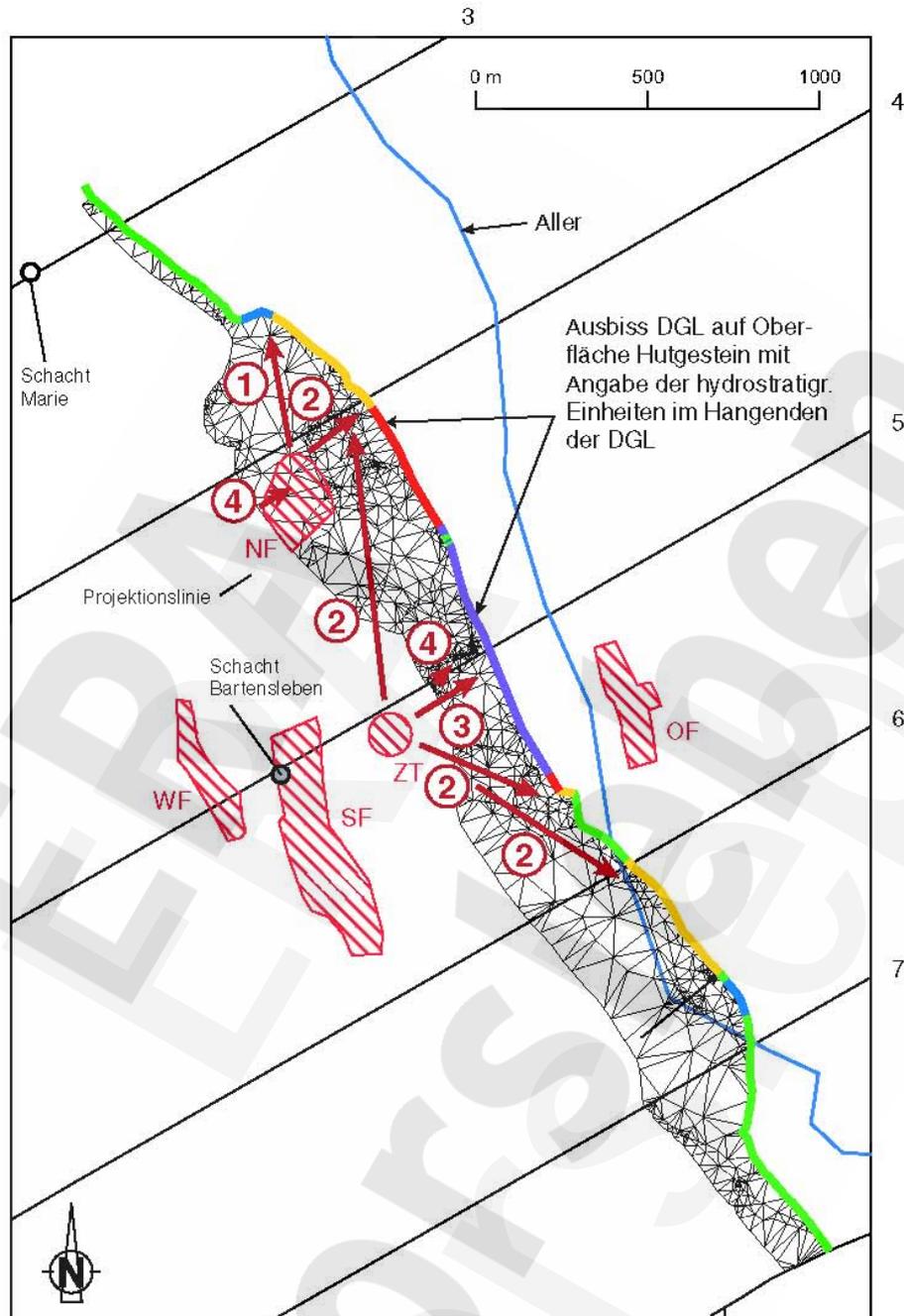


Abbildung 4 3D Süßwassermodell ERAM: Topographie der Oberfläche des Hutgesteins mit Ausbisslinie DGL und Position der Aller



K-Klassen

- A7/223/kroAlu: $6,0 \cdot 10^{-9}$ m/s
- A8-K1/233/Jura: $8,2 \cdot 10^{-10}$ m/s
- A9-K2/246/kmSM+ko1: $4,5 \cdot 10^{-8}$ m/s
- A10/247/kmGo: $1,3 \cdot 10^{-11}$ m/s
- A11/248/kmS: $6,9 \cdot 10^{-9}$ m/s

- ▨ Einlagerungsbereiche
- NF Nordfeld, WF Westfeld
- SF Südfeld, OF Ostfeld
- ZT Zentralteil

- ① Austragsweg

4305/salzrech/040/ausbiss_2_eps/shu/21.03.03

Abbildung 5 3D Süßwassermodell ERAM: Position der Aller, Ausbisslinie DGL an der Oberfläche des Hutgestein und K-Klassen der Einheiten, die die Ausbisslinie DGL überlagern

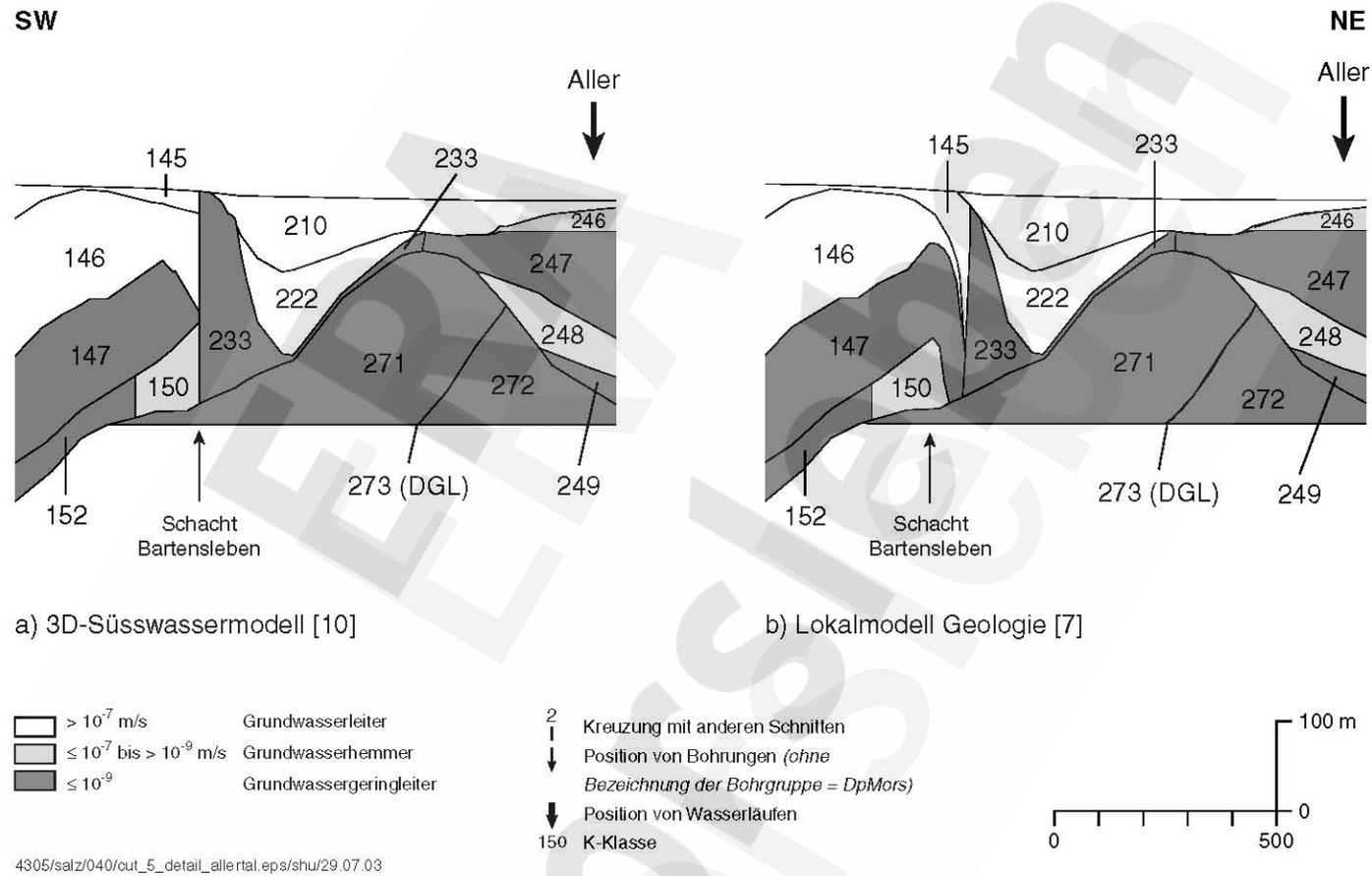


Abbildung 6 Nahbereich Schacht Bartensleben in Schnitt 5 durch das 3D Süßwassermodell [10] und gemäß Lokalmodell Geologie [7]

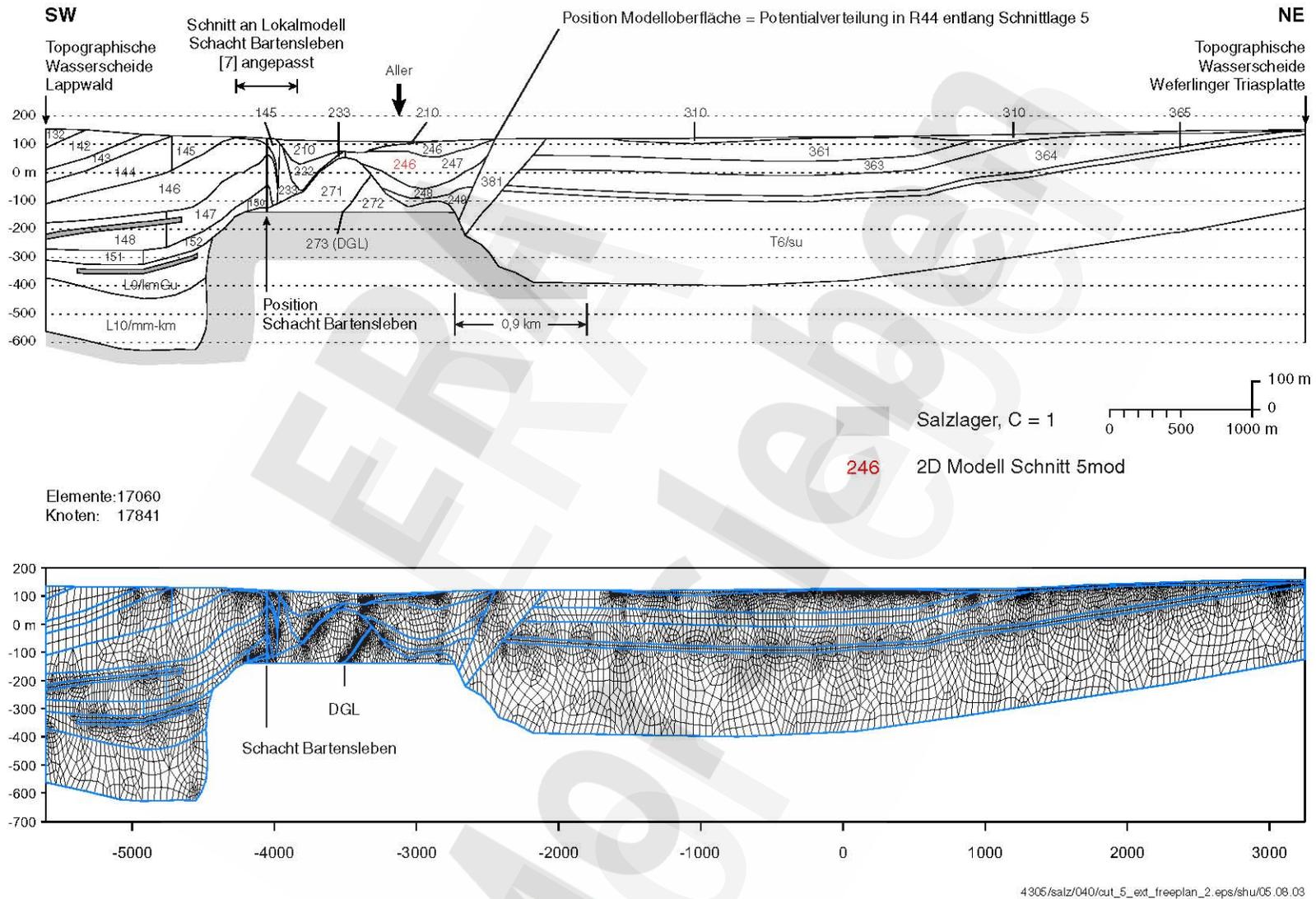


Abbildung 7 2D Modelle Schnitt 5 und Schnitt 5mod. Hydrogeologischer Aufbau (oben), 2D Modell (unten)

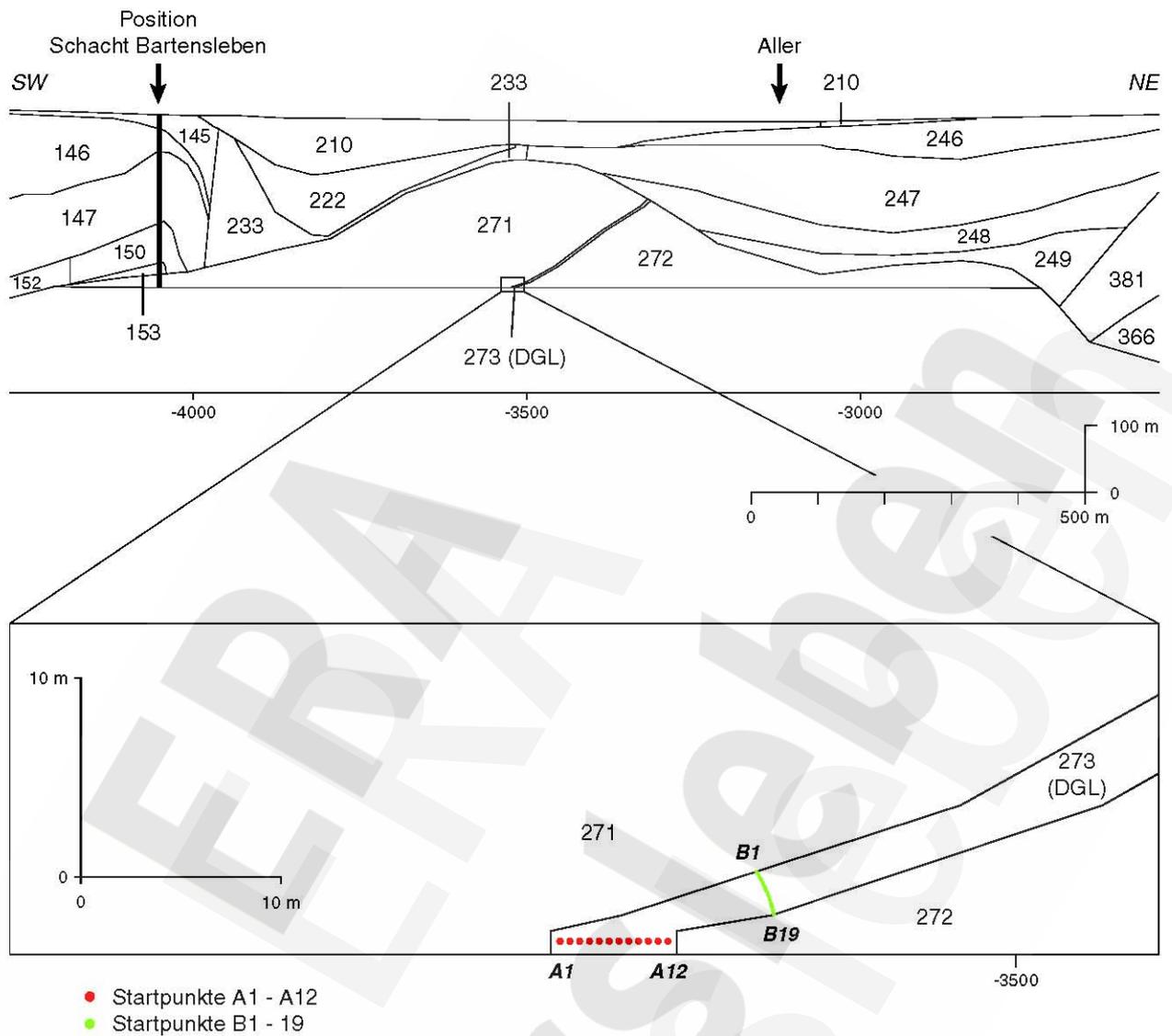
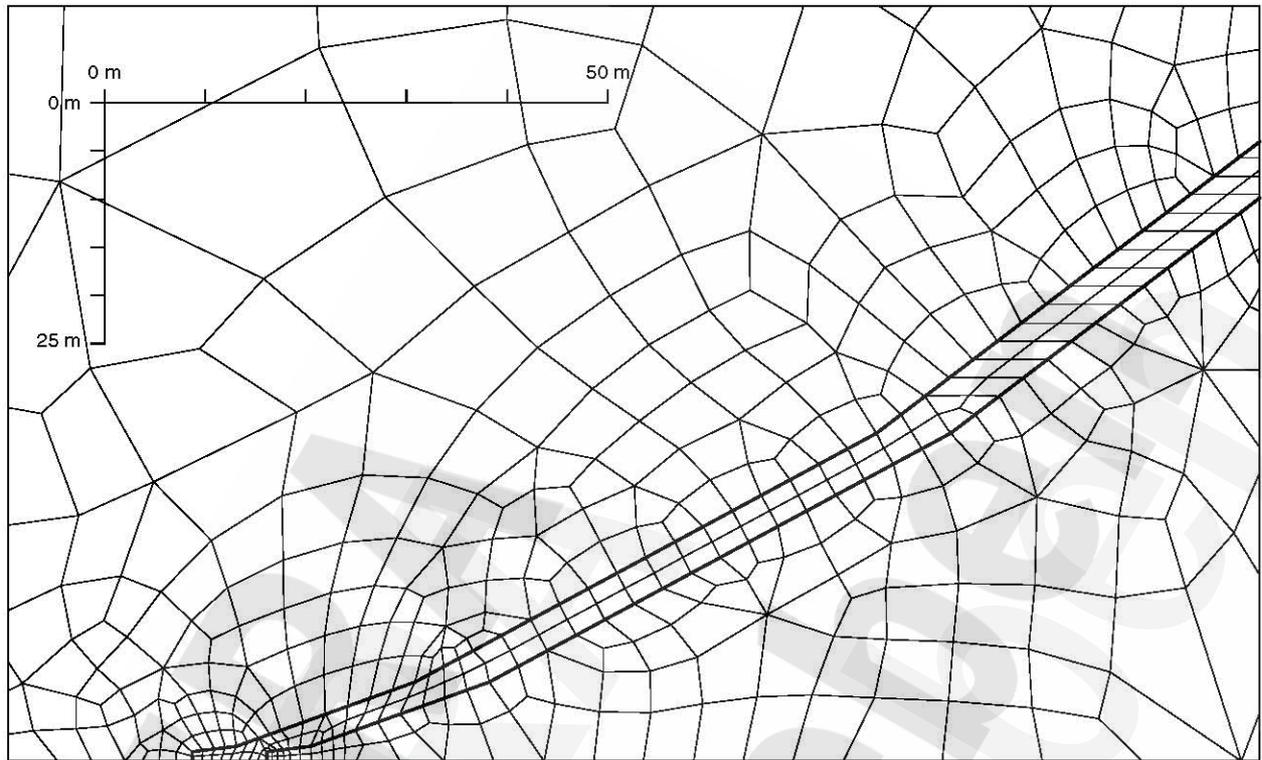


Abbildung 9 Trajektorienrechnungen. Startpunkte A1 bis A12 im Gebiet der Einpressung 0,7 m oberhalb der Basis der Schichtenfolge DGL; Startpunkte B1 bis B19 über der gesamten Breite der Schichtenfolge DGL, 2,1 m bis 4,1 m oberhalb des Salzspiegels



4305/salz/diskretisierung_DGL.eps/shu/29.07.03

Abbildung 10 Diskretisierung der Schichtenfolge DGL im 2D Modell Schnitt 5

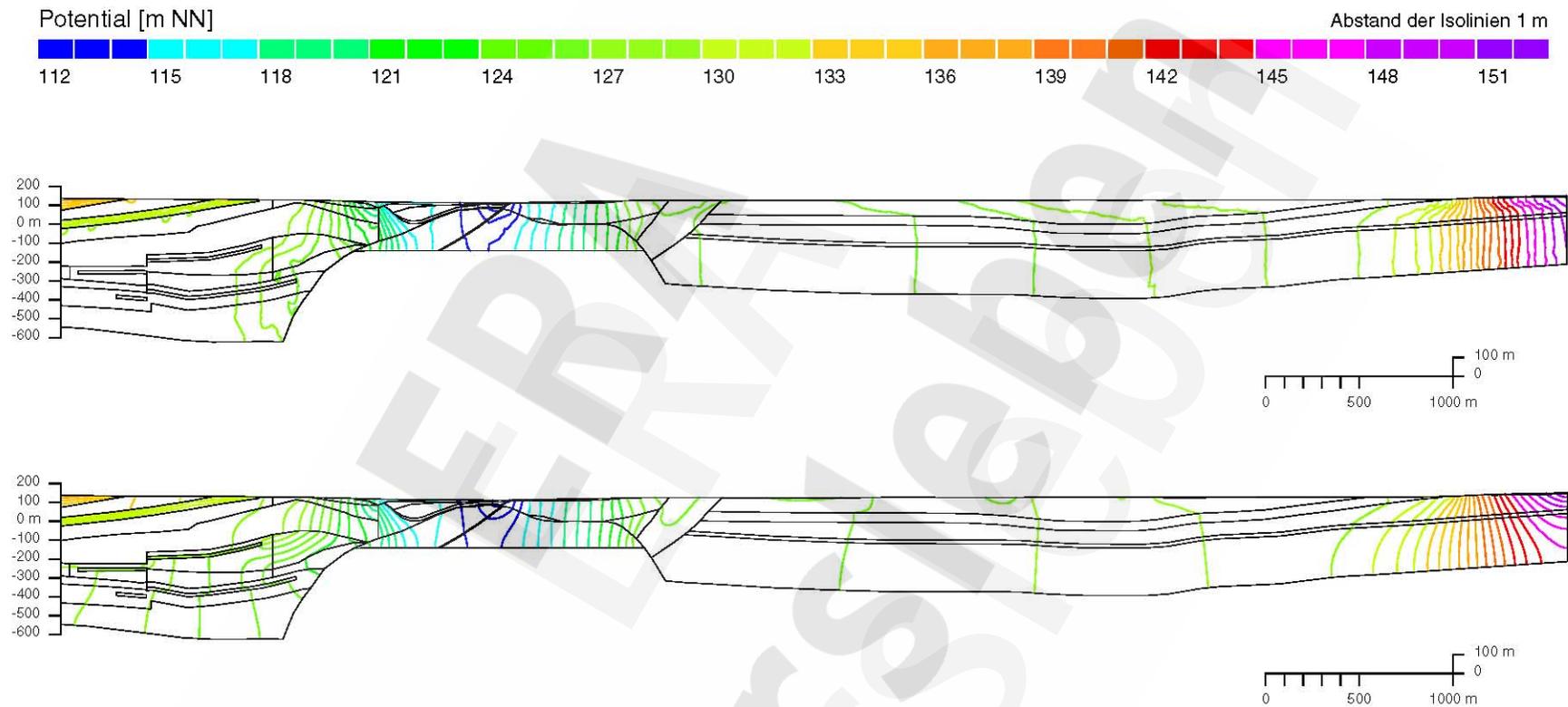


Abbildung 11 Süßwasserrechnungen Schnitt 5. Potentialverteilung im 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44, interpoliert/extrapoliert (oben). Potentialverteilung im Rechenfall R5-01 (unten)

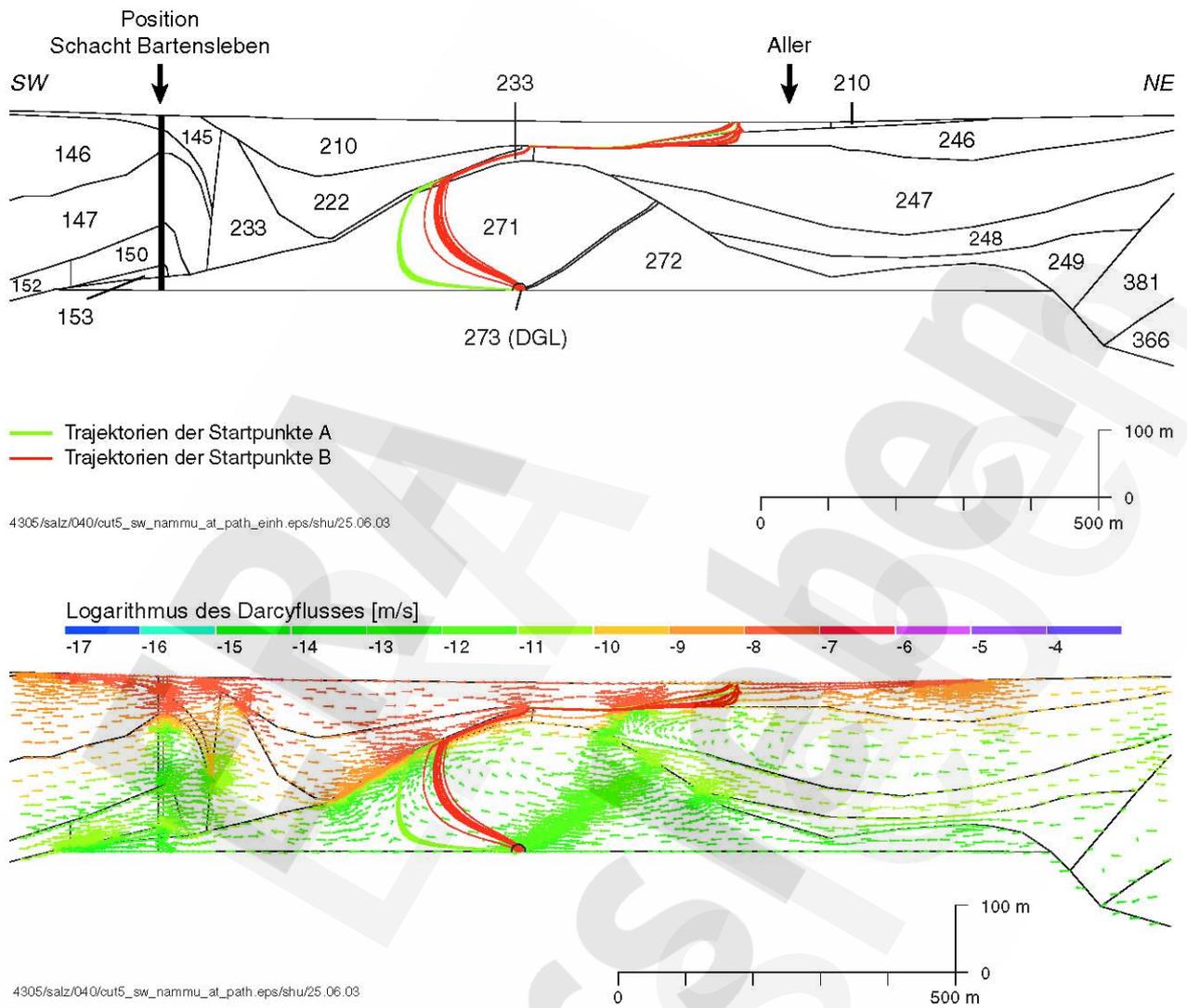
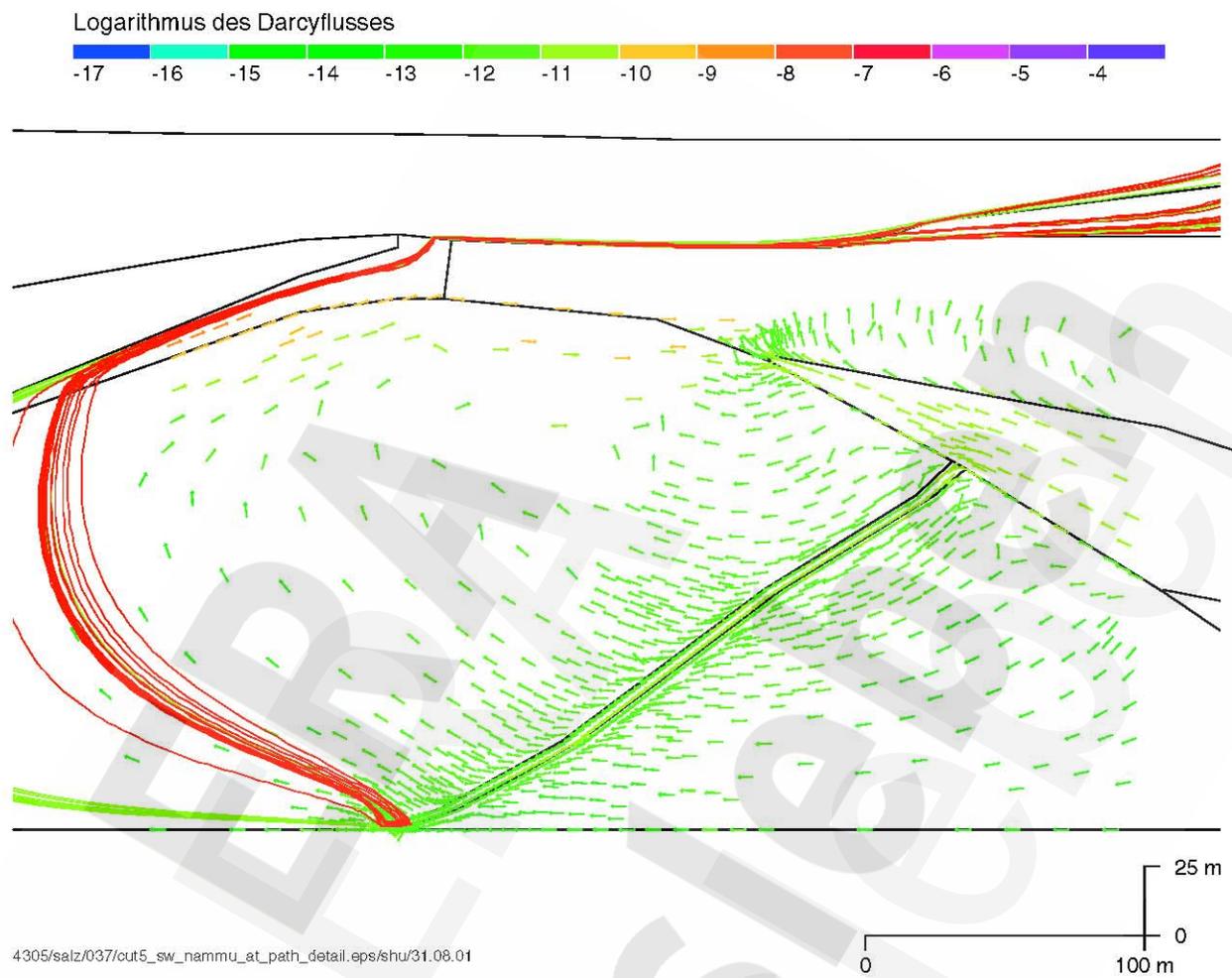


Abbildung 12 Süßwasserrechnung R5-01. Trajektorien und Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten) im Allertal



Farblegende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 13 Süßwasserrechnung R5-01. Detail Trajektorien und Darcyfluss

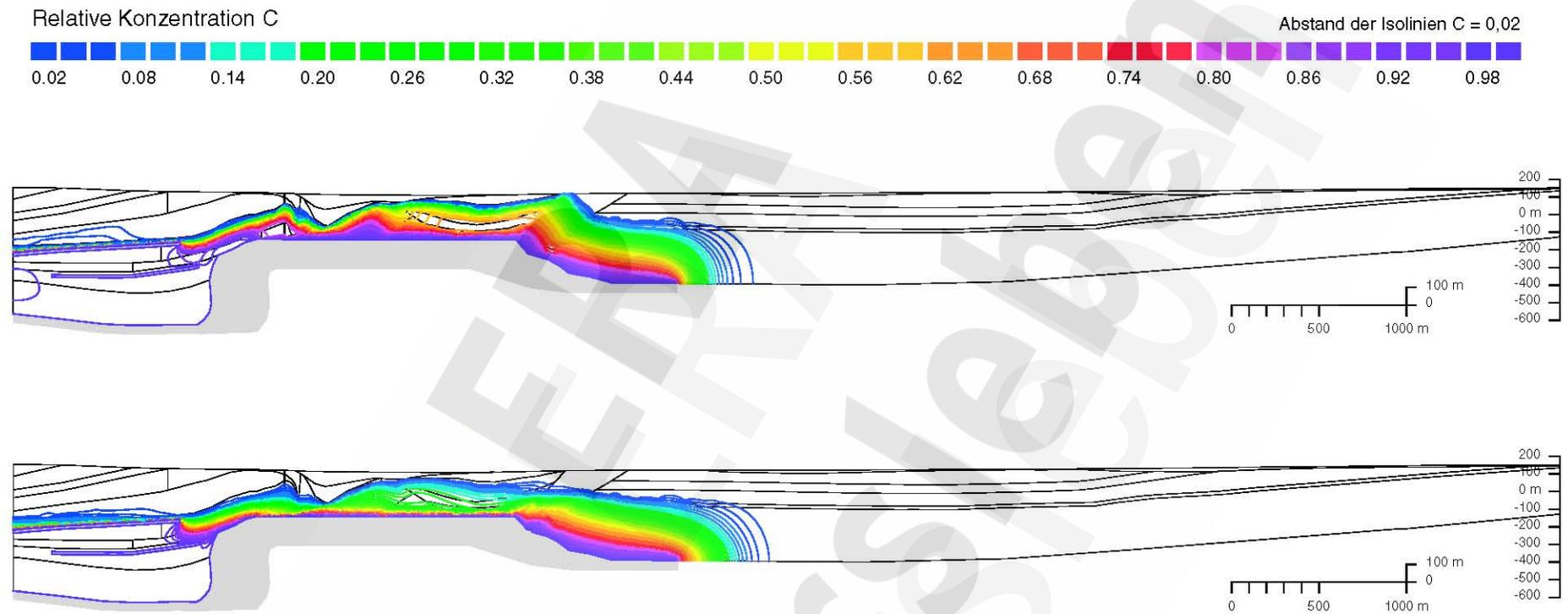


Abbildung 14 Salzwasserrechnung R5-02. Anfangsbedingung der Konzentrationsverteilung (oben), Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 3 Mio. Jahre) (unten)

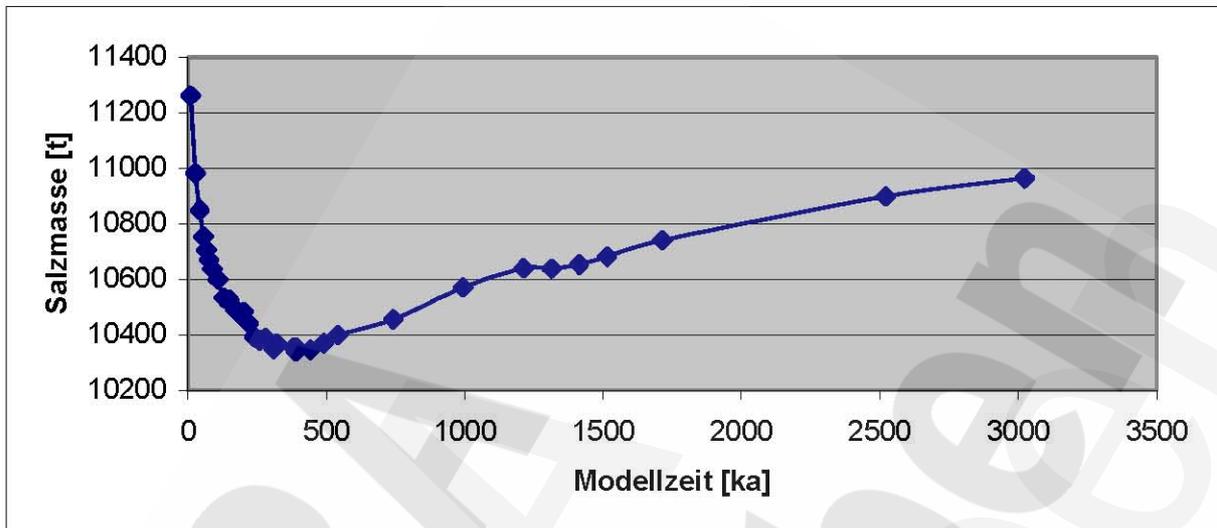


Abbildung 15 Salzwasserrechnung R5-02. Zeitliche Entwicklung der Salzmasse in Abhängigkeit von der Modellzeit

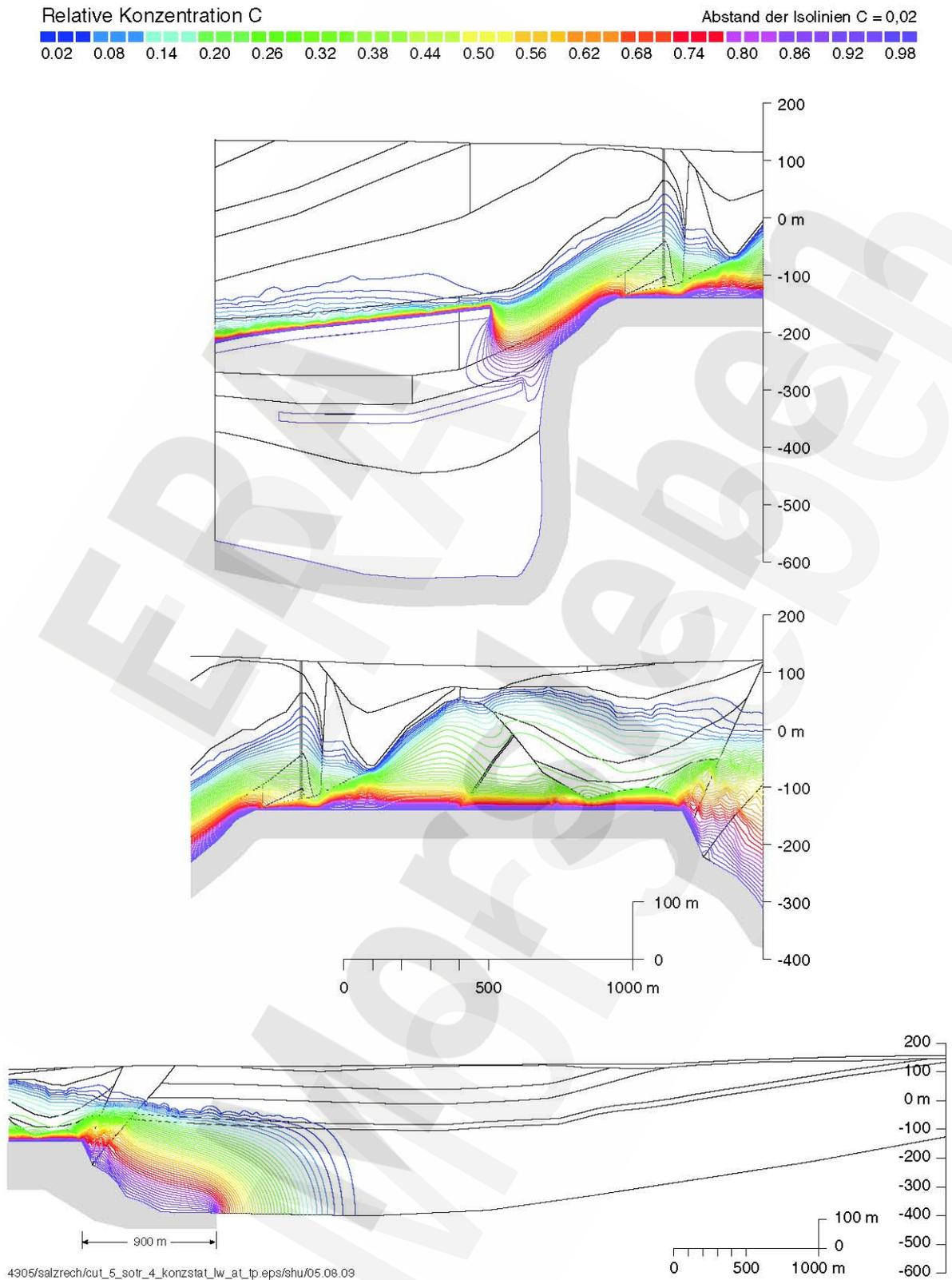


Abbildung 16 Salzwasserrechnung R5-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 3 Mio. Jahre) im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)

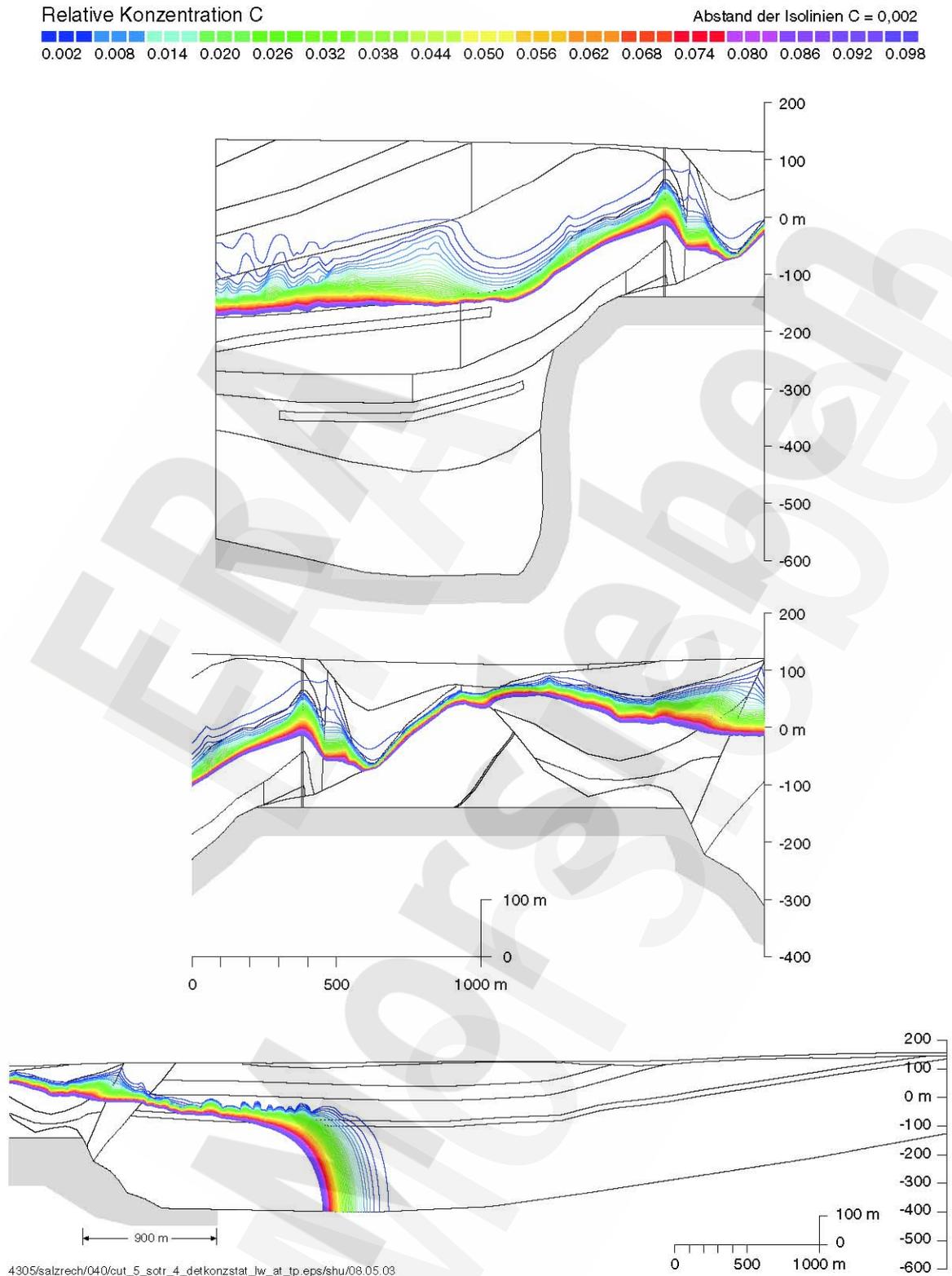


Abbildung 17 Salzwasserrechnung R5-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 3 Mio. Jahre), Detaildarstellung für den Bereich C=0 bis 0,1 im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)

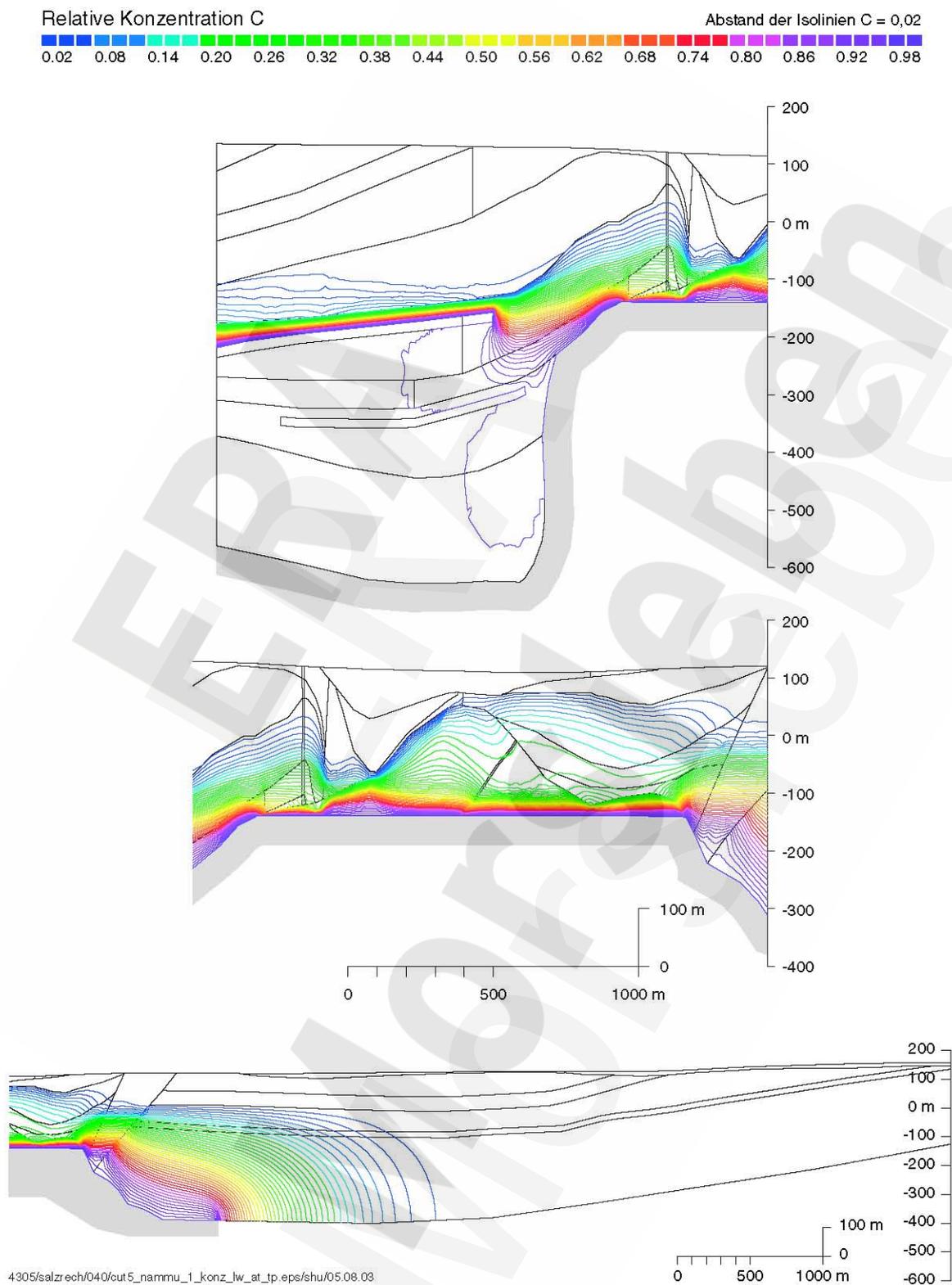


Abbildung 18 Stationäre Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)

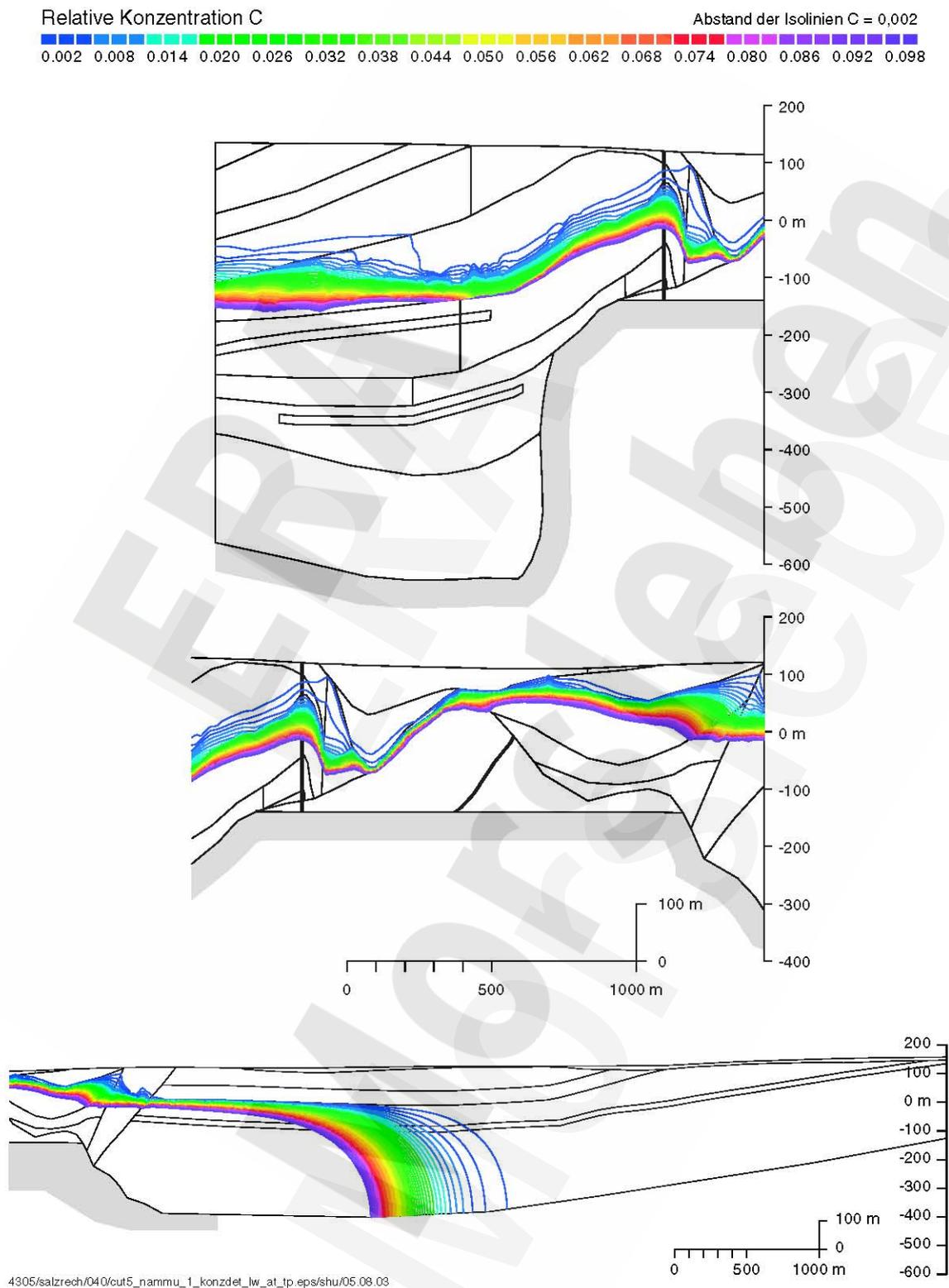


Abbildung 19 Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung, Detaildarstellung für den Bereich $C=0$ bis $0,1$ im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Werflinger Triasplatte (unten)

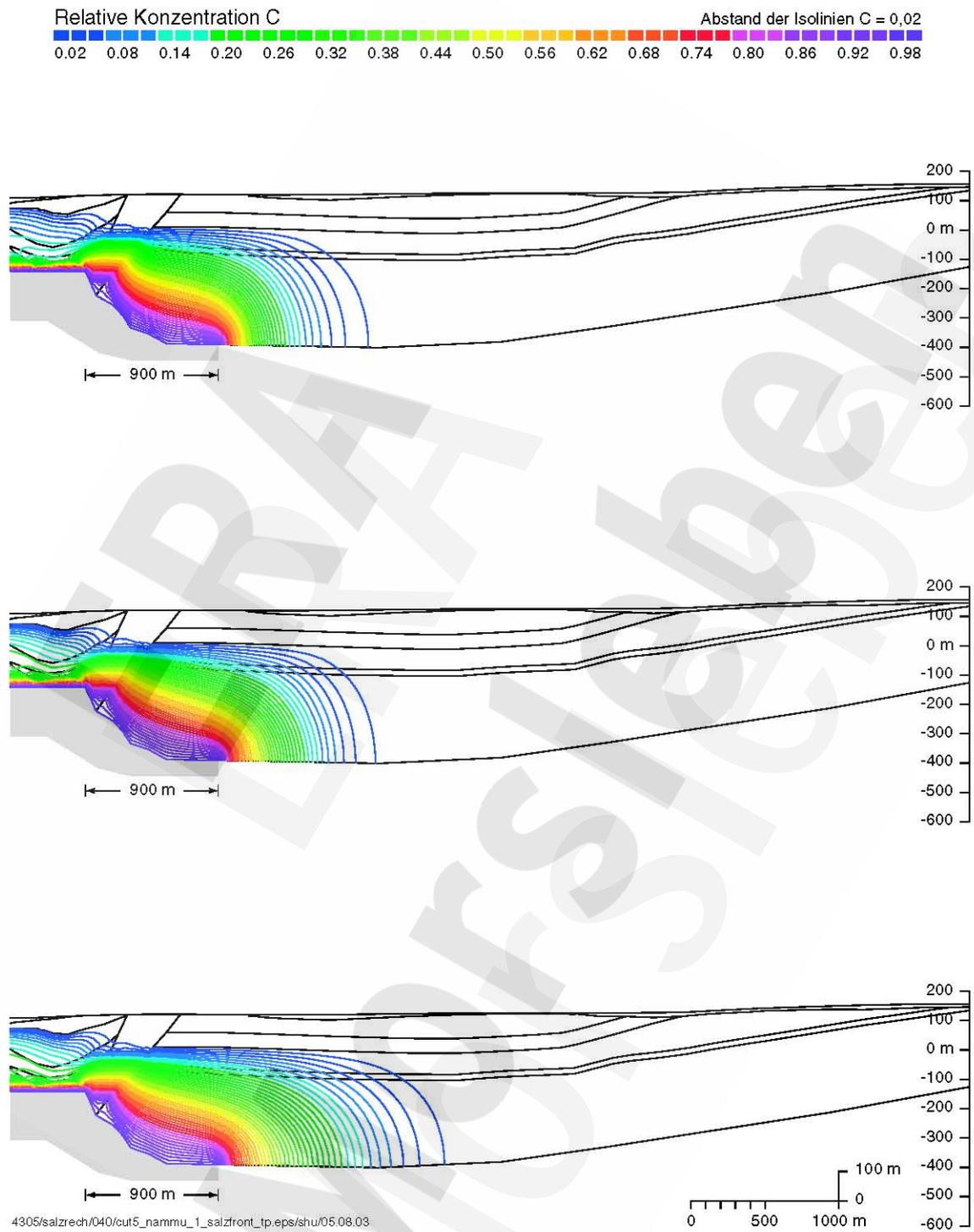
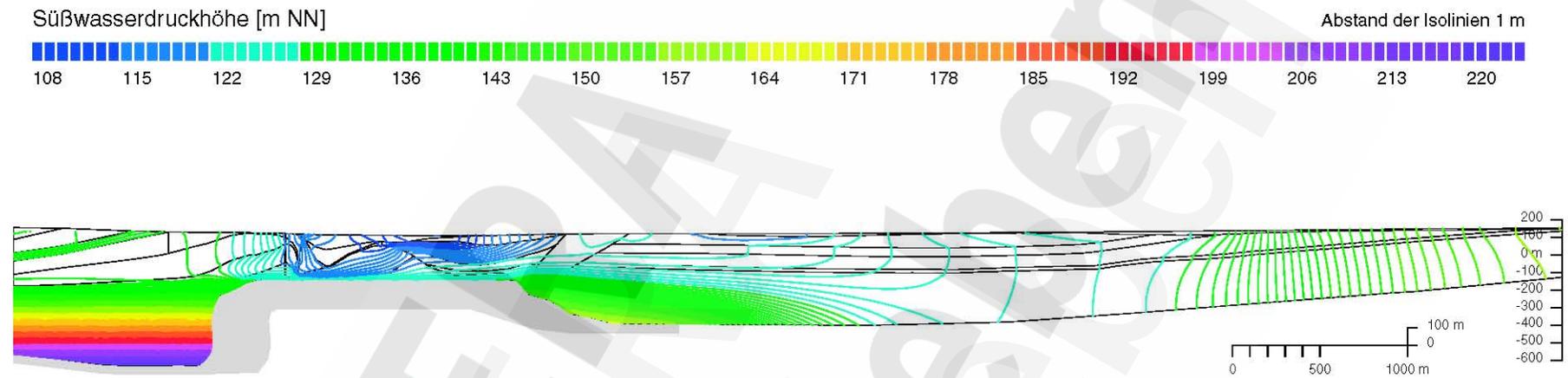


Abbildung 20 Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung in der Weferlinger Triasplatte. Modellzeit 100'000 Jahre (oben), 1'000'000 Jahre (Mitte) und stationär (unten)



4305/salzrech/040/cut5_nammu_1_stationär.eps/shu/05.08.03

Abbildung 21 Salzwasserrechnung R5-05. Druckverteilung, ausgedrückt als Süßwasserdruckspiegelhöhe im stationären Zustand

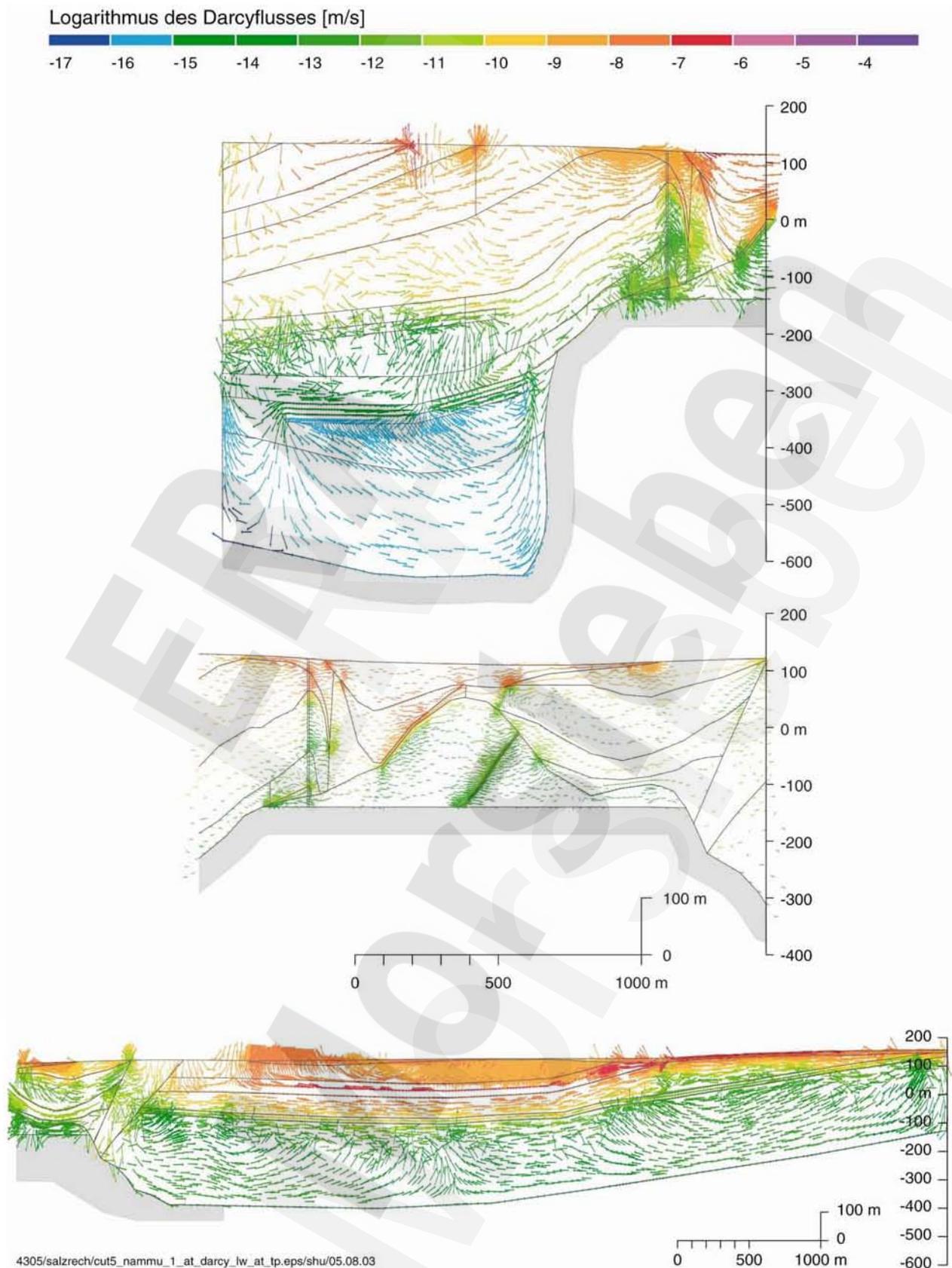


Abbildung 22 Salzwasserrechnung R5-05. Vektoren des Darcyflusses im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)

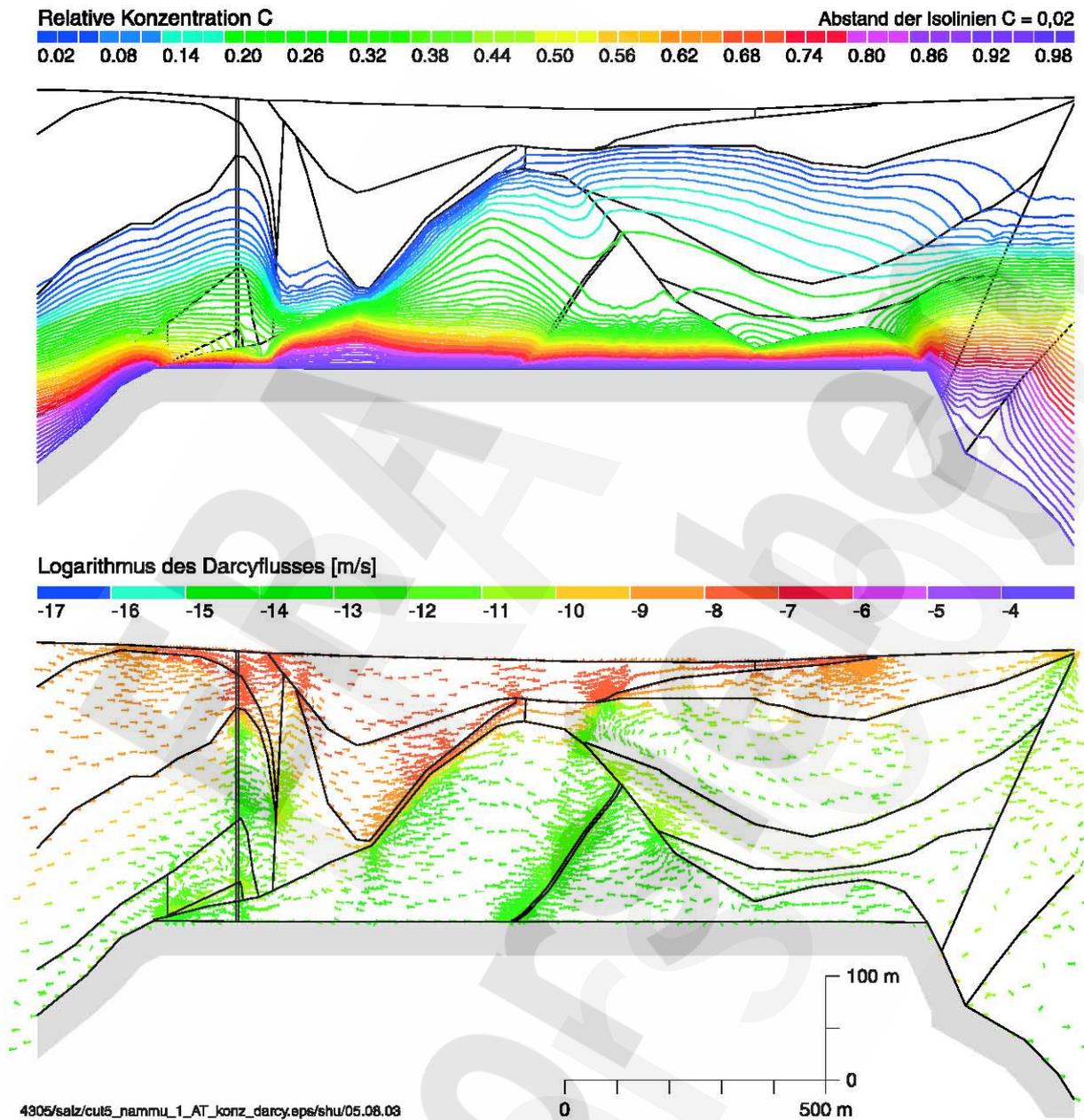
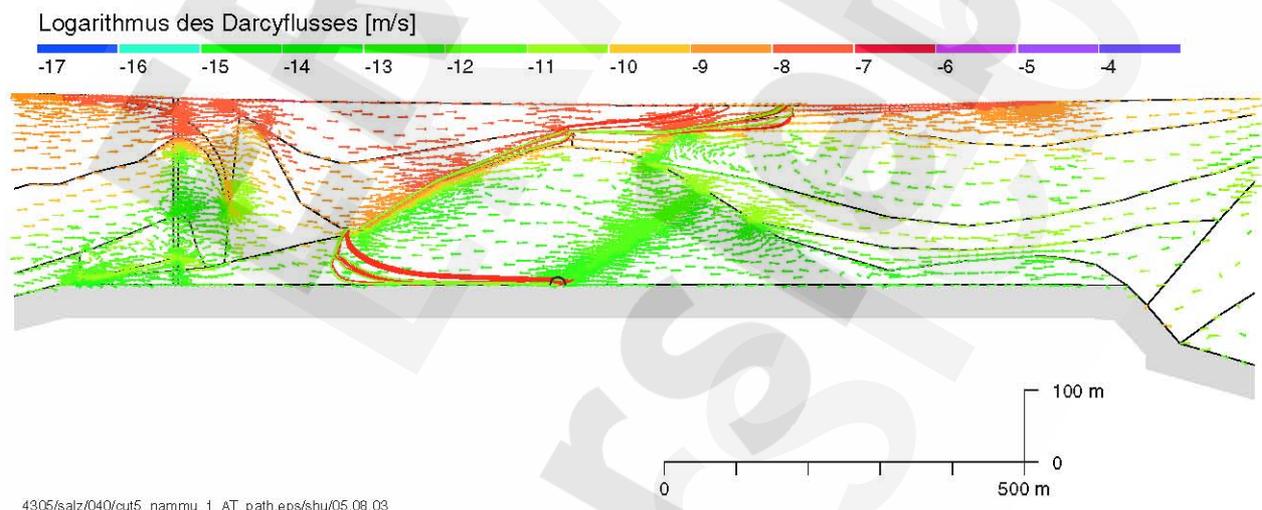
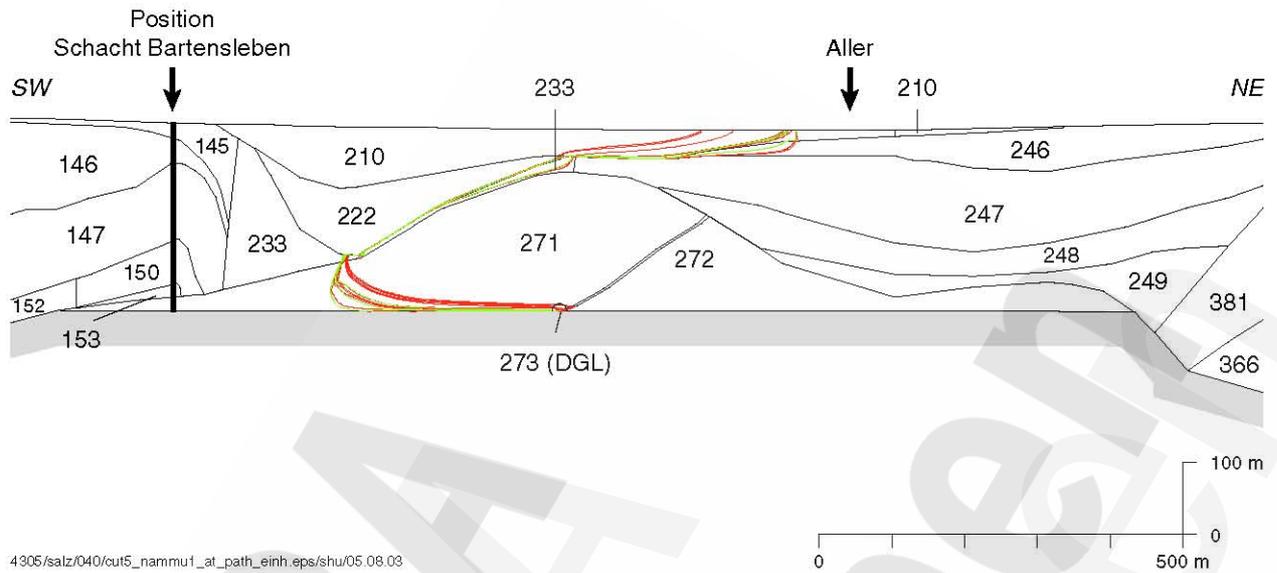


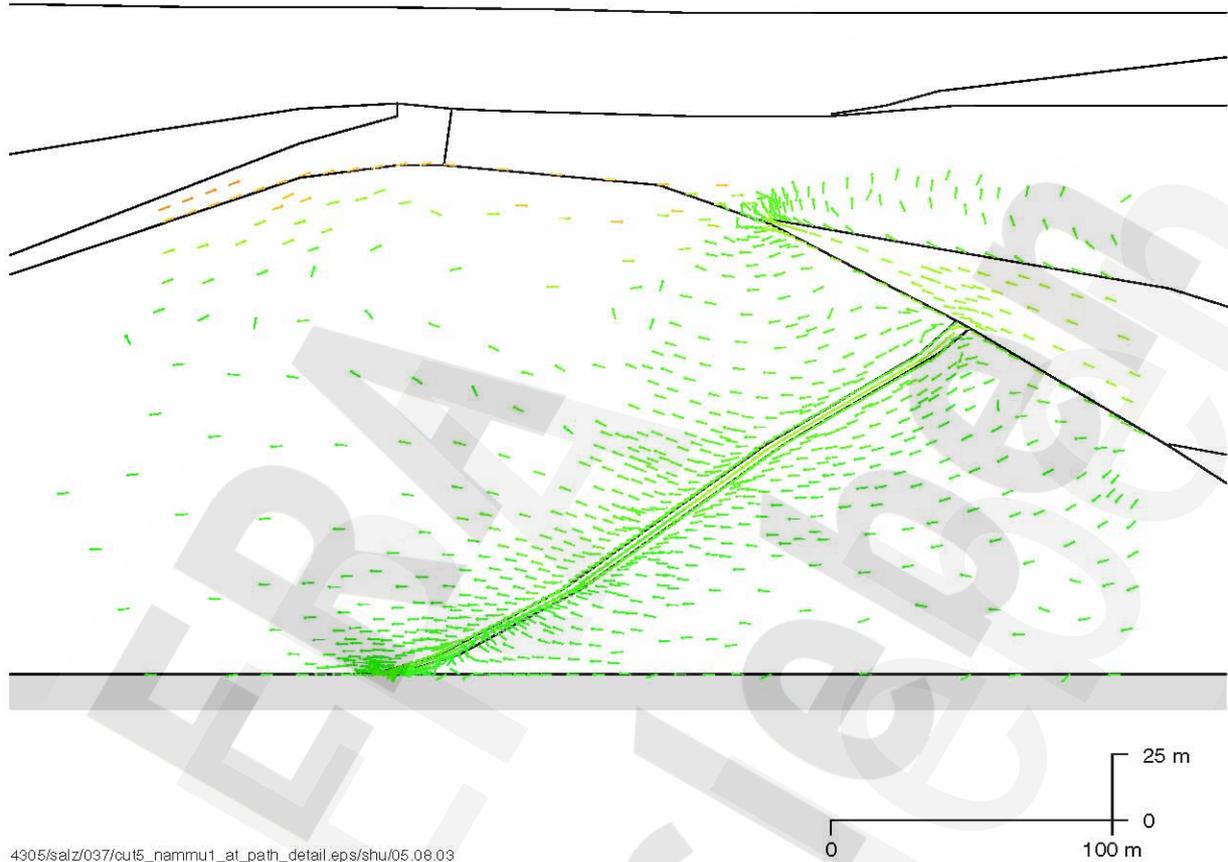
Abbildung 23 Salzwasserrechnung R5-05. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal



Farblegende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 24 Salzwasserrechnung R5-05. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten)

Logarithmus des Darcyflusses [m/s]



4305/salz/037/ou5_nammu1_at_path_detail.eps/shu/05.09.03

Farblegende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 25 Salzwasserrechnung R5-05. Detail Trajektorien und Darcyfluss

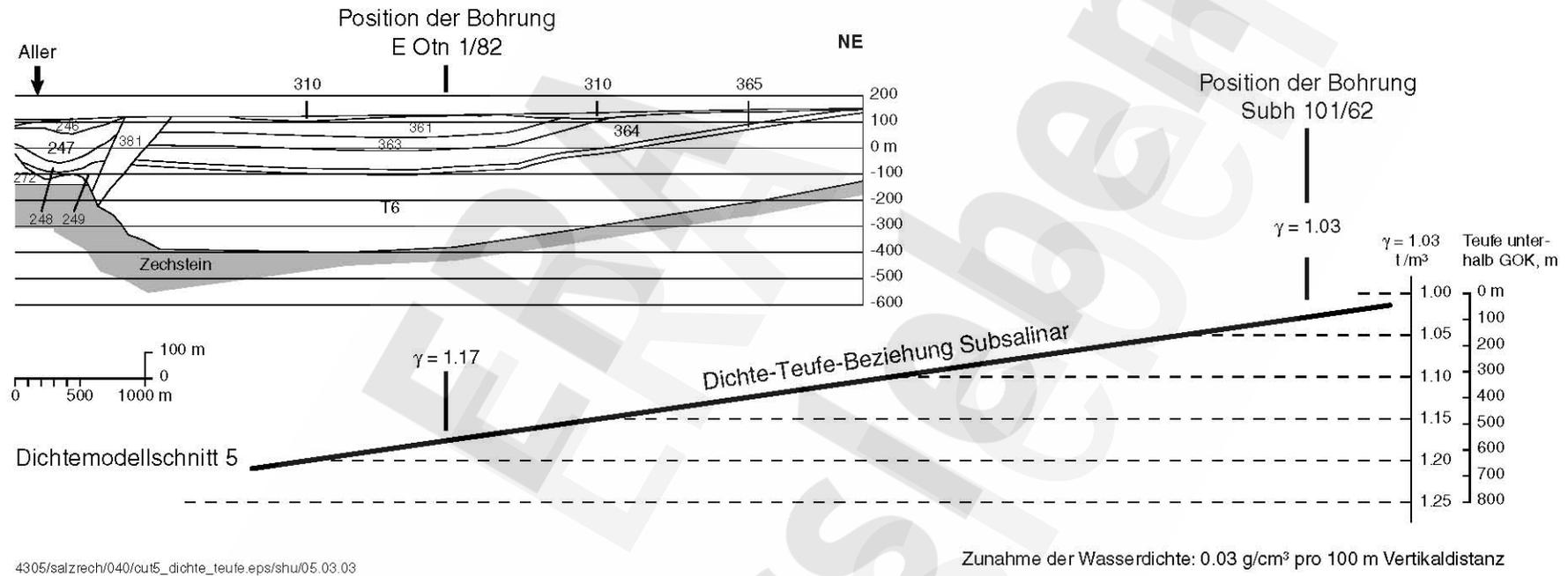


Abbildung 26 Angaben zur Dichte der subsalinen Wässer in der Weferlinger Triasplatte

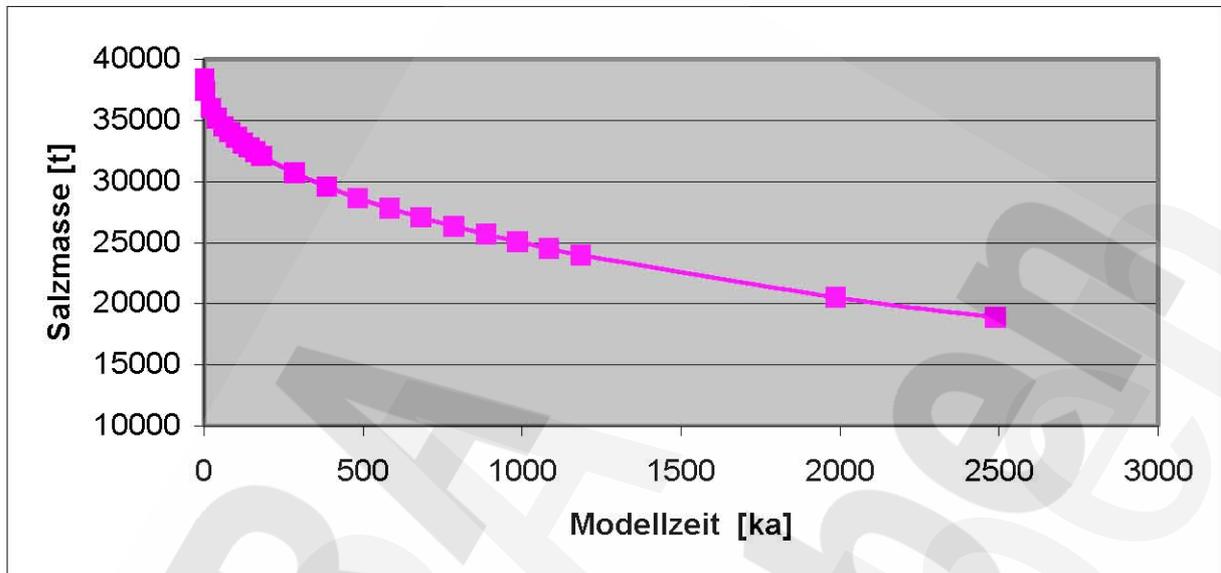


Abbildung 27 Salzwasserrechnung R5-04. Zeitliche Entwicklung der Salzmasse in Abhängigkeit von der Modellzeit

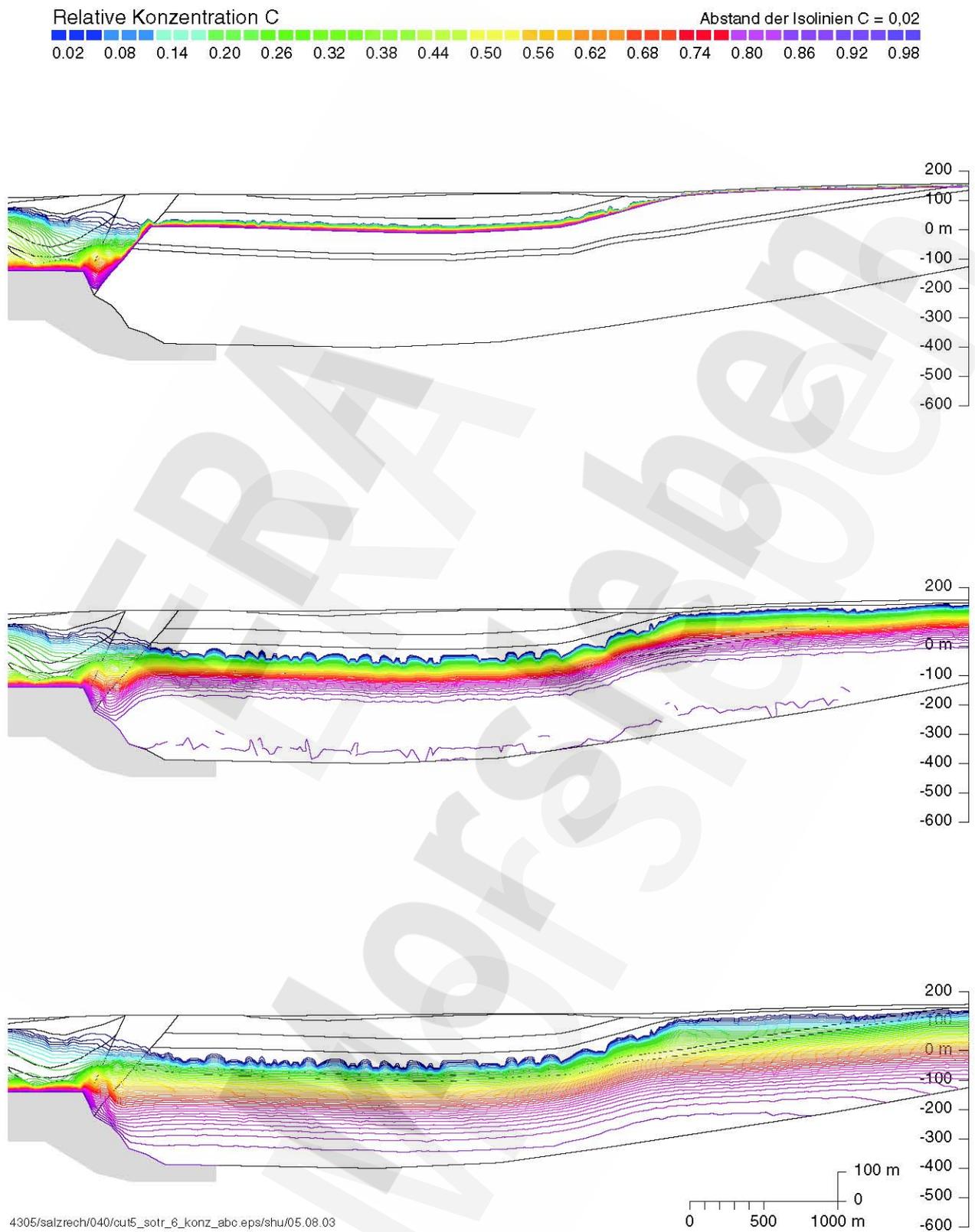


Abbildung 28 Salzwasserrechnung R5-04. Konzentrationsverteilung, (a) Modellzeit 0 Jahre (Anfangsbedingung), (b) Modellzeit 100'000 Jahre, (c) Modellzeit 500'000 Jahre

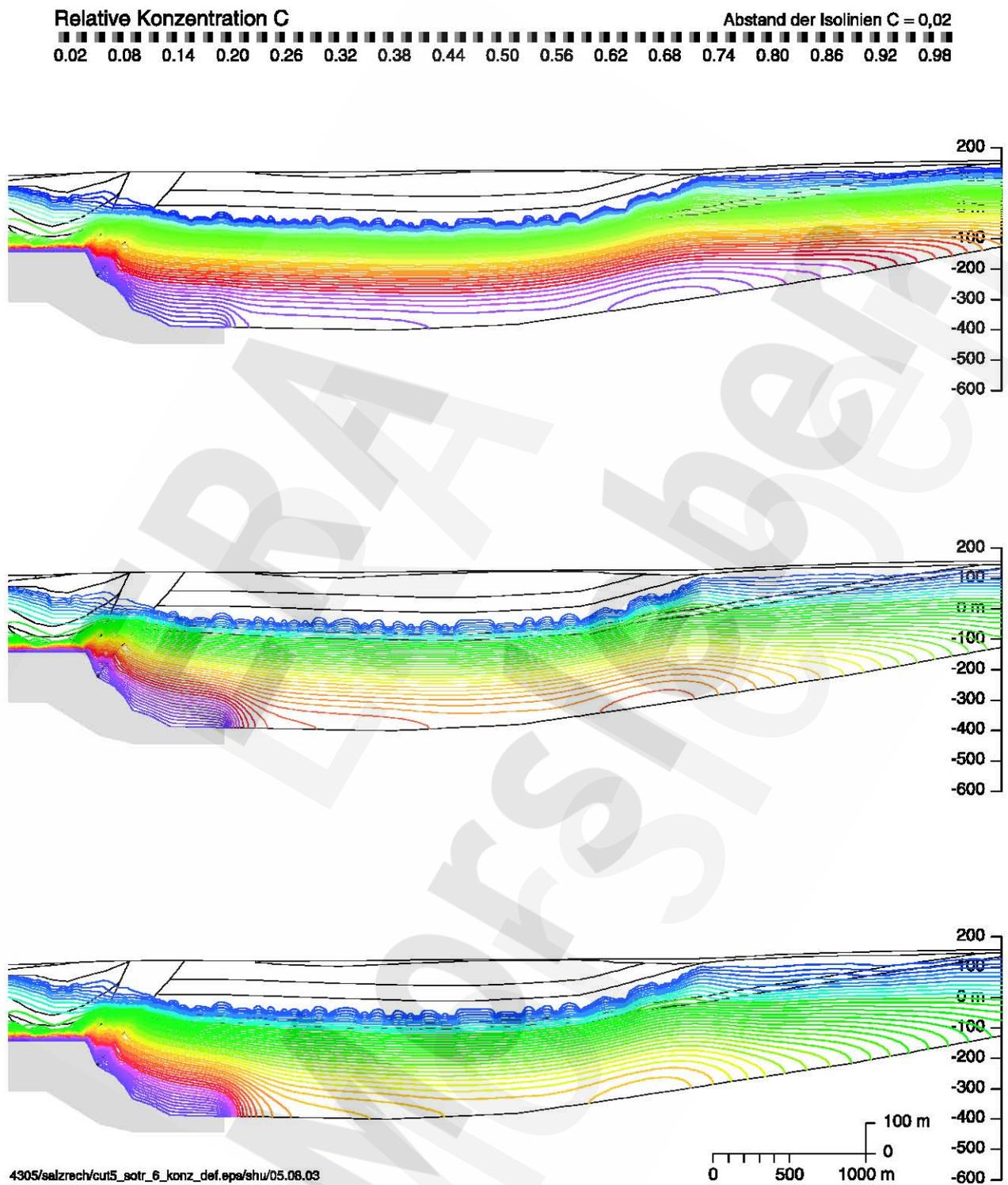


Abbildung 29 Salzwasserrechnung R5-04. Konzentrationsverteilung, (d) Modellzeit 1 Mio. Jahre, (e) Modellzeit 2 Mio. Jahre, (f) Modellzeit 2,5 Mio. Jahre

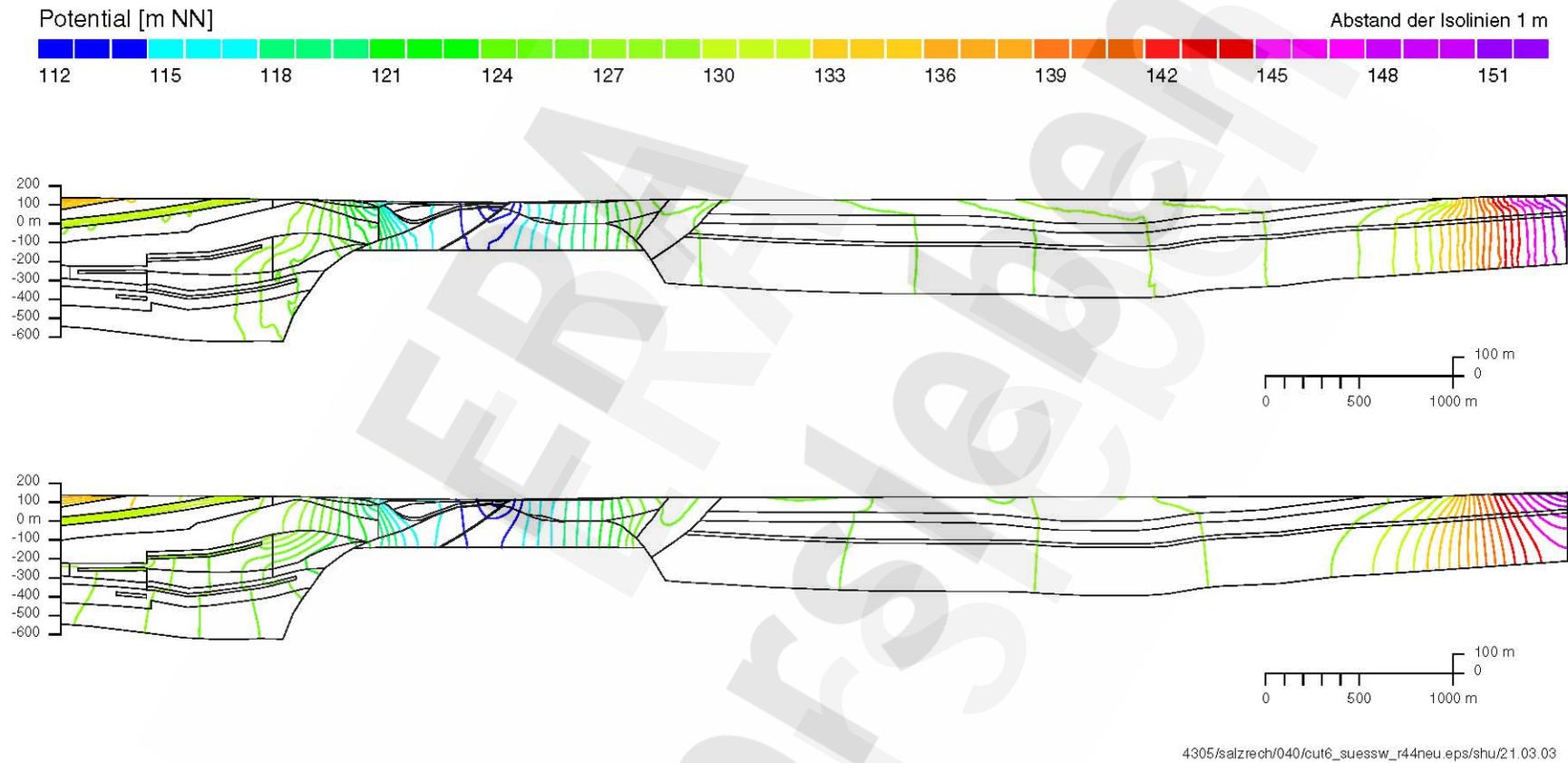


Abbildung 30 Süßwasserrechnungen Schnitt 6. Potentialverteilung im 3D Süßwassermodell, Rechenfall R44, interpoliert/extrapoliert (oben).
Potentialverteilung im Rechenfall R6-01 (unten)

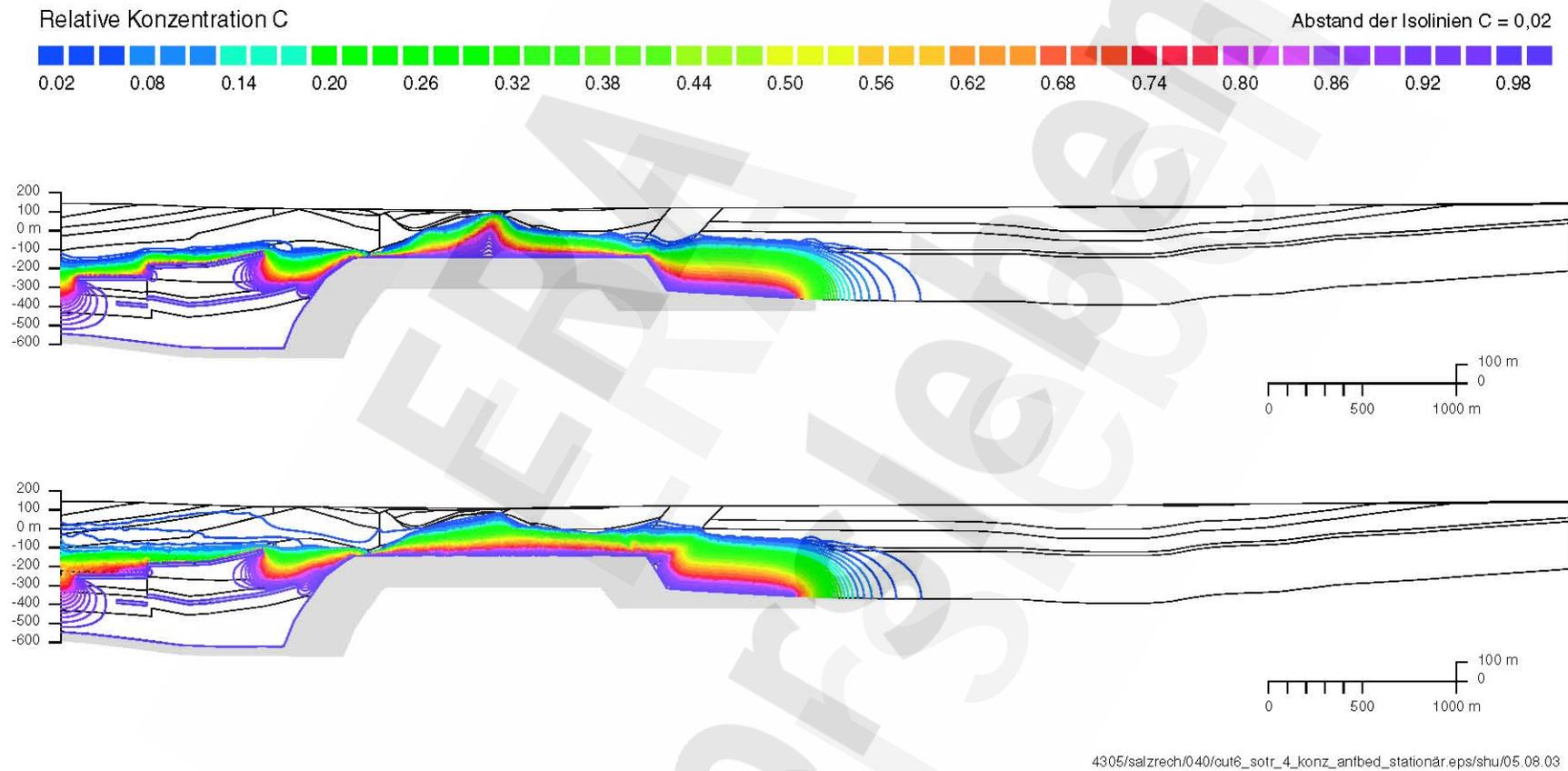


Abbildung 31 Salzwasserrechnung R6-02. Anfangsbedingung der Konzentrationsverteilung (oben), Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre)

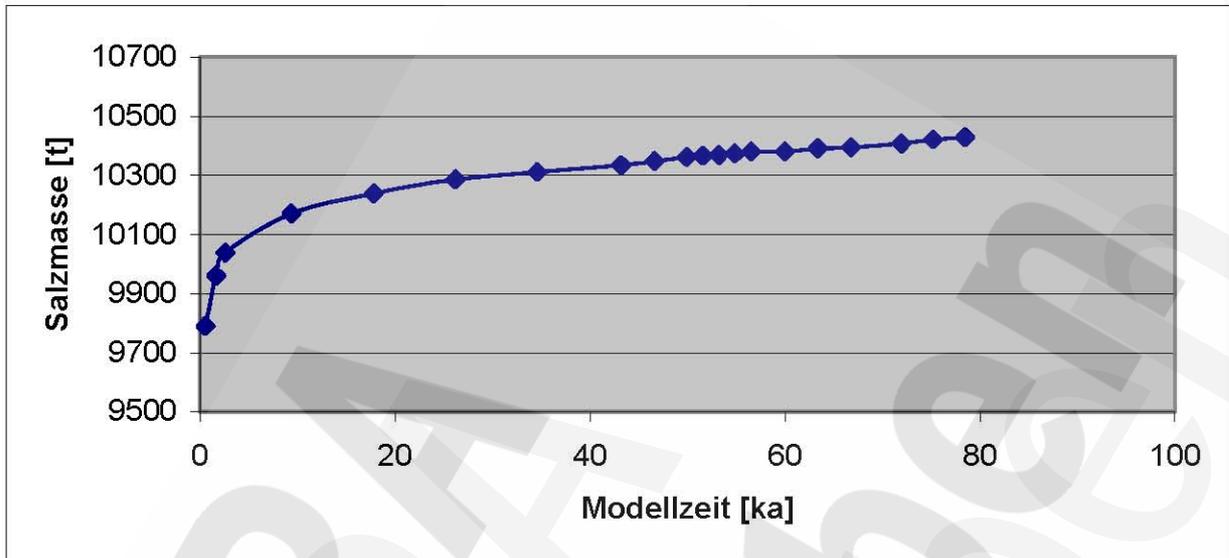


Abbildung 32 Salzwasserrechnung R6-02. Zeitliche Entwicklung der Salzmasse in Abhängigkeit von der Modellzeit

Relative Konzentration C Abstand der Isolinien C = 0,02

0.02 0.08 0.14 0.20 0.26 0.32 0.38 0.44 0.50 0.56 0.62 0.68 0.74 0.80 0.86 0.92 0.98

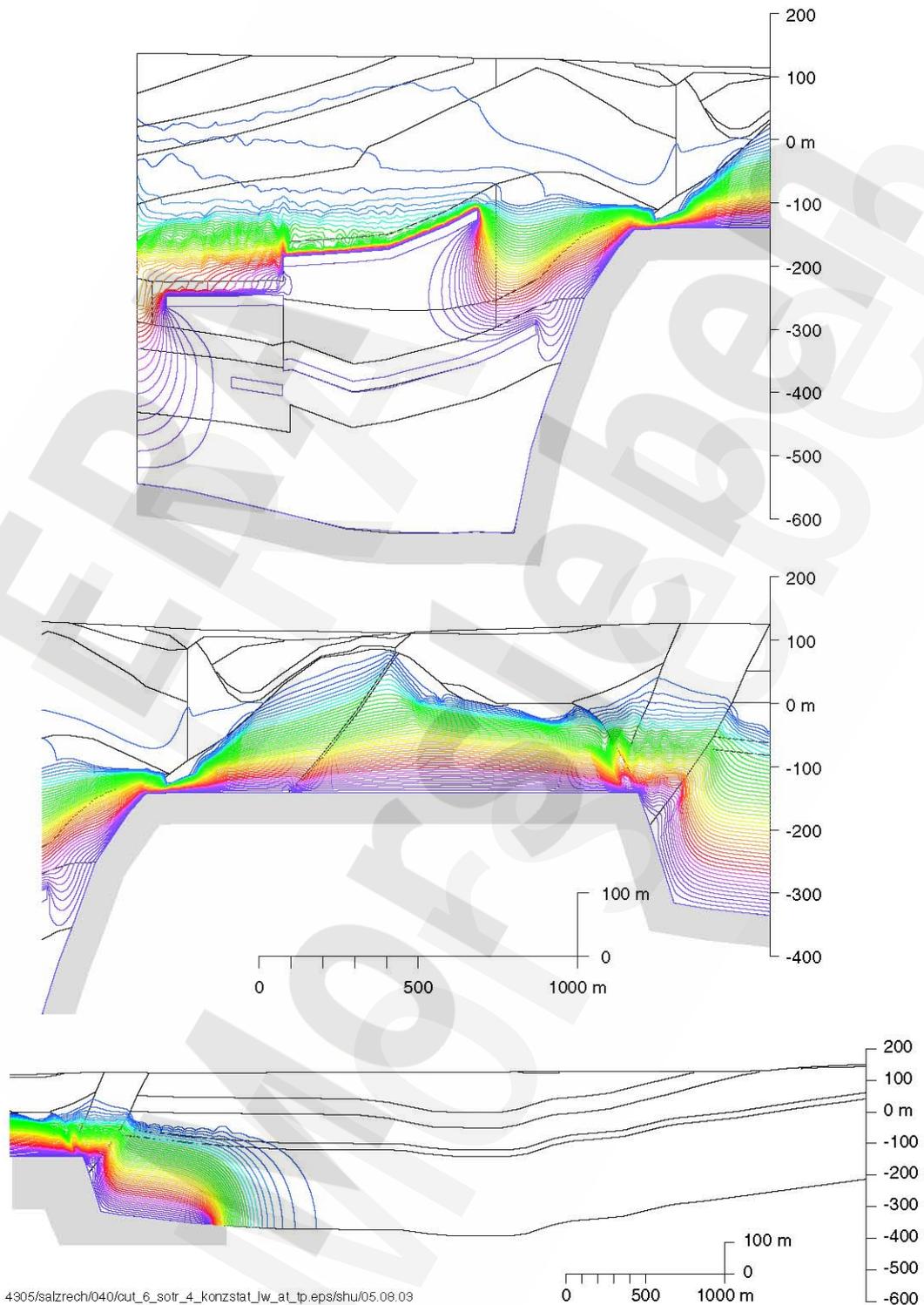


Abbildung 33 Salzwasserrechnung R6-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre) im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)

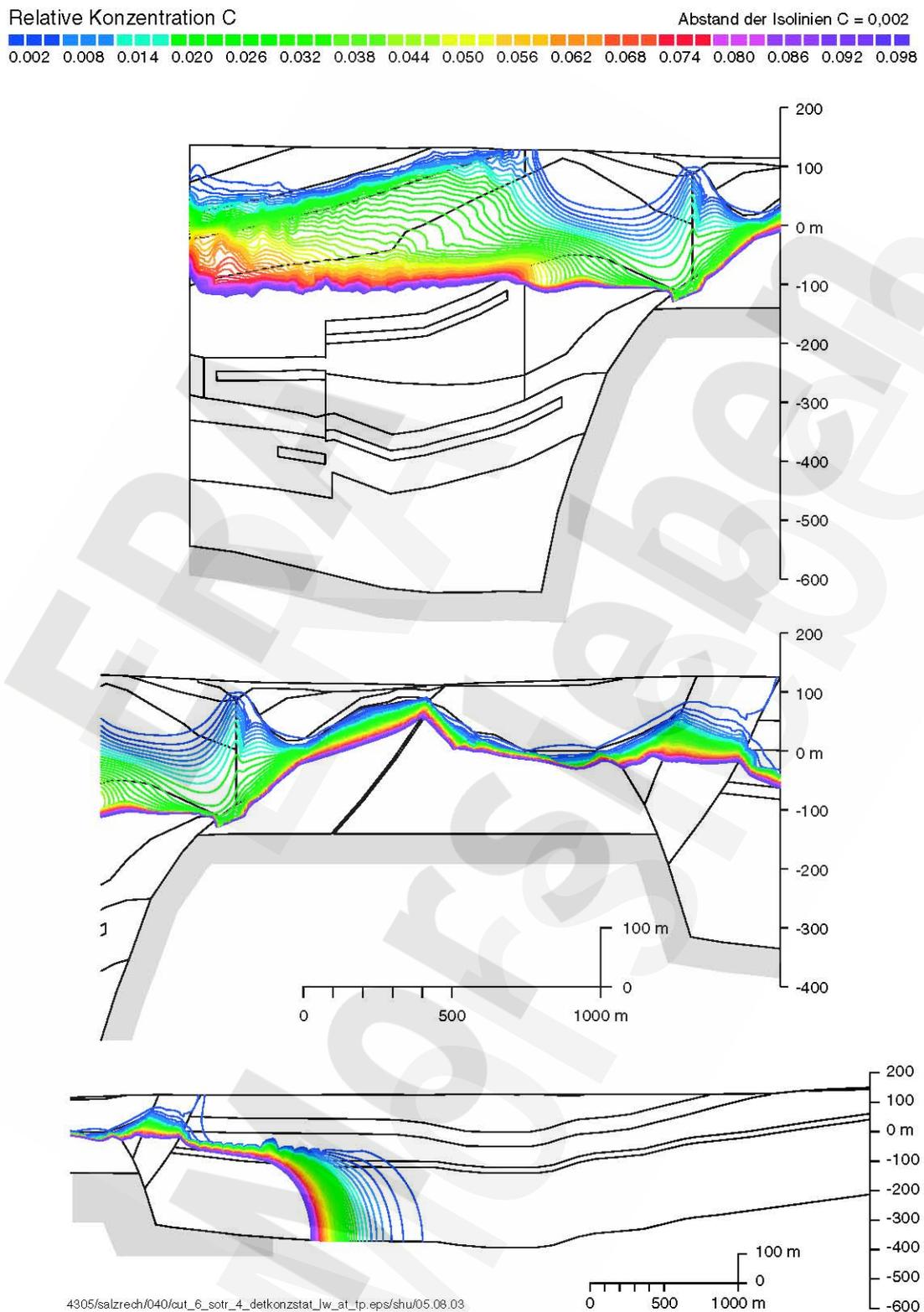
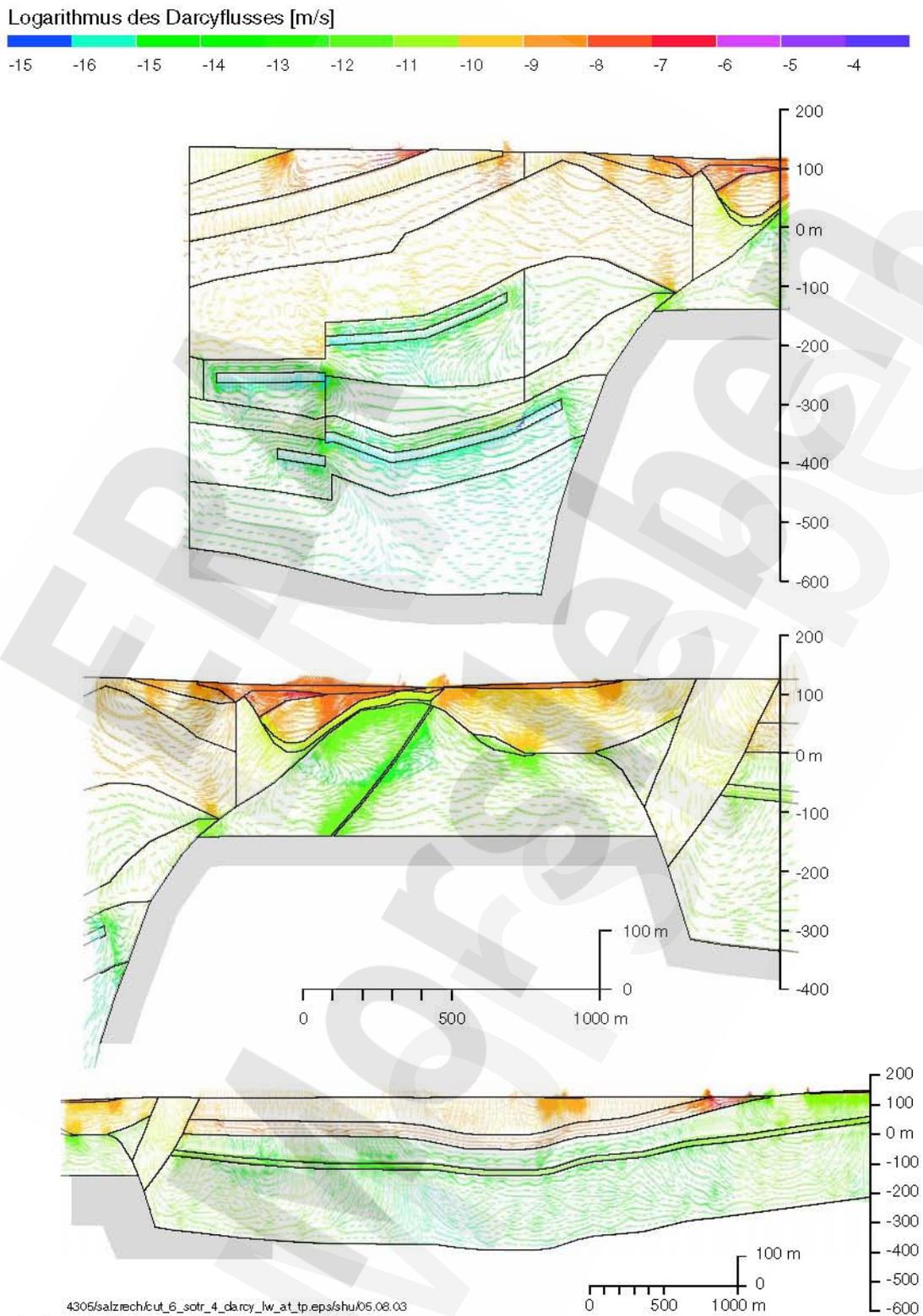


Abbildung 34 Salzwasserrechnung R6-02. Konzentrationsverteilung im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre), Detaildarstellung für den Bereich $C=0$ bis $0,1$ im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triaslatte (unten)



4305/salzrech/cut_6_sotr_4_darcy_lw_at_tp.eps/shu05.08.03

cut6_sotr_4_darcy_lw_at_tp.eps

Abbildung 35 Salzwasserrechnung R6-02. Darcyflüsse im quasi-stationären Zustand (Modellzeit 78'700 Jahre) im Lappwald (oben), im Allertal (Mitte) und in der Weferlinger Triasplatte (unten)

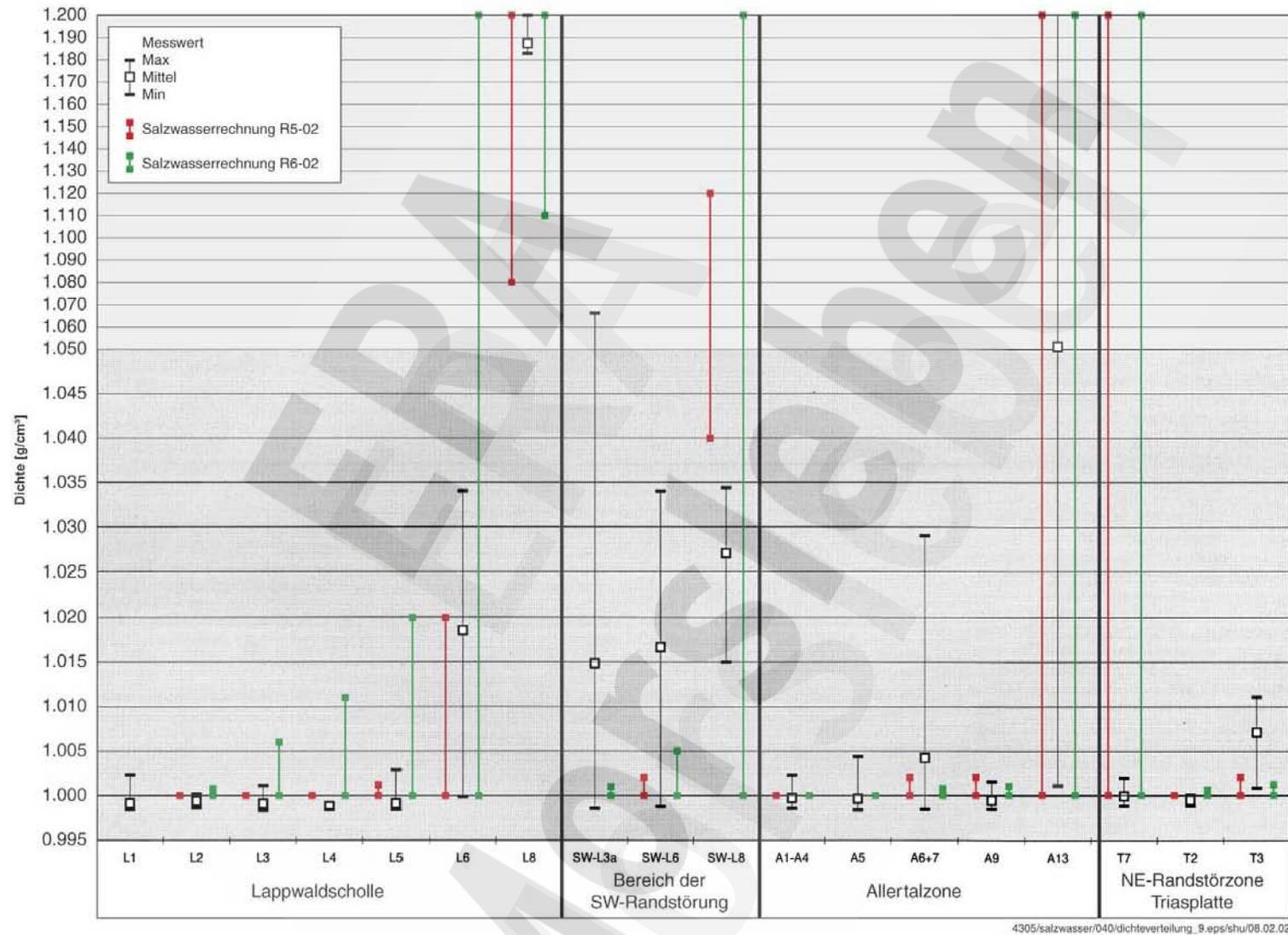


Abbildung 36 Vergleich der Grundwasserdichten aus Wasserproben ([4], Anlage 7.11, Blatt 8 bis 10, bzw. Anlage 28) mit den in den 2D Salzwasserrechnungen R5-02 und R6-02 berechneten Werten

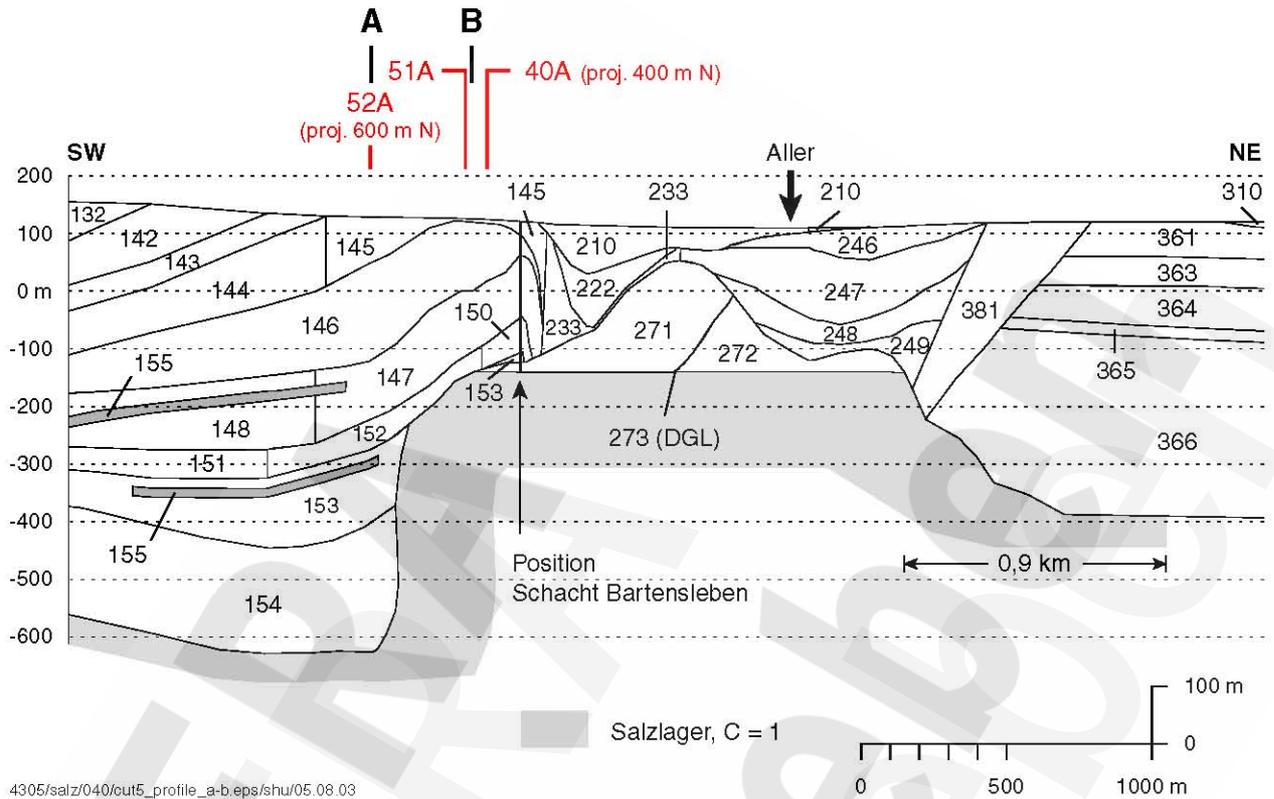


Abbildung 37 Ausschnitt aus dem 2D Modell Schnitt 5 mit Projektion der Lage der Bohrungen Dp Mors 52A (Profil A), Dp Mors 51A/40A (Profil B)

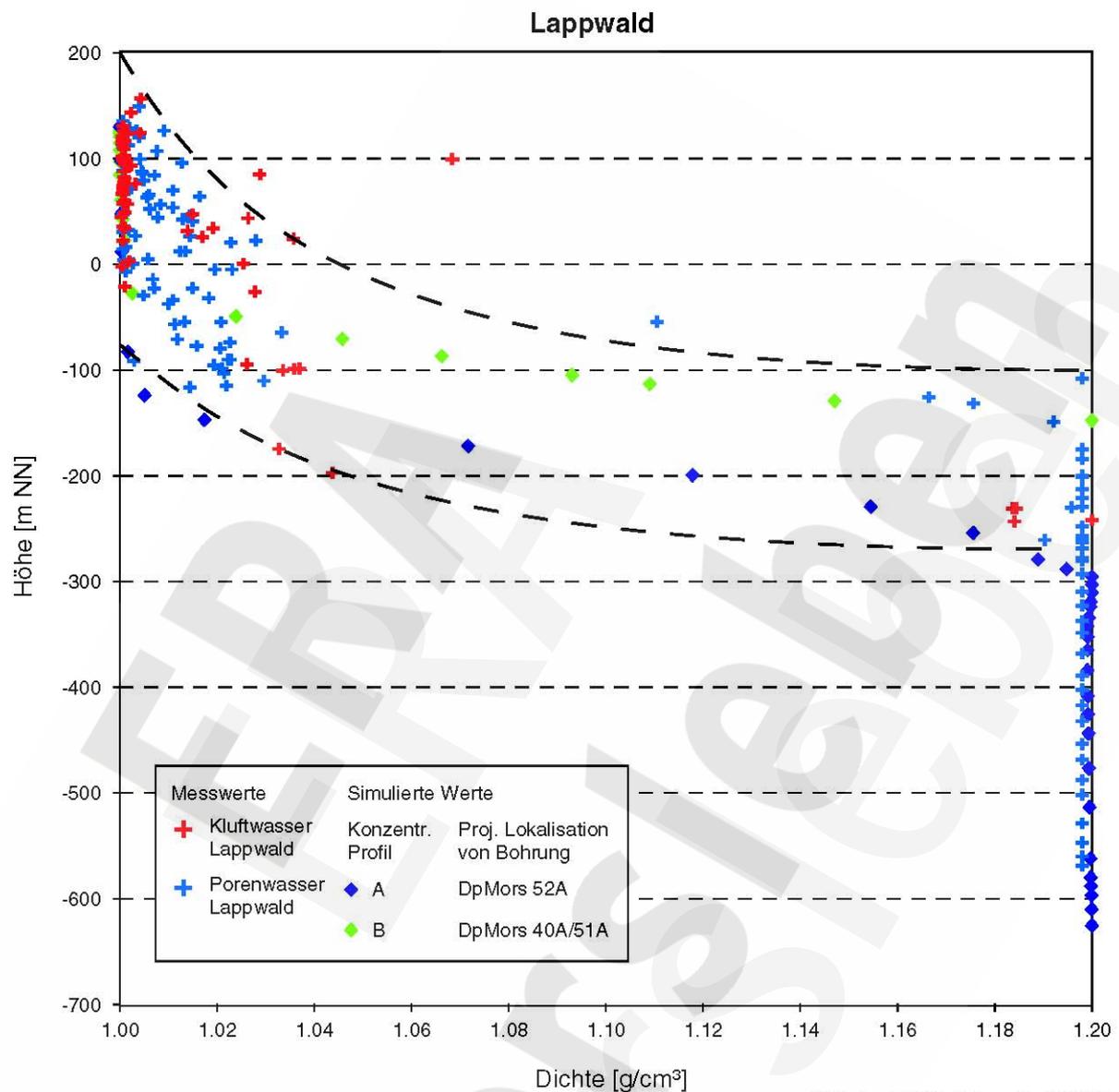
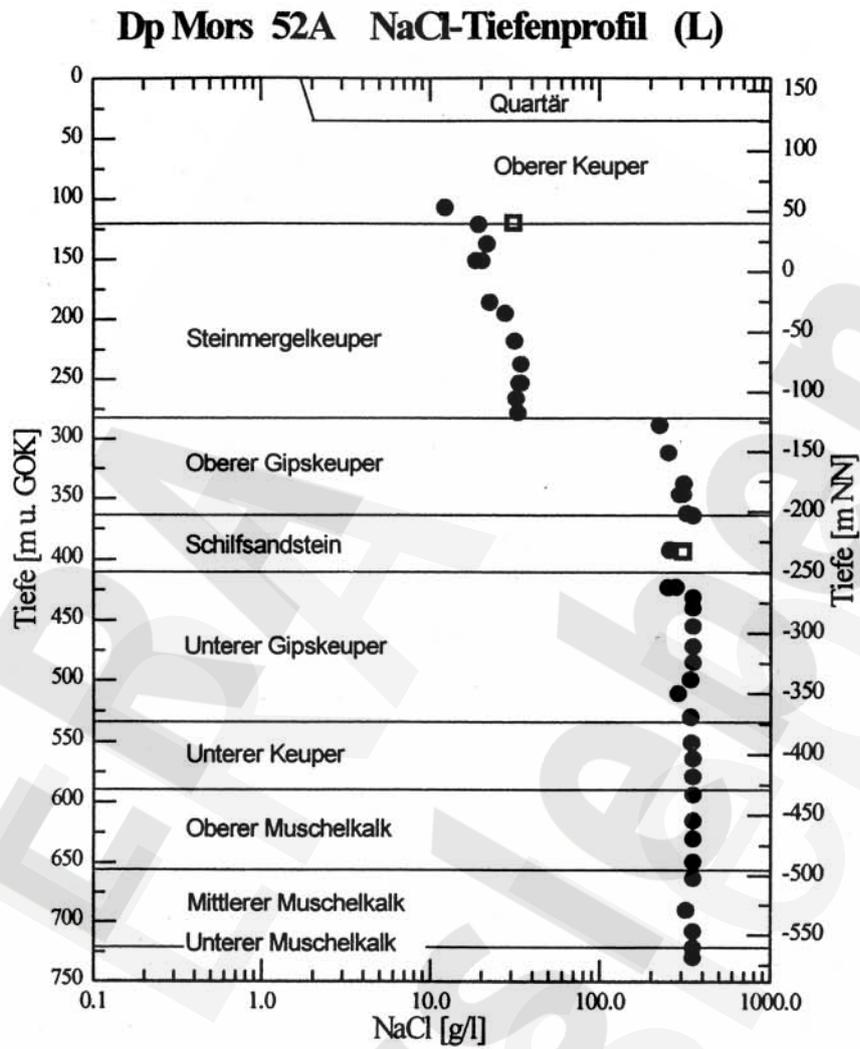


Abbildung 38 Verteilung der Grundwasserdichte als Funktion der Geländehöhe (mNN) in der Lappwaldscholle. Kluft- und Porenwasserproben aus Bohrungen (Hydrotests, Kerne) und Modellresultate R5-02 am Ort der (projizierten) Bohrungen (vgl. Abbildung 37)



Ref. [6], Abbildung 13d

Abbildung 39 NaCl-Tiefenprofil des Porenwassers der Bohrkern von Dp Mors 52A (Lappwaldscholle)

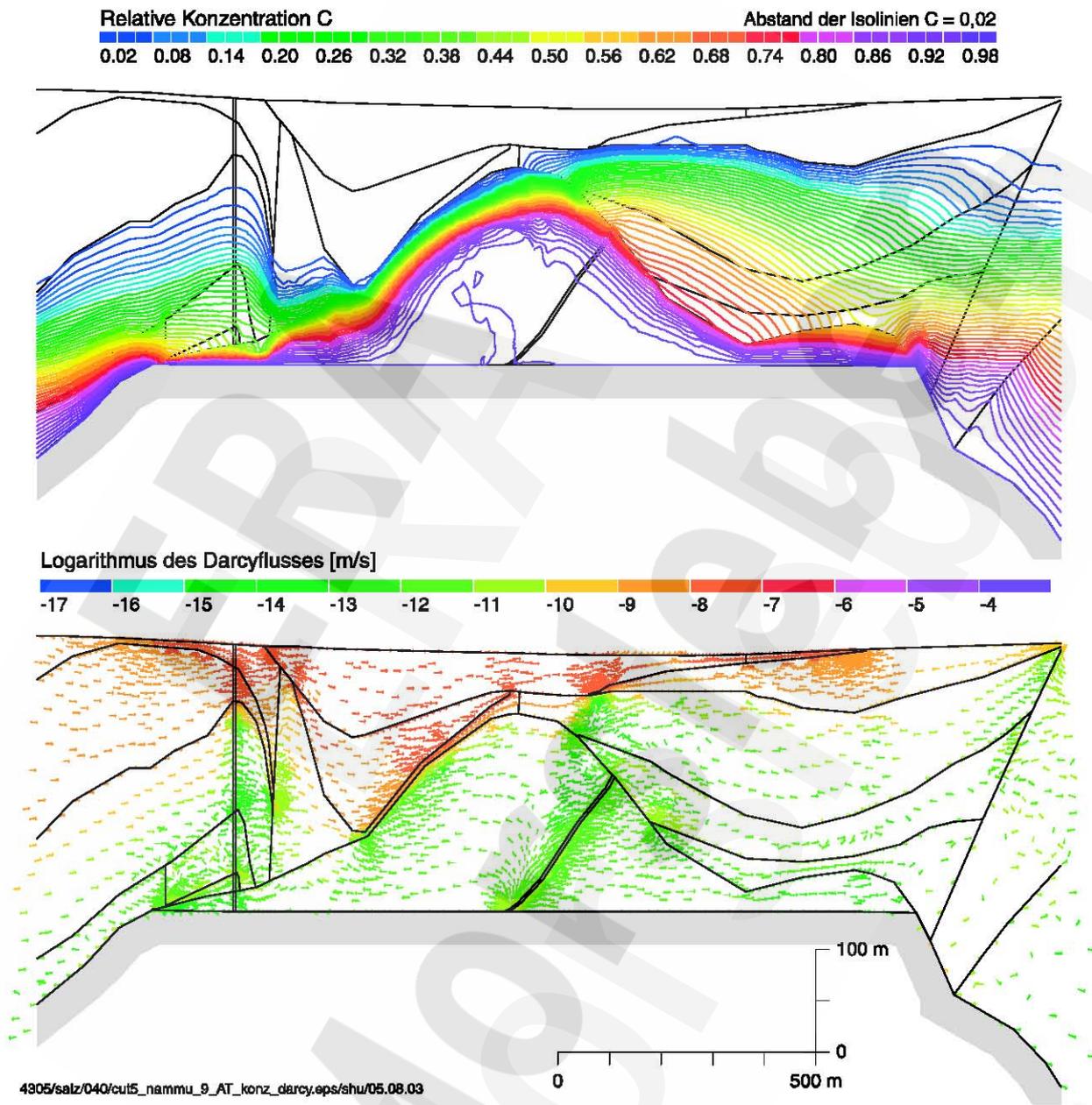
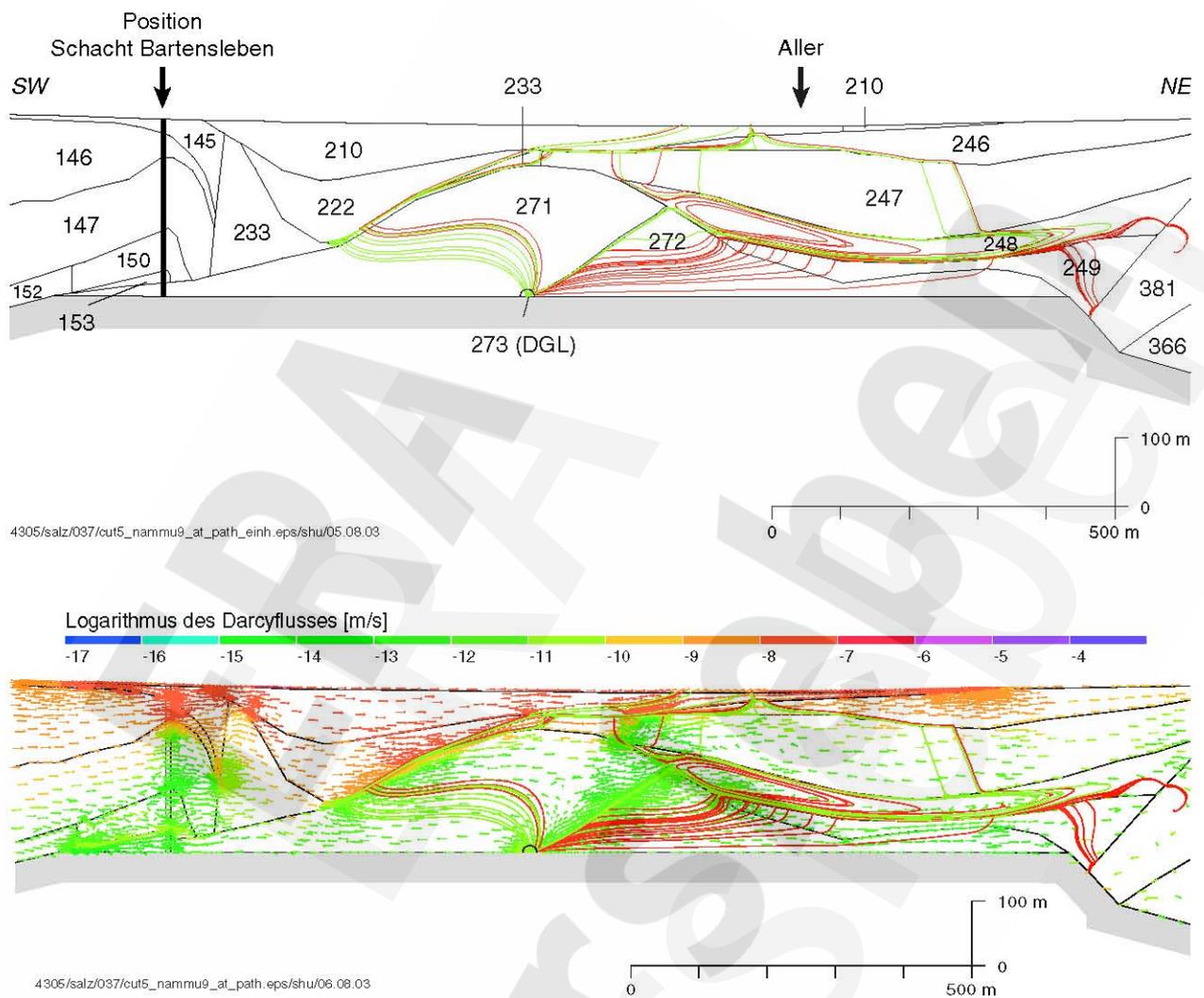
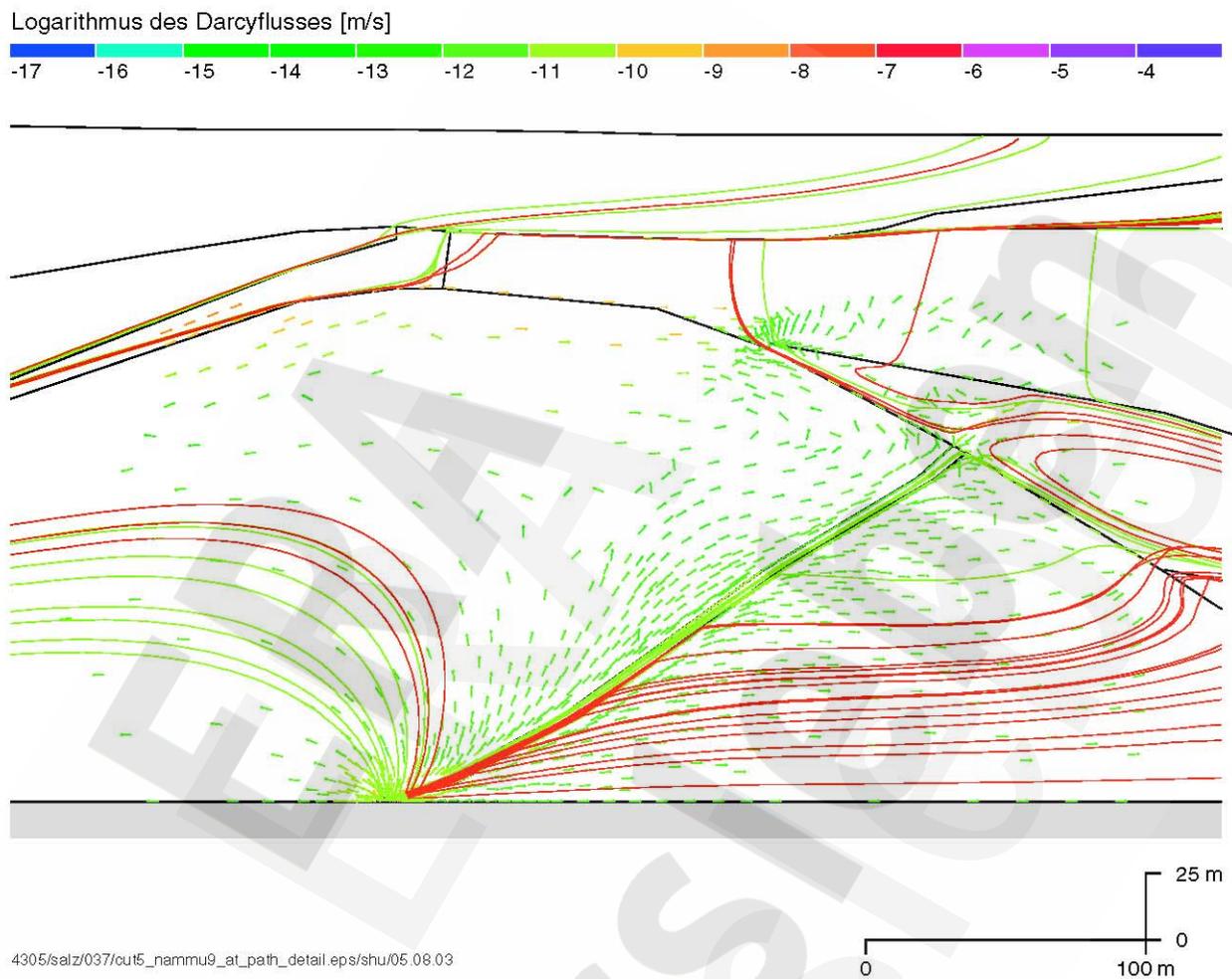


Abbildung 40 Salzwasserrechnung R5-06. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal



Farblegende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 41 Salzwasserrechnung R5-06. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten)



Farblgende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 42 Salzwasserrechnung R5-06. Detail Trajektorien und Darcyfluss

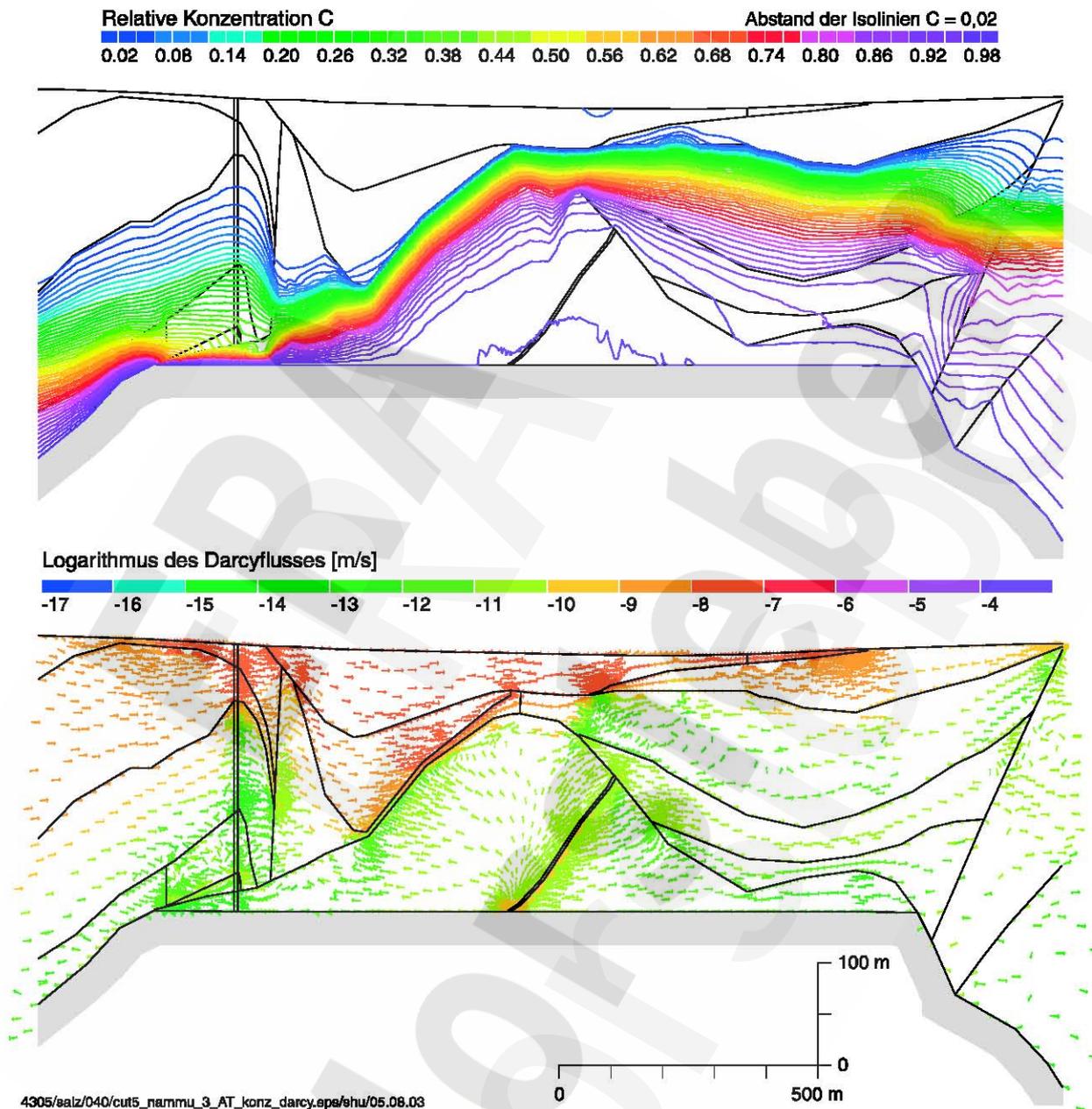
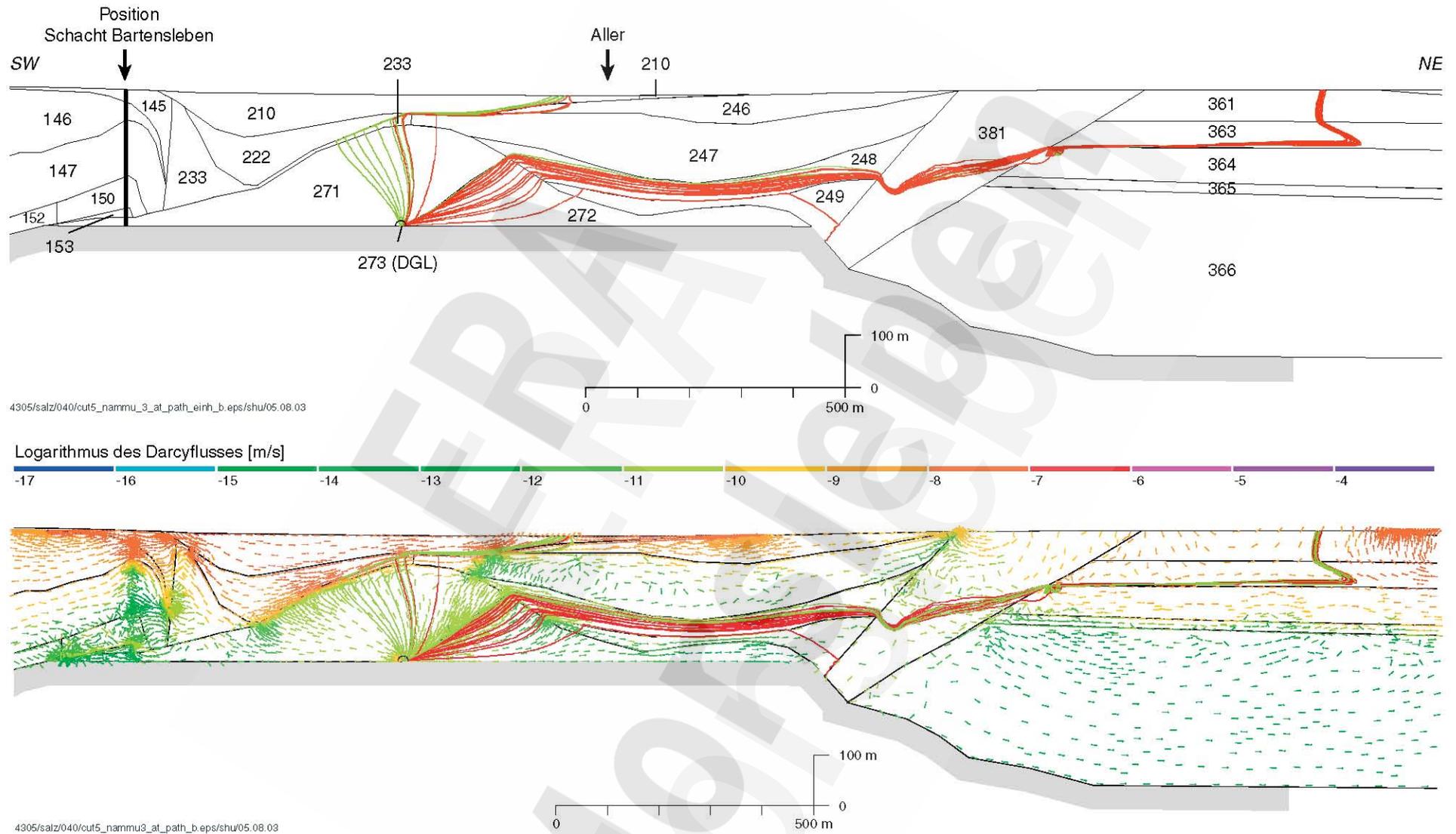
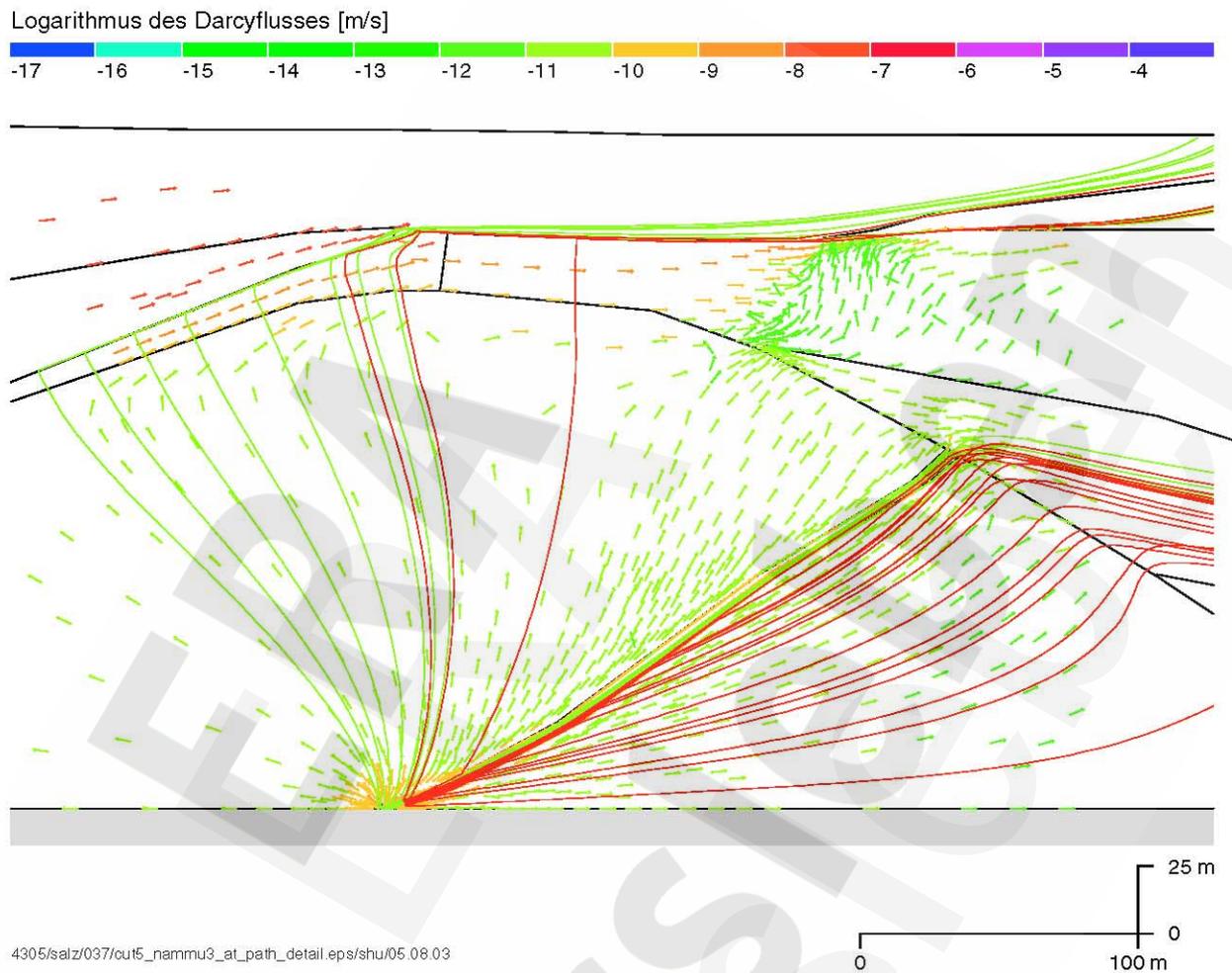


Abbildung 43 Salzwasserrechnung R5-07. Konzentrationsverteilung (oben) und Darcyflüsse (unten) im Allertal



Farblendende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 44 Salzwasserrechnung R5-07. Trajektorien und hydrostratigraphische Einheiten (oben), Trajektorien und Darcyfluss (unten)



Farblende der Trajektorien siehe Abbildung 12

Abbildung 45 Salzwasserrechnung R5-07. Detail Trajektorien und Darcyfluss