

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

## Verfahrensunterlage

**Titel:** Endlager Morsleben  
3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter  
Süßwasserverhältnissen  
Modellaufbau, Modellkalibrierung R42, Rechenfall R43 und Referenzfall R44

**Autor:** Klemenz, W., Klubertanz, G., Oswald, S. & Siegel, P.

**Erscheinungsjahr:** 2001

**Unterlagen-Nr.:** P 144

**Revision:** 00

**Unterlagenteil:**



## ZUSAMMENFASSUNG

W. Klemenz, Dr. G. Klubertanz, Dr. S. Oswald, Dr. P. Siegel

Endlager Morsleben. 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen. Modellaufbau, Modellkalibrierung R42, Rechenfall R43 und Referenzfall R44

Basierend auf der von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erstellten Datengrundlage „Hydrogeologische Modellbildung“ mit dem Kenntnisstand 1997 dokumentiert der vorliegende Bericht die Entwicklung eines geometrisch komplexen dreidimensionalen hydrogeologischen Modells vom Untergrund des Grundwassereinzugsgebietes am Standort des Endlagers Morsleben, die Umwandlung des hydrogeologischen Modells in eine äquivalente Finite-Elemente-Diskretisierung (3D Süßwassermodell ERAM), die Rechnungen R42 zur Kalibrierung der Durchlässigkeitsverteilung und die Ergebnisse von zwei Simulationsrechnungen R43 und R44 für die Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserbedingungen.

Die vorgestellten Auswertungen und Schlußfolgerungen basieren auf Modellrechnungen zum Rechenfall R43, der die heutigen hydrogeologischen Verhältnisse mit Grundwasserentnahmen nachbildet und dem sogenannten Referenzfall R44, in dem keine Grundwasserentnahme im Brunntal erfolgt. Ziele der durchgeführten 3D Süßwassermodellierung sind die Beschreibung des regionalen Grundwasserfließsystems und die Ermittlung der Fließwege (Länge, Geschwindigkeit, Zeit und Austrittsorte) durch reine Advektion.

Das berechnete Potentialfeld beider Rechenfälle ist charakterisierbar durch ein von den Erhebungen des Lappwalds und der Weferlinger Triasplatte quer zum Allertal gerichtetes Grundwasserfließfeld. Unterhalb der Aller besteht ein vorwiegend vertikal aufwärts gerichteter Potentialgradient. Die Grundwasserentnahme aus dem Jura und Rhät und die mehrfache Wechsellaagerung von Aquitarden und Aquiferen hat eine komplexe Charakteristik des Potentialfeldes der Lappwaldmulde zur Folge. Im Referenzfall R44, ohne Grundwasserentnahme im Brunntal, steigt der Grundwasserspiegel in der Umgebung des Brunntals teilweise bis zur Geländeoberfläche an. Auf die Potentialverteilung im Allertal und in der Triasplatte hat die Grundwasserentnahme keinen Einfluß.

Die berechneten Partikelpfade ab Startpunkten 5 m über der Basis des Hutgesteins zur Biosphäre enden größtenteils innerhalb des Potentialminimums, das den Verlauf der Aller begleitet. Weitere Trajektorien gelangen im Potentialminimum entlang des Lappwaldes (Oberkreide, Jura) an die Modelloberfläche.

Infolge der Abhängigkeit der Partikelpfadlänge von der Lage der Potentialminima ergeben sich für die im Hutgestein unterhalb der Aller und entlang des Lappwaldes liegenden Startpunkte minimale Partikelpfadlängen bis 500 m. Südlich des Salzbaches weisen die Trajektorien mit Startpunkten an der südwestlichen bzw. nordöstlichen Verbreitungsgrenze des Hutgesteins Partikelpfadlängen bis rund 1000 m auf. Nördlich des Salzbaches nimmt – infolge der Verlagerung der Aller an den östlichen Rand der Talsohle – die Pfadlänge der Partikel mit Startpunkten entlang des Lappwaldes bis auf rund 2000 m zu.

Die berechneten mittleren Abstandsgeschwindigkeiten weisen im allgemeinen Werte unter 0,01 m/a auf. Startpunkte von Partikelpfaden mit mittleren Abstandsgeschwindigkeiten bis 0,017 m/a befinden sich im Gebiet der Einmündung des Mühlengrabens bzw. des Hauptgrabens in die Aller sowie nahe der nördlichen Modellgrenze in Gebieten, in denen die Partikelpfade über eine anteilmäßig große Strecke in der relativ gut durchlässigen Einheit A9-K2/246 verlaufen.

Andererseits werden westlich von Schwanefeld in einem Gebiet mit einem Verlauf der Partikelpfade über längere Strecken im geringdurchlässigen oberen Gipskeuper A10/247, geringe mittlere Geschwindigkeiten (weniger als 0,004 m/a) und hohe Fließzeiten berechnet.

Die Verteilung der Fließzeiten ist jener der mittleren Abstandsgeschwindigkeiten ähnlich. Es läßt sich eine Zonierung der Fließzeiten parallel zur Aller erkennen: die geringsten Fließzeiten (10'000 bis 100'000 Jahre) weisen Trajektorien mit Startpunkten in der Nähe der Aller auf; für die weiter von der Aller entfernt liegenden Startpunkte betragen die Fließzeiten zwischen 100'000 und über 300'000 Jahren. Noch längere Fließzeiten (300'000 bis 1'000'000 Jahre) werden in einem SW-NE verlaufenden Gebietstreifen westlich von Schwanefeld berechnet.

Die Gebiete geringer Ausdehnung mit Fließzeiten zwischen 10'000 und 50'000 Jahren befinden sich entlang des Lappwaldes und vor allem in drei Abschnitten, in denen die Aller entlang der Weferlinger Triasplatte verläuft. Die in diesen Gebieten berechneten Fließzeiten verteilen sich etwa zu 2/5 auf 30'000 Jahren und zu 3/5 auf Fließzeiten zwischen 30'000 und 50'000 Jahren.

Durch die Mitberücksichtigung in der Auswertung der in der Nähe der Modelloberfläche oszillierenden Fließpfade resultieren insgesamt in den Trajektorien tendenziell geringe Fließpfadlängen und Fließzeiten. Die dargestellten Resultate der Trajektorienrechnungen sind daher in ihrer Tendenz eher als konservativ zu bewerten.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>Verzeichnis der Anhänge</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>14</b>
1.1 Zielsetzungen.....	14
1.2 Berichtaufbau.....	15
<b>2 Überblick über das Untersuchungsgebiet</b> .....	<b>16</b>
2.1 Lage des Untersuchungsgebiets .....	16
2.2 Hydrogeologischer Aufbau des Untersuchungsgebiets.....	16
2.2.1 Allertalzone .....	16
2.2.2 Lappwaldscholle .....	17
2.2.3 Weferlinger Triasplatte.....	18
<b>3 Entwicklung des hydrogeologischen Modells und Aufbau des 3D Finite Elemente Modells</b> 19	<b>19</b>
3.1 Geologische Datengrundlage .....	19
3.2 Sichtung und Übernahme der geologischen Datengrundlage.....	20
3.2.1 Grundwasseroberfläche .....	20
3.2.2 Tiefenlinienpläne.....	20
3.2.3 Bohrungen .....	20
3.2.4 Modifikation von Tiefenlinienplänen .....	21
3.2.5 Auswahl und Konstruktion relevanter Störungen .....	22
3.3 Aufbau des 3D hydrogeologischen Modells .....	23
3.3.1 Horizontalprojektion der Körperkanten .....	23
3.3.2 Volumenelemente in Teilgebieten .....	24
3.3.3 Primäre Triangulation .....	24
3.3.4 Sekundäre Triangulation .....	25
3.4 Aufbau des 3D Finite Elemente Modells .....	25
3.4.1 Überblick.....	25
3.4.2 Finite-Elemente-Diskretisierung in Teilgebieten.....	26
3.4.3 Vereinigung der Finite-Elemente-Diskretisierung aller Teilgebiete .....	27
3.4.4 Geometrische und hydrogeologische Vereinfachungen des Modells .....	28
3.4.5 Dokumentation des 3D Süßwassermodells ERAM.....	29
<b>4 Modellkalibrierung</b> .....	<b>30</b>
4.1 Datengrundlage .....	30
4.1.1 Flächenhafte Grundwasserneubildung.....	30
4.1.2 Im Modellgebiet betriebene Brunnen.....	34
4.1.3 $k_f$ -Werte und Porosität .....	34
4.1.4 Grundwasserpotentiale.....	36
4.2 Modellkonzept und Randbedingungen .....	37
4.2.1 Einleitung .....	37
4.2.2 Modellkonzept freie Grundwasseroberfläche, Rechenprogramm .....	38
4.2.2.1 Konvergenzkriterium .....	39
4.2.2.2 Verwendetes Programm .....	39
4.2.3 Randbedingungen für die vertikalen Modellränder und die Modellbasis.....	39
4.2.3.1 Undurchlässige Modellränder.....	39
4.2.3.2 Möglichkeit eines seitlichen Zuflusses im Allertal .....	40
4.2.3.3 Randzufluß Lappwald.....	40
4.2.4 Randbedingungen an der Modelloberfläche .....	41

4.2.4.1	Flächenhafte Grundwasserneubildung .....	41
4.2.4.2	Festpotentiale .....	41
4.2.4.3	2D Verteilschicht und ihre Wirkungsweise .....	41
4.2.5	Grundwasserentnahme im Brunnental .....	44
4.2.5.1	Überblick über die Modellierung der Entnahmebrunnen.....	44
4.2.5.2	Entnahmeknoten .....	45
4.2.5.3	Modellierung der Brunnen Quellenhof und Brunnen 8.....	45
4.2.5.4	Verteilung der Entnahme auf hydrostratigraphische Einheiten.....	46
4.2.5.5	Anpassungen im Brunnental .....	46
4.2.6	Schächte Bartensleben und Marie .....	47
4.3	Kalibrierungskonzept und Umsetzung in den Kalibrierungsrechnungen.....	48
4.3.1	Variablen und Vergleichswerte für die Kalibrierung .....	48
4.3.1.1	Variablen .....	48
4.3.1.2	Vergleichswerte .....	48
4.3.2	Definition der Zielfunktion .....	49
4.3.3	Variablen.....	50
4.3.3.1	$k_f$ -Werte der hydrostratigraphischen Einheiten .....	50
4.3.3.2	Randzufluß im Lappwald.....	50
4.3.3.3	2D Verteilschicht .....	51
4.3.4	Vergleichspunkte für Potentiale.....	51
4.3.4.1	Bewertung der Abweichungen zwischen Meß- und Rechenwerten.....	52
4.3.4.2	Vergleichswerte für die Kalibrierungsrechnungen.....	54
4.3.4.3	Nichtberücksichtigung von Meßstellen, Modifikationen .....	55
4.3.4.4	Überblick über die 180 Vergleichspunkte.....	57
4.4	Ausführung der Kalibrierungsrechnungen .....	58
4.4.1	Vorkalibrierung (Phase A) .....	59
4.4.1.1	Sensitivität .....	59
4.4.1.2	Entwicklung der Zielfunktion und der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert.....	59
4.4.2	Kalibrierungsrechnungen R42 Phase B .....	60
4.4.2.1	Sensitivitätsrechnungen R42 Phase B.....	60
4.4.2.2	Durchführung der Rechnungen R42 Phase B.....	60
4.4.2.3	Entwicklung der Zielfunktion bzw. der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert.....	60
4.4.3	Untersuchung der Auswirkungen eines offenen Modellrandes in Quartär und Oberkreide des Allertals .....	61
4.5	Ergebnisse der Kalibrierung .....	62
4.5.1	Variablen.....	62
4.5.1.1	$k_f$ -Verteilung.....	62
4.5.1.2	Randzufluß im Lappwald.....	63
4.5.1.3	Transmissivität der 2D Verteilschicht .....	63
4.5.2	Vergleich der Rechenresultate R42 mit den Meßwerten.....	63
4.5.2.1	Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Potentialen .....	63
4.5.2.2	Grundwasseroberfläche, In- und Exfiltration .....	66
4.5.3	Vorschlag eines Datensatzes .....	66
<b>5</b>	<b>Rechenfall R43 (heutige Verhältnisse) .....</b>	<b>67</b>
5.1	Einleitung .....	67
5.2	Potentialverteilung .....	67
5.2.1	Grundwasseroberfläche .....	68
5.2.2	Potentialverteilung entlang Schnitten und Basisflächen hydrostratigraphischer Einheiten im Lappwald .....	69
5.2.2.1	Vertikalschnitte .....	69
5.2.2.2	Basisflächen hydrostratigraphischer Einheiten .....	69
5.3	Berechnete Grundwasserflüsse im Lappwald .....	70
5.4	Berechnete In- und Exfiltrationen .....	71
5.4.1	In- und Exfiltration (Gesamtbilanz) .....	72
5.4.2	„Tiefensickerung“ .....	73

5.5	Abklärung des Einzugsgebietes des Brunnens 8 mit Trajektorienrechnungen .....	73
<b>6</b>	<b>Rechenfall R44 (Referenzfall, ohne Grundwasserentnahme) .....</b>	<b>75</b>
6.1	Einleitung .....	75
6.2	Darstellung der Ergebnisse .....	75
6.3	Potentialverteilung .....	76
6.3.1	Grundwasseroberfläche .....	76
6.3.2	Potentialverteilung entlang Vertikalschnitten quer zum Allertal.....	78
6.3.2.1	Lappwald .....	78
6.3.2.2	Weferlinger Triasplatte .....	79
6.3.2.3	Allertal.....	79
6.3.3	Potentialverteilung entlang Längsschnitten parallel des Allertals .....	80
6.3.4	Potentialverteilung entlang Basisflächen von Einheiten.....	80
6.3.5	Unterschiede in der Potentialverteilung der Rechenfälle R43 und R44 .....	82
6.4	Berechnete Grundwasserflüsse.....	82
6.4.1	Schnitte.....	82
6.4.2	Basisflächen hydrostratigraphischer Einheiten .....	84
6.5	Berechnete In- und Exfiltrationen .....	86
6.5.1	„Gesamtumsatz“ .....	87
6.5.2	„Tiefensickerung“.....	87
6.5.2.1	Weferlinger Triasplatte .....	87
6.5.2.2	Allertal.....	88
6.5.2.3	Lappwald .....	88
6.5.3	Auswirkung der Grundwasserentnahme im Rechenfall R43.....	89
6.6	Trajektorienrechnungen.....	90
6.6.1	Startpunkte, Rechenprogramm .....	90
6.6.2	Statistik der Trajektorien.....	91
6.6.2.1	Geometrie der Partikelpfade .....	92
6.6.2.2	Partikelpfadlänge, mittlere Abstandsgeschwindigkeiten und Fließzeiten .....	93
<b>7</b>	<b>Schlußfolgerungen .....</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>Tabellen.....</b>	<b>99</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungen .....</b>	<b>130</b>
<b>11</b>	<b>Anhänge.....</b>	<b>211</b>
	<b>Gesamtseitenzahl.....</b>	<b>233</b>

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1	Aktive Brunnen im Modellgebiet der Wasserwerke Helmstedt und Beendorf. Entnahmemengen und Entnahmehorizonte – Vorgaben.....	100
Tabelle 2	Rechenfälle R42 und R43, Grundwasserentnahme im Brunnental. Vorgaben und Modellierung.....	101
Tabelle 3	Rechenfälle R42 und R43. Grundwasserentnahme im Brunnental. Details der Modellierung.....	102
Tabelle 4	Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Lappwaldmulde.....	103
Tabelle 5	Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Allertalzone.....	104
Tabelle 6	Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Weferlinger Triasplatte...	105
Tabelle 7	Kalibrierungsrechnungen R42. Randzuflüsse im Lappwald .....	106
Tabelle 8	Kalibrierungsrechnungen R42. Transmissivität der 2D Verteilschicht.....	106
Tabelle 9	Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale.....	107
Tabelle 10	Überblick über die Vergleichspunkte.....	115
Tabelle 11	Kalibrierungsrechnungen R42: Entwicklung der Zielfunktion und der mittleren Abweichungen Meßwert-Rechenwert.....	116
Tabelle 12	Rechenfälle R43, R44. Abschätzung des Grundwasserzu- bzw. -abstroms durch die Schnittflächen des Quartär (A1-A4) und der Oberkreide (A5, A6) mit den vertikalen Modellrändern im Allertal (Süd- und Nordrand) .....	116
Tabelle 13	Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion.....	117
Tabelle 14	Kalibrierungsrechnungen R42. Verteilung der Abweichungen Meßwert-Rechenwert auf die Einheiten Lappwald, Allertal und Triasplatte.....	124
Tabelle 15	R42 (1022 Iterationen). Vergleichspunkte mit Beiträgen zur Zielfunktion $\geq 16$ m <sup>2</sup> bzw. Abweichung $ \text{Meßwert-Rechenwert}  \geq 4,0$ m.....	125
Tabelle 16	Rechenfälle R43 und R44. Grundwasserhöhen im oberflächennahen Grundwasser und in Aquiferen des Lappwaldes .....	126
Tabelle 17	Rechenfälle R43 und R44. Potential in den Entnahmeknoten der Brunnen.....	127
Tabelle 18	Bilanzierung des Wasserflusses im 3D Süßwassermodell. Vorgaben und Resultate der Rechenfälle R43 und R44 .....	128
Tabelle 19	Rechenfälle R43 und R44. Mit FED berechnete Bilanz der Modellflüsse durch den 3D Modelluntergrund („Tiefensickerung“).....	129

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Geographischer Überblick über das Modellgebiet, Lage des 3D Finite-Elemente-Modells und des Grubengebäudes ERAM (gelb) .....	131
Abbildung 2	Strukturgeologische Übersichtskarte mit Modellgebiet ERAM (aus [12]) .....	132
Abbildung 3	Überblick über die hydrostratigraphischen Einheiten im Modellgebiet und die geometrischen Flächen für das hydrogeologische Modell .....	133
Abbildung 4	Hydrostratigraphische Gliederung der Lappwaldscholle .....	134
Abbildung 5	Hydrostratigraphische Gliederung der Allertalzone .....	135
Abbildung 6	Hydrostratigraphische Gliederung der Triasplatte .....	136
Abbildung 7	Tiefenlinienplan der Basis Oberkreide (Ausschnitt) gemäß der Datengrundlage BGR und Umriß Grubengebäude ERAM (grau) .....	137
Abbildung 8	Auf der Grundlage von Abbildung 7 extrapolierter Tiefenlinienplan der Basis Oberkreide und Bohransatzpunkte (Ausschnitt). Der Kontakt zur Quartärbasis bzw. Modelloberfläche entspricht dem Verlauf der blauen Linie .....	138
Abbildung 9	Durchtrennungsfläche (schraffiert) des Schilfsandstein durch die listrische Störung des Brunntals (nördlicher Ast) und Tiefenlinien der Basisfläche des Schilfsandstein (braun) .....	139
Abbildung 10	Tiefenlinienplan des nördlichen Astes der Brunntalstörung .....	140
Abbildung 11	Einteilung des Modellgebiets in Teilgebiete .....	141
Abbildung 12	Schematische Darstellung zum Aufbau des dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells .....	142
Abbildung 13	Verbreitungsgrenzen bzw. Körperkanten der hydrostratigraphischen Modelleinheiten im Modellgebiet .....	143
Abbildung 14	Primäre 2D Triangulation als Grundlage zum Modellaufbau (Oberflächen-elementnetz) .....	144
Abbildung 15	Schematische Darstellung zur Methode der Konstruktion von Volumenelementen mit „Surface Handling“ auf der Grundlage einer primären und mehrerer sekundärer Triangulationen geologischer Strukturflächen (Vertikalprofil) .....	145
Abbildung 16	Modellaufbau an Störungsversätzen: Schematische perspektivische Darstellung zur Funktion der Programme <i>join_block</i> und <i>split</i> - Vereinigung der FE-Diskretisierung der blauen (vorne) und schwarzen (hinten) Teilgebiete ohne Kantenkreuzung: a) Darstellung der modifizierten Versatzfläche zwischen den Teilgebieten. b) Spaltung der Elemente im schwarzen Teilgebiet. c) Spaltung der Elemente im blauen Teilgebiet .....	146
Abbildung 17	Modellaufbau an Störungsversätzen: Schematische perspektivische Darstellung zur Funktion der Programme <i>join_block</i> und <i>split</i> - Vereinigung der FE-Diskretisierung der blauen (vorne) und schwarzen (hinten) Teilgebiete mit Kantenkreuzung. a) Darstellung der Versatzfläche zwischen den Teilgebieten. b, c) Verschiebung der Kantenkreuzung in eine bereits existierende Knotenkolonne .....	147
Abbildung 18	Modellaufbau an Störungsversätzen: Schematische perspektivische Darstellung zur Funktion der Programme <i>join_block</i> und <i>split</i> - Vereinigung der FE-Diskretisierung der blauen (vorne) und schwarzen (hinten) Teilgebiete mit Kantenkreuzung. a) Darstellung der modifizierten Versatzfläche zwischen den Teilgebieten. b) Spaltung der Elemente im schwarzen Teilgebiet. c) Spaltung der Elemente im blauen Teilgebiet .....	148
Abbildung 19	Farblegende zu Abbildung 20 und Abbildung 21 .....	149
Abbildung 20	3D Süßwassermodell ERAM. Schräge Aufsicht auf das 3D Modell ERAM - alle hydrostratigraphische Modelleinheiten (Farblegende siehe Abbildung 19) .....	150



Abbildung 21	3D Süßwassermodell ERAM. Perspektivische schräge Aufsicht aus SE auf 9 Serienschnitte (Abstand der Gitterlinien 1 km, Streichrichtung der Serienschnitte SW-NE (Farblegende siehe Abbildung 19) .....	151
Abbildung 22	3D Süßwassermodell ERAM. Hydrogeologischer Aufbau der Modelloberfläche mit Angabe der K-Klassen und Lage der Schnitte 1 bis 10 sowie der Entnahmebrunnen .....	152
Abbildung 23	3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 1 bis 7 quer zum Allertal .....	153
Abbildung 24	3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 8 bis 10 parallel des Allertals.....	154
Abbildung 25	3D Süßwassermodell ERAM. Verbreitung der Einheiten L3/142/Mittelrhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte) mit Höhenlinien der jeweiligen Basisfläche .....	155
Abbildung 26	3D Süßwassermodell ERAM. Verbreitung der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte) mit Höhenlinien der Basisfläche .....	156
Abbildung 27	3D Süßwassermodell ERAM. Verbreitung der Einheiten L8/150-151-152/Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte) mit Höhenlinien der Basisfläche .....	157
Abbildung 28	Flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildung (mm/a) im Modellgebiet ERAM, berechnet mit GWD ([12], Abbildung 4.14).....	158
Abbildung 29	Schematische Darstellung zur Anpassung der Modellgeometrie an die Grundwasseroberfläche.....	159
Abbildung 30	Digitales Geländemodell.....	160
Abbildung 31	Flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet ERAM nach [12], Abbildung 4.14 (vgl. Abbildung 28) nach erfolgtem Übertragen auf die Finite-Elemente-Diskretisierung mit Kriging. Vorgabe für den Rechenfall R44 .....	161
Abbildung 32	Flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet ERAM nach Kriging und Anpassungen im Brunnental. Vorgabe für die Rechenfälle R42 und R43.....	162
Abbildung 33	Schematische Darstellung zur Funktion der 2D Oberflächenelemente als Verteilschicht der vorgegebenen Grundwasserneubildung .....	163
Abbildung 34	Schematische Darstellung der Wirkungsweise der 2D Verteilschicht in den Berechnungen mit freier Oberfläche .....	163
Abbildung 35	Berechnung der Flüsse in den Knoten entlang der Modelloberfläche. (a) Normaler Grundwasserneubildungsknoten, (b) Exfiltrationsknoten.....	164
Abbildung 36	Grundwasserentnahme Brunnental. Geographische Verteilung der Entnahmeknoten.....	165
Abbildung 37	Verbreitungsgebiet der Einheiten L3a/141, L3/142, L5-K2/144, L5-K1/145 im Lappwald und Detailskizze des Entnahmebereiches des Brunnens 8 .....	166
Abbildung 38	Gewichtung der Zielfunktion $w$ in Abhängigkeit der Grundwasserdichte $d$ .....	167
Abbildung 39	Rechenfälle R42, R43. Lokalisation der Abschnitte mit Randzufluß im Lappwald (Abschnitte Süd, Mitte, Nord) und Zonierung der 2D Verteilschicht .....	168
Abbildung 40	Rechenfälle R42, R43. Randzufluß im Lappwald. Aufsicht auf den westlichen Modellrand mit den Zuflußabschnitten Süd, Mitte und Nord in den Aquiferen L3/142 (oben) und L5-K2/144 (unten).....	169
Abbildung 41	Hydrogeologischer Übersichtsplan des Modellgebietes mit den Vergleichspunkten der Kalibrierungsrechnungen R42.....	170

Abbildung 42	Kalibrierungsrechnungen R42, Iterationen 1 bis 43, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die Zielfunktion.....	171
Abbildung 43	Kalibrierungsrechnungen R42, Iterationen 1 bis 43, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert .....	171
Abbildung 44	Kalibrierungsrechnungen R42 (Phase B), Iterationen 544 bis 586, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die Zielfunktion .....	172
Abbildung 45	Kalibrierungsrechnungen R42 (Phase B), Iterationen 544 bis 586, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert.....	172
Abbildung 46	Kalibrierungsrechnungen R42. Entwicklung der Zielfunktion und Beiträge der einzelnen Meßstellen.....	173
Abbildung 47	Kalibrierungsrechnungen R42. Entwicklung der Abweichung Meßwert-Rechenwert und Veränderung an den einzelnen Meßstellen .....	174
Abbildung 48	Kalibrierungsrechnungen R42. Entwicklung der kalibrierten Variablen ( $k_f$ -Werte, Randzuflüsse Lappwald und T-Werte der 2D Verteilschicht) .....	175
Abbildung 49	Kalibrierungsrechnungen R42, Iteration 1022. Vergleichspunkte mit Beiträgen zur Zielfunktion von 16 m <sup>2</sup> und mehr (Abweichung  Meßwert-Rechenwert  $\geq 4,0$ m) .....	176
Abbildung 50	Rechenfall R43. Berechnete Grundwasseroberfläche.....	177
Abbildung 51	Rechenfall R43. Verteilung der Exfiltrationsknoten (grüne Kreuze).....	178
Abbildung 52	Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Schnitte 1 bis 7 quer zum Allertal .....	179
Abbildung 53	Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Schnitte 8 bis 10 parallel des Allertals .....	180
Abbildung 54	Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L3/142/Mittelrhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte).....	181
Abbildung 55	Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte) .....	182
Abbildung 56	Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L8/150-151-152/Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte).....	183
Abbildung 57	Rechenfall R43. Darcyfluß entlang der Schnitte 1, 2, 3 und 5 quer zum Allertal und der Schnitte 9 und 10 parallel des Allertals.....	184
Abbildung 58	Rechenfall R43. Darcyfluß entlang der Basis der Einheit L3/142/Mittelrhät-Sandstein (Lappwald).....	185
Abbildung 59	Rechenfall R43. Darcyfluß entlang der Basis der Einheit L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) .....	186
Abbildung 60	Rechenfall R43. Infiltrationen.....	187
Abbildung 61	Rechenfall R43. Exfiltrationen.....	188
Abbildung 62	Rechenfall R43, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten im Absenktrichter von Brunnen 8. Verteilung der Startpunkte.....	189
Abbildung 63	Rechenfall R43, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten im Absenktrichter von Brunnen 8. Aufsicht auf die Fließwege mit Startpunkten auf 97 mNN (oben) und 70 mNN (unten) .....	190
Abbildung 64	Rechenfall R44. Berechnete Grundwasseroberfläche.....	191
Abbildung 65	Rechenfall R44. Verteilung der Exfiltrationsknoten (grüne Kreuze).....	192
Abbildung 66	Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Schnitte 1 bis 7 quer zum Allertal .....	193

Abbildung 67	Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Schnitte 8 bis 10 parallel des Allertals.....	194
Abbildung 68	Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L3/142/ Mittelrhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte).....	195
Abbildung 69	Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte) .....	196
Abbildung 70	Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L8/ 150-151-152/Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte).....	197
Abbildung 71	Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Schnitte 1, 2, 3 und 5 quer zum Allertal und der Schnitte 9 und 10 parallel des Allertals.....	198
Abbildung 72	Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Basis der Einheiten L3/142/ Mittelrhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte).....	199
Abbildung 73	Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Basis der Einheiten L5/144-145/ Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte) .....	200
Abbildung 74	Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Basis der Einheiten L8/150-151-152/ Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte).....	201
Abbildung 75	Rechenfall R44. Infiltrationen.....	202
Abbildung 76	Rechenfall R44. Exfiltrationen.....	203
Abbildung 77	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Verteilung der Startpunkte.....	204
Abbildung 78	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Horizontalprojektion der Partikelpfade mit Einfärbung der Pfade entsprechend der durchwanderten hydrostratigraphischen Einheit.....	205
Abbildung 79	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Vertikalprojektion der Partikelpfade in die Schnitte 1 bis 7....	206
Abbildung 80	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Darstellung der hydrostratigraphischen Einheit am Partikelpfadende am Startpunkt des Partikelpfades.....	207
Abbildung 81	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Länge der Partikelpfade zwischen Startpunkt und Modelloberfläche.....	208
Abbildung 82	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Durchschnittliche Abstandsgeschwindigkeit der Partikelpfade zwischen Startpunkt und Modelloberfläche.....	209
Abbildung 83	Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Fließzeit der Partikelpfade zwischen Startpunkt und Modelloberfläche .....	210

**VERZEICHNIS DER ANHÄNGE**

Anhang 1      Dokumentation des 3D Süßwassermodells ERAM ..... 211

ERA  
ERA  
Morsleben

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

2D, 3D	zweidimensional, dreidimensional
A <sub>z</sub>	Zwischenabfluß
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CBIL	Circumferential Borehole Imaging Log (Bohrlochfernsehen)
CGM	FE Computer-Programm „Colenco Groundwater Model“ zur stationären Berechnung der Grundwasserströmung
DGL	Schichtenfolge Deckanhydrit / Grauer Salzton / Leine-Karbonat
Dp Mors	Deponie-Erkundungsbohrung Morsleben
FE	Finite Elemente
ERAM	Endlager radioaktiver Abfälle Morsleben
EZG	Einzugsgebiet
FED	Final Elemente Display, Programm zur Darstellung der FE Rechenergebnisse
FSCGM	FE Computer-Programm Free Surface Colenco Groundwater Model zur instationären Berechnung der Grundwasserströmung mit freier Oberfläche
FWH	Fresh Water Head, äquivalentes Süßwasserpotential
GFE	Geologische Forschung und Erkundung GmbH, Halle
GOK	Geländeoberkante
GIS	Geographisches Informations-System
GSIS	Computer-Programm „GeoScientific Information System“ zur Berechnung
GWD	Computer-Programm „Grundwasserdargebot“ zur Berechnung der Grundwasserneubildung
GWM	Grundwassermeßstelle(n)
GWN	Grundwasserneubildung, Grundwasserneubildungsrate
Hy Beo	hydrogeologische Bohrung Beendorf
Hy Hmt	hydrogeologische Bohrung Helmstedt
Hy Mors	hydrogeologische Bohrung Morsleben
k <sub>f</sub>	Durchlässigkeitsbeiwert, m/s
K-Klasse	Materialindex in den Programmen CGM und FSCGM zur Zonierung der hydraulischen Leitfähigkeit
MoMNQ	Monatlicher Niedrigwasserabfluß, niedrigster Abflußwert im Monat
MS	Microsoft
NASIM	Computer-Programm zur Niederschlags-Abfluß-Simulation
NN	Normaler Nullpunkt (Pegel Amsterdam)
Q	Durchflußrate, m <sup>3</sup> /s
Q-Klassen	Materialindex in den Programmen CGM und FSCGM zur Vorgabe eines Wasserflusses
StAU	Staatliches Amt für Umwelt, Magdeburg
T	Transmissivität, m <sup>2</sup> /s
WW	Wasserwerk
ρ	Grundwasserdichte, g/cm <sup>3</sup>

# 1 Einführung

Basierend auf dem "Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren" (Atomgesetz AtG) ist das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständig und hat damit den Sicherheitsnachweis für seine Projekte zu erbringen. Für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) hat das BfS Unterlagen für ein Planfeststellungsverfahren zu erstellen.

Die Erstellung des Sicherheitsnachweises für das Planfeststellungsverfahren beruht unter anderem auf hydrogeologischen Modellrechnungen, welche die Grundlage für die Ermittlung der potentiellen Radionuklidenausbreitung und der Dosisbelastung bilden. Die Modellierung erfolgt in verschiedenen Stufen, wobei die späteren von früheren Bearbeitungsschritten abhängen:

1. 3D Süßwasser-Modellrechnungen mit Ermittlung der Fließwege (Länge, Geschwindigkeit, Zeit, Austrittsorte) durch reine Advektion. Ziel dieser Rechnungen ist die Charakterisierung des regionalen Grundwasserflusses im Projektgebiet und die Charakterisierung der wichtigsten Fließwege unter Süßwasserbedingungen.
2. 2D Salzwasser-Modellrechnungen mit variabler Dichte unter Berücksichtigung von Advektion, Dispersion und Diffusion. Ziel der Rechnung ist die Ermittlung des Grundwasserflusses zwischen dem Wirtgestein und der Biosphäre unter Berücksichtigung des Dichteeinflusses des salzhaltigen Grundwassers.
3. 1D bzw. 2D Radionuklid-Transportrechnungen mit Berücksichtigung von Advektion, Dispersion, Sorption und radioaktivem Zerfall. Ziel ist die Ermittlung der Transportzeit von Radionukliden bis in oberflächennahe Aquifere (= "Biosphäre") und die dabei vorliegende Radionuklidkonzentration für das Referenz- und alternative Szenarien. Berechnung der transversalen Dispersion, respektive Verdünnung der Schadstofffrachten in oberflächennahen Aquiferen.

Die Untersuchung der Grundwasserbewegung und des Radionuklidtransports in der Geosphäre ist ein wesentlicher Bestandteil der Analyse der Langzeitsicherheit für das ERAM.

## 1.1 Zielsetzungen

Der vorliegende Bericht soll die regionale Grundwasserströmung im Deckgebirge im Grundwassereinzugsgebiet des Endlagers Morsleben unter Süßwasserbedingungen mit einem 3D Grundwassermodell charakterisieren.

Er dokumentiert die dabei durchgeführten Arbeiten, welche die Auswertung der aktuellen Datenbasis für das Hutgestein und das Deckgebirge<sup>(1)</sup> ERAM, den Aufbau und die Entwicklung des hydrogeologischen Modells, den Aufbau des 3D Süßwassermodells, dessen Kalibrierung, die Charakterisierung der heutigen Grundwasser-

---

<sup>1</sup> Vorliegend wird der Begriff „Deckgebirge“ vereinfachend für das (post-zechsteinzeitliche) Deckgebirge inklusive Hutgestein verwendet.

fließverhältnisse im Modellgebiet und abschließend jene, die sich ohne Grundwasserentnahme im Modellgebiet ergeben würden, beinhalten.

## **1.2 Berichtaufbau**

In Kap. 2 sollen die Lage, die Ausdehnung und der hydrogeologische Aufbau des Untersuchungsgebietes kurz beschrieben werden. In Kap. 3 werden die Entwicklung des hydrogeologischen Modells und der Aufbau des 3D Finite Elemente Modells dargestellt. Die Kalibrierungsrechnungen R42 werden in Kap. 4 behandelt. Die Modellrechnungen zur Charakterisierung der Fließverhältnisse im Untersuchungsgebiet mit den kalibrierten Variablen sind Thema der Kapitel 5 und 6. Dabei werden in Kap. 5 als Rechenfall R43 die heutigen Verhältnisse, in Kap. 6 jene, wie sie sich im Referenzfall R44 ohne Grundwasserentnahme im Brunntal einstellen werden, dokumentiert. Kap. 7 enthält die Zusammenfassung und Schlußfolgerungen zu den durchgeführten Rechnungen.

## 2 Überblick über das Untersuchungsgebiet

### 2.1 Lage des Untersuchungsgebiets

Das weitere Untersuchungsgebiet befindet sich auf dem Kartenblatt 1:100'000 Helmstedt (Blatt C3930). Der Projektstandort des ERAM wird von SSE nach NNW von der Aller durchflossen und auf der Westseite von einem sanften, meist bewaldeten, sich noch weiter nach NW fortsetzenden Höhenzug, dem Lappwald, begleitet (vgl. Abbildung 1). Seine Kammlinie liegt auf 150-190 mNN. Auch im Osten wird die Aller von einem Höhenzug begleitet. Er ist weniger ausgeprägt und entwickelt sich erst ab Alleringersleben. Dieser östliche Höhenzug kulminiert im Erxlebener Forst (160-180 mNN) und sinkt gegen Norden über Buchberg (157 mNN) - Esbinnenberg (146 mNN) - Drachenberg (128 mNN) zum Bischofswald (130 mNN) ab. Zwischen Drachenberg und Bischofswald durchquert die Aller diesen flachen Höhenzug bei Weferlingen auf einem Niveau von 85-90 mNN. Ausgehend vom Erxlebener Forst ist im NE ein weiteres erhöhtes Gebiet ausgebildet: Der Flechtinger Höhenzug. Die Geländeoberfläche liegt hier in weiten Gebieten auf einer Höhe zwischen 140 und 160 mNN.

Die Form und Lage des Modellgebietes (Abbildung 1) wird in den Hochlagen des Lappwalds (Südwestrand) und der Weferlinger Triasplatte (Nordostrand) durch den Verlauf der topographischen Wasserscheiden bestimmt. Der nordwestliche und südöstliche Modellrands folgt dem Verlauf von Stromlinien, die auf der Grundlage des Hydroisohypsenplans ([12], Anlage 8), ausgehend von den Abflußmeßstellen Alleringersleben und Walbeck der Aller (Abbildung 41), konstruiert wurden.

### 2.2 Hydrogeologischer Aufbau des Untersuchungsgebiets

Vorgegeben durch den tektonischen Bau des Modellgebietes erfolgt eine Dreigliederung der hydrogeologischen Verhältnisse am Endlagerstandort in die Bereiche Lappwaldscholle, Allertalzone und Weferlinger Triasplatte (vgl. Abbildung 2). Eine Darstellung des hydrogeologischen Aufbaus des Untersuchungsgebiets wird im folgenden anhand eines Zitats (kursiv) aus Kap. 2.1 in [8] gegeben:

#### 2.2.1 Allertalzone

*Das Deckgebirge über dem Hutgestein der Salzstruktur in der Allertalzone läßt sich schematisch in einen östlichen Keuper-Anteil und einen westlichen Kreide- Jura-Anteil gliedern. Die Kreidesedimente besitzen im Bearbeitungsgebiet eine trogförmige durchgehende Verbreitung parallel zur SW-Flanke der Salzstruktur. Ihr asymmetrischer Baustil (dem steilen westlichen Rand des Troges sind auch oft die maximalen Schichtmächtigkeiten - bis 180 m - zugeordnet) ist im Modell zuverlässig nachvollziehbar. Die Kreidesedimente liegen entweder unmittelbar auf dem Hutgestein oder werden von diesem durch Jura (bevorzugt) bzw. Keuper (nachgeordnet) getrennt. Demgegenüber sind die Kenntnisse über Verbreitung und Mächtigkeiten der Schichtglieder des Keupers im Dach des Diapirs weniger gesichert. Vorherrschend sind Steinmergelkeuper und Oberer Gipskeuper.*



Die Südwestrandstörung tritt bei den jetzigen Karten (im Unterschied zu früheren) nicht mehr als durchgehende Störungslinie in Erscheinung. Sie verbirgt sich vielmehr hinter den durch Salzaufstieg und Subrosion geschaffenen Schollen aus meist sehr steil einfallendem Jura und wechselhaft einfallenden, gegeneinander kompliziert versetzten, aber oft noch stratiformen Keuperschichten, die die Südwestflanke der Salzstruktur begleiten. Diese Schollen werden ihrerseits im Kartenbild erheblich durch sogenannte Versturz- und Gleitsedimente aus Rhätmaterial kaschiert, die sie diskordant überdecken. Die genannten Einzelschollen aus Jura- und insbesondere Keupermaterial vermitteln zwischen dem Deckgebirge der Allertalzone und den durch Subrosionsprozesse nicht mehr beeinflussten Keuperschichten der Lappwaldscholle. [...] Für hydrogeologische Aufgabenstellungen kann man die westlichen Verbreitungsgrenzen der Kreidesedimente und der Jura-Schollen als Markierungen für die Hauptdiskordanzen an der SW-Flanke der Salzstruktur verwenden. Die steilgestellten Jura-Schollen reichen fast immer bis zum Hutgestein (mit Ausnahme des Abschnitts bei Walbeck).

Das Quartär erreicht in der Allertalzone Mächtigkeiten bis fast 100 m und greift über alle anderen Bildungen hinweg.

## 2.2.2 Lappwaldscholle

Die Lappwaldscholle stellt sich für die Jura- und Keuperschichten als Muldenstruktur dar, deren Achse an der Jurabasis ca. 2-2,5 km und an der Gipskeuper-Basis ca. 1-2 km vom Westrand der Kreideverbreitung entfernt ist. Während der Schilfsandstein nördlich von Beendorf meist an einem steilen Abschnitt der SW-Flanke der Salzstruktur endet, ohne das Niveau ihres Salzspiegels zu erreichen, kommt es zwischen Beendorf und Morsleben des öfteren auch zur Überdeckung des Hutgesteins. In den komplizierten Schollenbau an der SW-Flanke sind oberhalb des Hutgesteins regelmäßig Oberer Gipskeuper, Steinmergelkeuper und Unterrhät einbezogen. Diese Schichtglieder enden am Hutgestein oder an den Jura-Schollen der SW-Randstörung. Die Störungen zwischen den Schollen der SW-Randstörung verlaufen vorwiegend parallel sowie senkrecht zur Diapirflanke, ohne im Detail hinreichend begründet nachvollziehbar zu sein. Aus den Entwürfen der flachseismischen Profile [...], sowie einiger geologischer Schnittinterpretationen [...] und unter Berücksichtigung ihrer Unsicherheiten läßt sich schlußfolgern, daß die Rückführung der Schichten auf eine quasi ungestörte Lagerung im Hinblick auf ihren geohydraulischen Effekt eine ausreichende Annäherung an die Realität bietet. [...]. Die [...] Zuordnung von Teilen des Unterrhät zum Steinmergelkeuper ist eine hydrogeologisch vertretbare Schematisierung, weil sich Ausbildung und Durchlässigkeiten beider Folgen in diesem Bereich ähneln.

Die Jura- und Keuperschichten der Lappwaldscholle werden nordwestlich der Brunnenstörung (Bad Helmstedt - Beendorf) von sehr wenigen, südöstlich davon von relativ zahlreichen Störungen durchsetzt. Oft sind jedoch die Sprunghöhen entlang der Störungen gering im Vergleich zu den Mächtigkeiten der betroffenen Schichtglieder, so daß bei der hydrogeologischen Schematisierung eine Vereinfachung des Störungsmusters möglich war. Beim Oberen Gipskeuper und beim Schilfsandstein führen die hier oft flach einfallenden Störungen zu Abschiebungen mit Schichtausfällen, was in den entsprechenden Tiefenlinienplänen zu berücksichtigen war.

*Aus den reflexionsseismischen Messungen ergibt sich, daß die Schichtmächtigkeiten von Unterrhät, Steinmergelkeuper, Oberem Gipskeuper und Schilfsandstein auf der Ostflanke der Muldenstruktur in Annäherung an den Diapir ihre größten Werte erreichen. Im westlichen Teil der Lappwaldscholle sind diese Schichtmächtigkeiten deutlich geringer.*

*Hydrogeologisch von besonderem Interesse ist die Verbreitung des Steinsalzes im oberen Teil des Oberen Gipskeuper. Während das subrosiv bedingte Fehlen des Keuper-Steinsalzes in einem mehrere hundert Meter breiten Streifen entlang der SW-Randstörung bereits im BGR-Modellbericht 1993 hervorgehoben wurde, ist jetzt hinzuzufügen, daß Mächtigkeitsentwicklung und Dislozierungsgrad (Wasserwegsamkeit) des Oberen Gipskeupers eine rezente Steinsalzverbreitung wahrscheinlich machen, die sich vorwiegend auf die tiefen Bereiche der Muldenstruktur beschränkt [...]. Außerhalb davon sind kleinere, inselförmige Steinsalzvorkommen im Oberen Gipskeuper der Lappwaldscholle denkbar.*

*Eine Sonderstellung nehmen in mehreren neueren Bohrungen identifizierte „Versturz- und Gleitmassen aus Oberkeupermaterial“ ein. Obwohl sie aus ihrem ursprünglichen Verband gerissen sind, können die erbohrten Gesteine aber meist bestimmten stratigraphischen Abfolgen zugeordnet werden. Sie erreichen ca. 60 m Mächtigkeit (Dp Mors 40A und B) und greifen sowohl über stratiformen Keuper als auch stellenweise über die zu einem früheren Zeitpunkt umgelagerten Jura-Schollen im Bereich der SW-Randstörung hinweg. Bei Walbeck ist auch eine Überlagerung von Kreidesedimenten bekannt, wobei die Gleitschollen nicht nur aus Keuper-, sondern auch aus Juramaterial bestehen.*

### **2.2.3 Weferlinger Triasplatte**

*Die Schichten des Buntsandsteins auf der Weferlinger Triasplatte zeigen überwiegend einfache Lagerungsverhältnisse mit flachem Einfallen nach SW. Ebenfalls flach lagernde Kalksteine des Unteren Muschelkalks berühren das Modellgebiet nur randlich bei Walbeck und bei Alleringersleben. Die morphologisch hochgelegenen Bereiche der Weferlinger Triasplatte (Wasserscheide) werden bisweilen von 20-40 m mächtigen quartären und tertiären Sanden, Schluffen und Tonen bedeckt.*

*Die Lagerungsverhältnisse der triassischen Gesteine nehmen bei Annäherung an den Gropendorfer Graben und entlang der Nordostrandstörung der Allertalzone komplizierte Formen an. An der NE-Randstörung gelangen die Schichten in eine steile Lagerung bei gleichzeitiger tektonischer Zunahme oder Abnahme oder dem Wegfall von Schichtmächtigkeiten, so daß Einzelheiten der Schichtgeometrie nicht darstellbar sind. Im Modell wird eine NE-Randstörung 1 (Grenze von Buntsandstein und Muschelkalk der Weferlinger Triasplatte gegen Keuper der Allertalzone) und eine NE-Randstörung 2 (Begrenzung zwischen einfachen und komplizierten Lagerungsverhältnissen von Buntsandstein und Muschelkalk) unterschieden.*

Abbildung 3 gibt eine schematische Darstellung der stratigraphischen Stellung und Mächtigkeit der Modelleinheiten im Deckgebirge ERAM für die Bereiche Lappwaldscholle, Allertalzone und Weferlinger Triasplatte. In Abbildung 4 bis Abbildung 6 ist die hydrostratigraphische Gliederung dieser Einheiten dargestellt.

### **3 Entwicklung des hydrogeologischen Modells und Aufbau des 3D Finite Elemente Modells**

Der geometrische hydrogeologische Aufbau des Modellgebietes wird durch Tiefenlinienpläne der Basisflächen wesentlicher Einheiten („Modellflächen“) und für einige Einheiten durch Mächtigkeitsangaben bezüglich einer Modellfläche definiert.

Als Werkzeug zur Datenverwaltung und zur dreidimensionalen geometrischen Modellierung der hydrostratigraphischen Baueinheiten des Deckgebirges Morsleben wird das Computerprogramm LYNX Geoscience Modelling System (UNIX-Version) eingesetzt [3]. Da das Programm wesentliche dreidimensionale Funktionen bietet, die von klassischen geographischen Informationssystemen (GIS) nicht abgedeckt werden, wird im weiteren Bericht das Programm auch als Lynx-GSIS (GeoScientific Information System) bezeichnet.

Das Lynx-GSIS stellt Funktionen zum dreidimensionalen Management geowissenschaftlicher und bautechnischer Untergrunddaten, wie Bohrlochdaten, Karteninformationen, Untertagebauten, geologische Volumenelemente und Rastergitter zur Verfügung.

#### **3.1 Geologische Datengrundlage**

Die Datenbasis zur Erstellung der geometrischen Struktur der hydrostratigraphischen Gesteinseinheiten ist der Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zur hydrogeologischen Modellbildung im Deckgebirge des Endlagers Morsleben [8]. Basierend auf einer breiten geologischen und hydrogeologischen Datenbasis erfolgt in [8] eine Zusammenfassung der detaillierten lithostratigraphischen Schichtglieder des Untersuchungsgebietes in hydrostratigraphische Einheiten, die sich durch ähnliche hydrogeologische Eigenschaften auszeichnen.

Mit einer Kompilation verschiedener Quellen geologischer Information wie z.B. Oberflächenbefunde, Bohrprofile und Ergebnisse geophysikalischer (vor allem seismischer) Untersuchungen wurden von der BGR Tiefenlinienpläne der Schichtuntergrenze und vereinzelt auch der Schichtobergrenze (z.B. Hutgestein) wichtiger hydrostratigraphischer Einheiten erstellt ([8] bis [11]). Weitere Einheiten werden durch eine Mächtigkeitsangabe bezüglich einer Kennfläche definiert.

Die geometrischen Daten der Tiefenlinienpläne und der Bohrungsdatenbank bilden die Grundlage für den Modellaufbau. Einen Überblick über die zur Verfügung stehende geometrische Datenbasis der hydrostratigraphischen Einheiten gibt Abbildung 3.

## **3.2 Sichtung und Übernahme der geologischen Datengrundlage**

### **3.2.1 Grundwasseroberfläche**

Für das Modellgebiet ist die Position der Grundwasseroberfläche des oberflächennahen Grundwassers durch den Hydroisohypsenplan (Anlage 8 in [12]) für den Zeitraum September 1996 definiert worden. Die Grundwasseroberfläche des oberflächennahen Grundwassers stellt die Modelloberfläche des 3D Süßwassermodells dar. Der hydrogeologische Bau des Deckgebirges im Modellgebiet ist durch Tiefenlinienpläne bis zu dieser Fläche definiert.

### **3.2.2 Tiefenlinienpläne**

Zum Aufbau der dreidimensionalen Körper aller hydrostratigraphischen Einheiten im Deckgebirge ERAM wurden die Tiefenlinienpläne der BGR ([8] bis [11]) verwendet.

Die Umformatierung der von der BGR digital bereitgestellten Isolinieninformation in ein Importformat des Lynx-GSIS erfolgte mit der Standard-UNIX Software Perl. Da innerhalb des Prozesses zur digitalen Kartenerstellung bei der BGR mit dem geographischen Informationssystem „Giros“ keinem Isolinienstützpunkt sein Höhenattribut (z-Wert) zugewiesen wird, muß dieser Schritt innerhalb des Lynx-GSIS für jede importierte Isolinie interaktiv am Bildschirm nachträglich durchgeführt werden.

Die Flächen der Quartär- und Oberkreidebasis sowie der Oberfläche Hutgestein ([9] bis [11]) wurden von der BGR mit dem Programm IVM aus Bohrungsdaten und geophysikalischen Auswertungsergebnissen interpoliert. Zur Verfügung standen umfangreiche Datensätze, die die Beschreibung der Flächenform in einem engen regelmäßigen Raster erlaubten.

### **3.2.3 Bohrungen**

Parallel zu den Tiefenlinienplänen bieten Bohrlochinformationen eine zusätzliche Informationsquelle beim Modellaufbau. Von der BGR wurden für rund 900 flache und tiefe übertägige Bohrungen im weiteren Untersuchungsgebiet verschiedene Informationen in Form von zwei MS-Excel-Dateien zur Verfügung gestellt. Für rund 700 Bohrungen, für die mindestens Informationen zur Lage (Rechts/Hochwert und Höhenlage des Bohransatzpunktes) und Endteufe vorhanden sind, war der Import in das Lynx-GSIS möglich. Soweit in den MS-Excel-Dateien vorhanden, wurde die stratigraphische Einstufung der erbohrten Schichten mit in das Lynx-GSIS importiert.

Die ortho-stratigraphische Gliederung der Bohrungsdatenbank entspricht indessen nur teilweise (einzelne Kennflächen) der in [8] vorgenommenen hydrostratigraphischen Gliederung des Untersuchungsgebietes. Trotz dieser Einschränkung bietet

die Bohrungsdatenbank wertvolle Informationen bei der Bearbeitung der Tiefenlinienpläne und der Erstellung der Volumenelemente.

### 3.2.4 Modifikation von Tiefenlinienplänen

Im Anschluß an die Vervollständigung der Tiefenlinienpläne um den fehlenden z-Wert wurde für jede Strukturfläche eine Triangulation (Dreiecksvernetzung) erzeugt. Auf der Grundlage von Dreiecksnetzen können im Lynx-GSIS dreidimensionale Schnittlinien zwischen jeweils 2 Dreiecksnetzen berechnet werden. Die Berechnung von Schnittlinien der Grenzflächen hydrostratigraphischer Modelleinheiten ist das gewählte Verfahren zur Prüfung der Berandung der zu erzeugenden 3D Volumen hydrostratigraphischer Modelleinheiten auf Vollständigkeit.

Die modellierten hydrostratigraphischen Einheiten sind Volumenelemente. Diese werden einerseits durch Begrenzungsflächen (in der Regel durch eine Ober- und eine Unterfläche), andererseits durch Körperkanten an den Flächenrändern (der Verschneidung oder des Kontaktes zwischen Begrenzungsflächen) definiert. Im Modellgebiet kommen Volumeneinheiten unterschiedlicher Komplexität vor:

- Einfache Volumenelemente, wie sie durch Schichten dargestellt werden, die über das ganze Modellgebiet verbreitet sind und die im Modellgebiet keine Körperkante aufweisen, kommen im Modellgebiet ERAM nicht vor.
- Innerhalb des Modellgebietes ausgeilte Einheiten weisen eine Körperkante auf, linsenförmige Einheiten weisen zwei Körperkanten auf.
- Kompliziertere Elemente können 3 und mehr Körperkanten aufweisen.

Die systematische Berechnung einer Vielzahl von Schnittlinien ergab, daß für manche seitlich ausgeilte hydrostratigraphische Modelleinheiten deren Basis an der seitlichen Verbreitungsgrenze nicht an die überdeckende Einheit anstößt. Die fraglichen Tiefenlinienpläne wurden am Bildschirm mit einer schrittweisen Extrapolation ergänzt, bis die Basis der Einheit die überliegende Schicht erreichte. Hierbei wurde versucht, innerhalb der extrapolierten Bereiche die Neigung und Krümmung der Originalkarte beizubehalten.

Dies traf zum Beispiel für die Oberkreide, ein Volumenelement mit zwei Körperkanten, zu. Da der Oberkreidetrog im Querschnitt eine linsenförmige Form aufweist, sind seine Körperkanten durch den Verlauf der Schnittlinien der Oberkreidebasis mit der Quartärbasis bzw. der Modelloberfläche vollständig gegeben. Der Ausgangszustand des Tiefenlinienplans der Oberkreidebasis ist in Abbildung 7 dargestellt. In diesem Falle erfolgte eine Extrapolation der Flanken des Sedimenttroges aufwärts bis zur Quartärbasis bzw. der Modelloberfläche (vgl. Abbildung 8).

Als Beispiel einer komplizierteren Situation kann die zwischen Allertal und Weferlinger Triasplatte liegende NE-Randstörung genannt werden. Aus der Verschneidung der Tiefenlinienpläne der SW- und NE-Begrenzungsfläche (Anlagen 8 und 9 in [8]) mit der Begrenzung durch die Modelloberfläche (Grundwasseroberfläche) bzw. durch die Hutgesteinsoberfläche nach unten (Anlage 8 in [12] bzw. Anlage 1 in [8]) ergeben sich vier Körperkanten.

### 3.2.5 Auswahl und Konstruktion relevanter Störungen

Entlang Störungen erfolgt meist ein Versatz der Schichten, so daß in einer geschichteten Abfolge, in der sich Einheiten unterschiedlicher Durchlässigkeit abwechseln, hydrostratigraphische Einheiten mit anderen in Kontakt kommen und in Aquiferen z.B. eine seitliche Grenze oder eine Verbindung zu einem anderen Aquifer bewirken können. Weiter kann entlang Störungen der Gesteinsverband auf einer Breite von Metern bis Hektometern gestört sein; der gestörte Gesteinsverband kann andere Durchlässigkeiten aufweisen als die ungestörte Abfolge.

Im hydrogeologischen Modell der BGR weisen die SW- und die NE-Randstörung spezifische Wegsamkeiten auf und sind im Modell als hydrostratigraphische Einheiten enthalten.

Alle anderen im hydrogeologischen Modell enthaltenen Störungen (z.B. Brunntalstörung) üben nur über ihre Geometrie (Versatz) einen Einfluß auf die Modellergebnisse auf.

Auf der Grundlage des BGR-Berichts zur hydrogeologischen Modellbildung [8] lassen sich tektonische Störungen mit vertikalem Versatz der durchtrennten hydrostratigraphischen Einheiten im Modellgebiet in drei Typen gliedern:

- Typ 1: Zweidimensionale Störungsflächen ohne Krümmung in vertikaler Richtung. Es handelt sich hierbei um Störungen in der Weferlinger Triasplatte, dem südlichen Teil der SW-Randstörung des Allertals und einzelne Störungen in der Lappwaldmulde.
- Typ 2: Zweidimensionale Störungsflächen, die auch in vertikaler Richtung eine Krümmung aufweisen. Es handelt sich hier um schaufelförmige (listrische) Störungen im Bereich des Brunntals der Lappwaldmulde. Tiefenlinienpläne, die die räumliche Form und Lage dieser Flächen beschreiben, sind in [8] nicht enthalten. Die Konstruktion der Störungsfläche wurde mit dem Lynx-GSIS für die westlichen Segmente der Brunntalstörung durchgeführt.
- Typ 3: Die NE-Randstörung des Allertals als größte Störung im Modellgebiet ist ein durch Tiefenlinienpläne in [8] detailliert beschriebener dreidimensionaler Körper.

Vor dem Modellaufbau wurde für die Übernahme von Störungen in das Modell festgelegt, daß Störungen, die die Kontinuität der hydrostratigraphischen Einheiten nicht unterbrechen, im Modell nicht explizit nachgebildet werden müssen. Die betroffenen Schichten sollen im Bereich der Störung lediglich durch veränderte Schichtmächtigkeiten wiedergeben werden. Bei diesen Störungen wird also die Modelltopologie nicht unterbrochen. Störungen jedoch, die hydrostratigraphische Einheiten soweit versetzen, daß eine vollständige Trennung betroffener Schichten stattfindet, sollen dagegen explizit nachgebildet werden. Bei der Modellierung derartiger Störungsversätze ergibt sich eine komplexe Modelltopologie, die beim Modellaufbau eine manuelle Nachbearbeitung erfordert. Aus diesem Grund sind die weiter unten erwähnten Blockgrenzen vorzüglich entlang der Störungen zu legen.

Für die listrischen Störungen des Typs 2 wurde für die westlichen Segmente der Brunntalstörung, auf der Grundlage aller in diesem Bereich vorhandenen Tiefenli-

nienpläne, exemplarisch die Konstruktion der Störungsfläche durchgeführt. Am südlichen Ast dieser Störung kann gezeigt werden, daß hier vollständige Schichttrennungen auftreten (Abbildung 9).

Abbildung 10 zeigt für den nördlichen Ast dieser Störung, daß diese Flächen sehr komplexe Formen annehmen können. Die Entwicklung derart komplexer Störungsflächen im Modell ist möglich, wäre jedoch mit hohem Diskretisierungsaufwand verbunden. Daher wurden alle listrischen Störungen durch vertikale Flächen ersetzt. Aus hydrogeologischer Sicht erscheint diese Vereinfachung zulässig.

Zu Beginn des Modellaufbaus war es erforderlich, das Modellgebiet in verschiedene Blöcke mit vertikalen Rändern zu unterteilen. Vor allem Störungen mit großer horizontaler Erstreckung bieten sich hier zur Abgrenzung von Teilgebieten an. Dies führt dazu, daß die vorgenannten Kriterien (Mächtigkeitsreduktion versus vollständige Schichttrennung) zur Übernahme von Störungen ins Modell an den Blockgrenzen so nicht wirksam wurden und auch Störungen ohne vollständige Schichttrennung in das Modell aufgenommen wurden. Die Blockgrenzen sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Teilgebiete TG-T5 bis TG-T9 entsprechen dem Ausstrich der NE-Randstörung an der Modelloberfläche.

Im Zuge der Unterteilung des Modellgebiets in Teilgebiete mit vertikalen Rändern wurden Störungen mit kleiner horizontaler Erstreckung und geringem vertikalem Versatz vernachlässigt. Es handelt sich beispielsweise um die zwischen der Bohrung Dp Mors 51A/95 und Schacht Bartensleben im Steinmergelkeuper mit WNW-ESE Ausrichtung verlaufende Störung vom Typ 1 im Nahbereich der SW-Randstörung des Allertals oder zwei Störungen im Allertal nordöstlich der Ortschaft Morsleben (vgl. Abbildung 11 mit Anhang 5 in [8]).

### **3.3 Aufbau des 3D hydrogeologischen Modells**

Abbildung 12 gibt eine schematische Übersicht der zum Modellaufbau angewendeten Verfahrensschritte und Programme. Nach den vorbereitenden Schritten zum Modellaufbau, umfassend die Bereitstellung der Datenbank (vgl. Kap. 3.2.1 bis 3.2.3), die Extrapolation von Tiefenlinienplänen und die Berechnung von Flächenrändern und Festlegung der Körperkanten (vgl. Kap. 3.2.4) sowie der Auswahl und Konstruktion relevanter Störungen (Kap. 3.2.5), erfolgte der eigentliche Aufbau des 3D hydrogeologischen Modells.

#### **3.3.1 Horizontalprojektion der Körperkanten**

Wie in Kap. 3.2.4 bereits ausführlich beschrieben, liegen für alle Tiefenlinienpläne hydrostratigraphischer Modelleinheiten im Modellgebiet Flächenränder vor. Die Gesamtheit der Flächenränder entspricht hierbei den Körperkanten der zu entwickelnden hydrostratigraphischen Modelleinheiten.

Da im weiteren Verlaufe des Modellaufbaus Volumenelemente ausschließlich vertikal abwärts im Raum aufgespannt werden, enthält die Horizontalprojektion der Körperkanten vollständig die für den Modellaufbau grundlegende geometrische Information in der horizontalen Ebene, d.h. alle auf die Horizontalebene projizierten Kör-

perkanten der am Modell beteiligten Schichteinheiten müssen im Oberflächenelementnetz enthalten sein. Die Verbreitungsgrenzen bzw. Körperkanten der hydrostratigraphischen Modelleinheiten im Modellgebiet sind in Abbildung 13 dargestellt.

Als letzter Schritt in der Vorbereitung der Horizontalprojektion der Körperkanten für die Dreiecksvernetzung müssen an allen Kreuzungspunkten von Körperkanten Linienschnittpunkte berechnet und in die Linien eingefügt werden. Nach einer außerhalb des Lynx-GSIS erfolgten Schnittpunktberechnung werden die modifizierten Körperkanten in das Lynx-GSIS reimportiert.

Voraussetzung zur Entwicklung von Volumenelementen ist eine Vernetzung der Horizontalprojektion der Körperkanten. Grundsätzlich könnte diese Vernetzung mit Drei-, Vier- oder Vielecken erfolgen. Im Rahmen der Volumenmodellierung mit dem Lynx-GSIS Werkzeug „Surface-Handling“ muß diese Vernetzung jedoch mit Dreiecken erfolgen. Dies bedeutet, daß innerhalb der zu entwickelnden Körper hydrostratigraphischer Modelleinheiten als Volumenelemente vertikale Dreiecksprismen aufgespannt werden.

### **3.3.2 Volumenelemente in Teilgebieten**

Die Technik des „Surface-Handling“ zum Aufbau von Volumenelementen ist eine konstruktive Methode, mit der sich zwischen mindestens zwei geologischen Flächen Dreiecksprismen definieren lassen. Die räumliche Ausrichtung der Prismenseitenflächen ist dabei beliebig wählbar, wurde aber vorliegend als ausschließlich vertikal festgelegt. Die Top- und Basisflächen der Dreiecksprismen repräsentieren eine lineare Approximierung der vorgegebenen geologischen Flächen. Alle am Modellierungsprozeß beteiligten Flächen liegen in diesem Bearbeitungsstadium als Triangulationen vor.

Die Verwendung einer einzigen primären Triangulation gewährleistet die lückenlose „Füllung“ des Raumes mit Dreiecksprismen. Eine geologische Schicht enthält dabei eine Prismenlage. Zur Erzielung einer in vertikaler Richtung feineren Diskretisierung ist es grundsätzlich möglich, mit der Technik des „Surface-Handling“ auch mehrere Prismenlagen pro hydrogeologische Einheit zu entwickeln. Davon wurde im vorliegenden Fall abgesehen.

### **3.3.3 Primäre Triangulation**

Im Rahmen des Arbeitsschrittes „Volumenmodellierung“ mit dem Lynx-GSIS Werkzeug „Surface-Handling“ gelangen verschiedene Triangulationen zum Einsatz. Beim Aufbau von Volumenelementen wird in der Regel eine sogenannte primäre und eine sekundäre Triangulation verwendet.

Die Triangulation, die die räumliche Diskretisierung des zu entwickelnden 3D Finite-Elemente-Modells festlegt, wird als sogenannte primäre Triangulation bezeichnet. Die vorbereitenden Schritte zum Aufbau der primären Triangulation sind in Kap. 3.3.1 ausgeführt.



Eine wesentliche Anforderung an die Qualität der zu erstellenden primären Triangulation besteht darin, daß keine der erzeugten Dreieckskanten Linien in der Karte der Horizontalprojektion der Körperkanten kreuzt. Weiter sollen zusätzlich zu den Stützpunkten auf den Linien der Horizontalprojektion der Körperkanten neue Stützpunkte so erzeugt werden, daß die entstehenden Dreiecke vom numerischen Blickwinkel möglichst wohlgeformt erscheinen. Da das Triangulationsprogramm innerhalb des Lynx-GSIS (Version 4.6) für diese Aufgabe nicht anwendbar ist, erfolgte die Erstellung der primären Triangulation mit dem an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh entwickelten Programm *triangle* [4] (vgl. Abbildung 14).

Für den Import der mit *triangle* entwickelten Triangulation in das Lynx-GSIS gibt es verschiedene Möglichkeiten. Für den Fall, daß die primäre Triangulation nicht in Teilgebiete zerlegt werden soll, ist ein direkter Import möglich. Im vorliegenden Fall erfolgte der Modellaufbau in Teilgebieten (Abbildung 11). Hierzu wurden Teile der Datenausgabe von *triangle* separat in das Lynx-GSIS importiert.

### 3.3.4 Sekundäre Triangulation

Während die primäre Triangulation die Form der Top- und Basisdreiecke (x,y-Koordinaten) der vertikalen Prismen bestimmt, werden die Höhenwerte (z-Koordinaten) und die Schichtmächtigkeiten  $M1_i$  und  $M2_i$  aus sekundären Triangulationen der Tiefenlinienpläne abgeleitet (vgl. Abbildung 15).

## 3.4 Aufbau des 3D Finite Elemente Modells

### 3.4.1 Überblick

Im hydrogeologischen Modell [8] ist die Aufteilung in hydrostratigraphische Einheiten, die Festlegung ihrer Geometrie, die Zuweisung von  $k_f$ -Werten und Bandbreiten nach einem einheitlichen Konzept durchgeführt worden, das stellenweise Vereinfachungen vornimmt, aber gesamthaft eine realitätsnahe Abbildung des hydrogeologischen Aufbaus des fraglichen Gebietes darstellt. Das 3D Süßwassermodell soll die Geometrie des hydrogeologischen Modells der BGR weitgehend detailgetreu abbilden.

Aus den übernommenen Basisdaten (Kap. 3.2) ist mit LYNX das hydrogeologische Modell erstellt worden (Kap. 3.3). Im LYNX-Modell – einem Volumenmodell, in dem der gesamte Modellraum zwischen den seitlichen und den unteren und oberen Modellrändern mit den hydrostratigraphischen Elementen ausgefüllt ist, baut, wie in Kap. 3.2 beschrieben, in erster Linie auf den von der BGR konstruierten Tiefenlinienplänen der verschiedenen hydrostratigraphischen Einheiten auf. Im Prinzip enthält das LYNX-Volumenmodell die gesamte, in den Tiefenlinienplänen enthaltene hydrostratigraphische Geometrie. Lücken oder Widersprüche, wie sie unvermeidlich vorkommen, wurden unter Konsultation der Bohrdatenbank und Rückfragen mit der BGR gelöst. Das LYNX-Modell bildet die geometrische Grundlage für das 3D Süßwassermodell ERAM, dessen Erstellung nachfolgend beschrieben wird.

### 3.4.2 Finite-Elemente-Diskretisierung in Teilgebieten

Aus mehreren Gründen sind die aus dem Lynx-GSIS exportierbaren Volumenelemente nicht direkt zur Entwicklung von Dreiecksprismen des Finite-Elemente-Netzes verwendbar:

- Die Dreiecksprismen sind in den Exportdateien in weitere primitivere geometrische Formen partitioniert. Die Rückführung dieser Formen in Dreiecksprismen erwies sich als nicht effizient durchführbar.
- Identische Knoten benachbarter Dreiecksprismen sind innerhalb der Koordinatenliste des Volumenmodells vielfach vorhanden. Die notwendige Verschmelzung dieser Knoten birgt das Risiko der Erzeugung geometrischer Defekte.

Die erzeugten Volumenelemente wurden daher vorwiegend zur Kontrolle und Visualisierung des Modellaufbaus innerhalb des Lynx-GSIS angewendet. Als Grundlage zur Erzeugung von Dreiecksprismen für die Finite-Elemente-Modelldiskretisierung kamen andere, aus dem Lynx-GSIS exportierbare Datenstrukturen zum Einsatz:

- Basierend auf der primären Triangulation wurde pro Teilgebiet eine Triangulation, deren z-Koordinate der Modelloberfläche entspricht, exportiert.
- Für jede Modellschicht sind für jeden Knoten der primären Triangulation die Höhe der Schichtoberkante und die Schichtmächtigkeit bereitzustellen. Für den Fall, daß die Schicht innerhalb des Teilgebietes nur partiell auftritt, muß für die entsprechenden Knoten die Schichtmächtigkeit als Null ausgewiesen sein.

Der Aufbau des gesamten Finite-Elemente-Modells in seiner ganzen Komplexität erforderte die Entwicklung spezieller Programme.

Ausgehend von den vorgenannten Datenstrukturen erfolgt mit dem neu entwickelten Programm *tin2fem* schichtweise die Generierung von 3D Finite-Elemente-Prismen und gleichzeitig die Zuweisung von K- und Q-Klassen (= Integer-Indizes zur Zonierung der hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserflüsse). Neben der Koordinaten- und der Elementdatei gibt *tin2fem* eine Kolonnendatei aus.

Das mit *tin2fem* generierte Finite-Elemente-Netz ist nicht vollständig konsistent. Als Folge verschiedener, im vorliegenden Bericht nicht dokumentierter geometrischer Detailprobleme an Rändern auskeilender hydrogeologischer Strukturen und am Kontaktbereich zusammengesetzter Strukturflächen, weist das von *tin2fem* ausgegebene Finite-Elemente-Netz kleine lokale Inkonsistenzen (Hohlräume) auf. Zur Auflösung dieser Problemstellen wird in einem weiteren Arbeitsschritt das Programm *cleanblock* verwendet. Hier werden in geeigneter Weise in vertikaler Richtung Knoten verschmolzen. Aus der Anwendung des Programms *cleanblock* resultiert für jedes Teilgebiet eine fehlerfreie, das Modellvolumen vollständig ausfüllende Finite-Elemente-Diskretisierung.

Das im letzten Bearbeitungsschritt entstandene Finite-Elemente-Netz weist innerhalb der die SW-Randstörung begleitenden Jurascholle des Allertals (A8) und im Hutgestein (A12) eine einzige Prismenlage auf. In Bereichen mit hohen Mächtigkeiten ist damit die Diskretisierung zu grob. Die Anforderung, optional im Zusammenhang mit der Definition von Quell- und Senktermen als Modellrandbedingungen an der Hutgesteinsbasis große Potentialgradienten zu berechnen, begründet eine ver-

feinerte räumliche Diskretisierung innerhalb des Hutgesteins. Zur Implementierung dieser adaptiven Netzverfeinerungen wird das Programm *splitlay* angewendet. In Abhängigkeit verschiedener Eingabeparameter, wie z.B. einer Mindestmächtigkeit, spaltet das Programm bestimmte Prismen mit einer Dreiecksfläche, deren z-Koordinaten aus der linearen Interpolation der korrespondierenden z-Koordinaten der Prismenober- und -unterfläche hervorgehen. Neben der gewünschten Verfeinerung in vertikaler Richtung weist das Finite-Elemente-Netz nun im vertikalen Kontaktbereich gespaltener und originaler Prismen inkompatible Elementkontakte auf. Die Beseitigung dieser Fehlstellen ist Gegenstand von Kap. 3.4.3.

### 3.4.3 Vereinigung der Finite-Elemente-Diskretisierung aller Teilgebiete

Die Vereinigung der Finite-Elemente-Netze aller Teilgebiete führt zur Modelldiskretisierung, die die Grundlage der numerischen Berechnungen darstellt und ist der technisch anspruchsvollste Arbeitsschritt im Modellaufbau. Entsprechend den Ausführungen in Kap. 3.2.5 erfolgte die Unterteilung des Modellgebietes vorwiegend an hydrogeologischen Diskontinuitäten entlang vertikaler Flächen (Störungen, vgl. Abbildung 11). Als Folge der Diskontinuitäten entstehen bei der Vereinigung der Teilgebiete entlang der vertikalen Teilgebietsränder eine Vielzahl topologisch inkompatibler Kontakte von Finiten Elementen. Inkompatible Elementkontakte zeichnen sich dadurch aus, daß entlang der Kontaktfläche benachbarter Finiten Elemente Modellknoten existieren, die nicht beiden Elementen gemeinsam sind. Entlang solcher Elementübergänge verhalten sich die simulierten Grundwasserpotentiale nicht stetig. Darüber hinaus sind diese Elementübergänge undurchlässig. Die gleichen Aussagen sind gültig für Übergangsbereiche von mit *splitlay* behandelten Finiten Elementen zu unbehandelten Netzbereichen.

Die Behandlung und Auflösung der inkompatiblen Elementkontakte erfolgte mit den Programmen *join\_block* und *split*. Die vereinfachende Beschreibung der grundlegenden Funktionen der Programme *join\_block* und *split* umfaßt folgende Punkte:

- Lokalisierung inkompatibler Elementkontakte
- Lokalisierung der Kreuzungen von Elementkanten
- Verschiebung der Kreuzungspunkte in die nächstgelegene vertikale Knotenfolge des bisherigen Netzes
- Spaltung relevanter Elemente
- Aktualisierung der vertikalen Knotenfolge
- Aktualisierung der vertikalen Elementfolge

Abbildung 16 bis Abbildung 18 geben Darstellungen zur Funktion der Programme *join\_block* und *split*. Zur Erzielung einer übersichtlicheren Darstellung bestehen die abgebildeten Finite-Elemente-Netze aus Vierecksprismen. Das beschriebene, beim Modellaufbau verwendete Verfahren bearbeitet jedoch ausschließlich Dreiecksprismen. Abbildung 16 behandelt den Fall des Versatzes von Elementschichten an Störungen ohne Verkipfung. Entlang der versetzten Elementschichten gibt es keine Kreuzungen von Elementkanten. In Abbildung 17 und Abbildung 18 wird der Fall des Störungsversatzes von Elementschichten behandelt, in denen entlang der Störungsfläche eine Verkipfung der Schichten vorhanden ist. Es wird gezeigt, daß die hier vorhandene Kantenkreuzung in eine bereits existierende vertikale Knotenkolon-

ne verschoben wird. Diese Verschiebung ist erforderlich, da die Form der primären Triangulation (= Horizontalprojektion des 3D Finite-Elemente-Netzes) beibehalten werden muß. Die Richtung der Verschiebung wird so gewählt, daß ein möglichst kleiner Diskretisierungsfehler erreicht wird. Abbildung 18 zeigt in einer vereinfachten Darstellung, auf der Grundlage von Vierecksprismen, die erforderlichen Spaltungen beteiligter Finiter Elemente.

Der Einsatz des Programmes *joincol* bringt die Liste der vertikalen Elementabfolgen in ihre endgültige Form. Die endgültige Finite-Elemente-Diskretisierung resultiert aus der nochmaligen Anwendung des Programmes *cleanblock* und der manuellen Nachbearbeitung einer geringen Anzahl noch verbliebener Fehlstellen.

Die hydrostratigraphische Modelleinheit Schichtenfolge Deckanhydrit / Grauer Salztou / Leine-Karbonat (Schichtenfolge DGL, A13-K2) besteht aus zweidimensionalen Finiten Elementen. Diese Einheit wird mit den Programmen *fed* (z.B. Selektion von Materialklassen) und *hull* (Generierung von zweidimensionalen Oberflächenelementen) aus den dreidimensionalen Elementen des Hutgesteins erzeugt und mit eigenen K-Klassen in das 3D Finite-Elemente-Netz eingefügt.

#### **3.4.4 Geometrische und hydrogeologische Vereinfachungen des Modells**

Aus technischen und zeitlichen Gründen erfolgten im Zuge des dreidimensionalen geometrischen Modellaufbaues mit dem Lynx-GSIS verschiedene Vereinfachungen der durch die BGR erstellten Datenbasis ([8], [12]).

In Kapitel 3.2.5 bereits behandelt sind die Kriterien zur Auswahl und Konstruktion relevanter Störungen.

Weitere Vereinfachungen betreffen das Quartär des Allertals. Dieses weist einen Schichtaufbau in gut (Sande) und geringer durchlässige Einheiten (Schluffe, Geschiebemergel) auf. Obwohl die Geometrie der hydrostratigraphischen Einheiten des Quartär (Niederterrasse A1, Mischquartär A2, Elster-Zwischensande A3, Elster-Grundmoräne A4) detailliert in die Karte der Körperkanten eingearbeitet wurde, unterblieb der Aufbau von Volumenelementen innerhalb dieser Subzonen des Quartär.

Von einer expliziten Modellierung des Quartär des Allertals wurde aus folgenden Überlegungen Abstand genommen: Die Fließzeiten werden im wesentlichen durch den Verlauf im gering durchlässigen Untergrund bestimmt. Bei den Ausbreitungsrechnungen können auch bei einer detaillierten Modellierung des Quartär die Ergebnisse in Oberflächennähe nicht direkt übernommen werden. Die Vorgänge im Quartär/Biosphäre werden mit separaten Ansätzen behandelt werden. Eine detaillierte ortsdiskrete Belastbarkeit der Modellrechnungen in Oberflächennähe (Biosphäre) wird mit den 3D Süßwasserrechnungen nicht angestrebt.

Die Einheiten des Quartär wurden zur hydrostratigraphischen Einheit A1-A4/210 zusammengefaßt (Abbildung 5, Tabelle 5). Dem in vertikaler Richtung heterogenen Aufbau dieser hydrostratigraphischen Einheit wird im Rahmen der Grundwassermmodellierung durch die Zuweisung einer K-Klasse mit einer in vertikaler Richtung gegenüber der Horizontalrichtung geringeren hydraulischen Leitfähigkeit Rechnung getragen (vgl. Kap. 4.1.3).

### 3.4.5 Dokumentation des 3D Süßwassermodells ERAM

Das für die Süßwasserrechnungen zu verwendende Finite-Elemente-Modellnetz ERAM besteht aus 202'311 Elementen, deren Geometrie durch 480'202 Modellknoten definiert wird.

Abbildung 20 zeigt eine Schrägaufsicht auf das 3D Finite-Elemente-Modell ERAM. Abbildung 21 gibt anhand einer gestaffelten Folge paralleler Vertikalschnitte einen Einblick in den hydrogeologischen Bau des Untersuchungsgebietes. Die Abbildungen in Anhang 1 visualisieren das sukzessive Abdecken hydrostratigraphischer Modelleinheiten von oben nach unten und erlauben einen detaillierteren Einblick in den Aufbau des Modells. Abbildung 23 und Abbildung 24 enthalten Schnitte quer bzw. parallel zum Allertal. Der Verlauf der Schnitte und der hydrostratigraphische Aufbau entlang der Modelloberfläche gehen aus Abbildung 22 hervor. In Abbildung 25 bis Abbildung 27 sind die Verbreitung und die Höhenisolinen der Basisflächen wichtiger Einheiten des Lappwaldes, des Allertals und der Weferlinger Triasplatte dargestellt.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang der scheinbare Widerspruch zwischen der Verbreitung Quartär/Präquartär an der Oberfläche des 3D Finite-Elemente-Modells (Abbildung 20, Abbildung 22) und der Datengrundlage der BGR mit Bezug auf die Geländeoberfläche ([8] Anlage 12, [9]). Zum Verständnis der Situation ist zu beachten, daß die ungesättigten quartären (und präquartären) Sedimente oberhalb der Grundwasseroberfläche ([12], Anlage 8) im 3D Finite-Elemente-Modell unberücksichtigt bleiben (vgl. Kap. 3.2.1).

## 4 Modellkalibrierung

Die Zuweisung von Durchlässigkeitswerten an die im Modellgebiet differenzierten hydrostratigraphischen Einheiten soll innerhalb der aus den Untersuchungen hervorgehenden Durchlässigkeitsbandbreiten mittels Kalibrierungsrechnungen auf ihre Verträglichkeit mit den übrigen hydrogeologischen Meßdaten überprüft werden. Zudem sollen die Möglichkeit eines durch die Grundwasserentnahme bedingten Randzuflusses im Lappwald und der T-Wert einer entlang der Modelloberfläche für die Verteilung der Grundwasserneubildung eingefügten 2D Schicht überprüft werden. Ziel ist die Gewinnung eines konsistenten Parametersatzes der kalibrierten Variablen.

Nach einer zusammenfassenden Darstellung der für das Projektgebiet vorliegenden wesentlichen hydrogeologischen Daten wie Grundwasserneubildung, Grundwasserentnahmen,  $k_f$ -Werte und Porositäten, Grundwasserpotentiale und Wasserdichte in Grundwassermeßstellen und Packertests, Filtergeschwindigkeit und Fließrichtung in Grundwassermeßstellen (Kap. 4.1), des Modellkonzeptes und der Randbedingungen für das 3D Süßwassermodell ERAM (Kap. 4.2), sollen das Kalibrierungskonzept (Kap. 4.3), dessen Umsetzung in den Kalibrierungsrechnungen (Kap. 4.4) und die Resultate der Kalibrierung (Kap. 4.5) präsentiert werden.

### 4.1 Datengrundlage

#### 4.1.1 Flächenhafte Grundwasserneubildung

Die umfangreichen Untersuchungen zur Grundwasserneubildung im Modellgebiet sind in [12] (Kap. 4.1.3) detailliert zusammengestellt.

Die im Rahmen der Untersuchungen der Grundwasserneubildung im Modellgebiet ERAM *angewandten Verfahren zählen ausnahmslos zu den Wasserhaushaltsberechnungen* ([12], Kap. 4.1.3.1):

- Ermittlung der Grundwasserneubildung aus dem mittleren monatlichen Niedrigwasserabfluß (MoMNQ)
- Ermittlung der Grundwasserneubildung mit dem Programm NASIM
- Ermittlung der Grundwasserneubildung aus dem Bodenwasserhaushalt
- Ermittlung der Grundwasserneubildung nach der Methode von BAGROV/GLUGLA mit dem Programm GWD
- Ermittlung der Grundwasserneubildung nach dem  $A_u$ -Linienverfahren
- Berechnung der Grundwasserneubildung für das Einzugsgebiet des Wasserwerkes Helmstedt

*Bei allen Verfahren ist zu berücksichtigen, daß nicht alles in die ungesättigte Zone infiltrierende Niederschlagswasser den Grundwasserleiter erreicht, sondern ein Teil, bei Vorhandensein von wasserstauenden Horizonten über dem obersten Grund-*

wasserleiter, nach mehr oder weniger kurzer Aufenthaltsdauer wieder zum Oberflächenabfluß wird. Dieser sogenannte Zwischenabfluß ( $A_z$ ) läßt sich nur schwer quantifizieren.

Bei den indirekten Verfahren ist daneben zu berücksichtigen, daß je nach Gesteinsbeschaffenheit und Topographie der Anteil der indirekten Grundwasserneubildung, also der nicht direkt am Ort des Auftreffens des Niederschlags sondern im Verlauf des oberirdischen Abflusses an Systemen bevorzugter hydraulischer Wasserwegsamkeit oder in natürlichen Depressionen erfolgenden Neubildung, stark unterschiedlich ist. Insbesondere in Gebieten mit geklüfteten Festgesteinen und ausgeprägtem Relief, wie dem Untersuchungsgebiet, kann dieser Anteil erheblich sein ([12], Kap. 4.1.3.1).

Für die Methodologie der verschiedenen Vorgehensweisen und die detaillierte Darstellung der für das Modellgebiet errechneten Grundwasserneubildung wird auf [12] (Kap. 4.1.3.2 bis 4.1.3.7) verwiesen.

Die Ergebnisse der Berechnung der GWN sind in [12] (Kap 4.1.3.8) zusammengefaßt und die Methoden untereinander verglichen (Zitate aus [12], Kap. 4.1 in kursiver Schrift):

- MoMNO. Die BfG [6] berechnete auf der Grundlage der Abflußmessungen an den Aller-Stationen Alleringersleben, Walbeck und Weferlingen den MoMNO nach der Methode von DEMUTH [2]. Für das zwischen den Pegeln Alleringersleben und Weferlingen gelegene Einzugsgebiet (ca. 97,3 km<sup>2</sup>) ergibt sich für den Zeitraum 1972-1995 eine mittlere monatliche Niedrigwasserabflußhöhe von 108 mm/a.

Aus den mittleren Entnahme- und Einleitmengen im Einzugsgebiet ergibt sich dafür insgesamt ein Defizit von etwa 0,7 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die korrigierte mittlere monatliche Niedrigwasserabflußhöhe erhöht sich dadurch auf ca. 115 mm/a.

Da für den Pegel Walbeck nur eine kurze Zeitreihe zur Verfügung stand, wurde der mittlere monatliche Niedrigwasserabfluß mittels Regression berechnet. Für das Einzugsgebiet der Aller zwischen Alleringersleben und Walbeck (Modellgebiet, Fläche 58,0 km<sup>2</sup>) ergibt sich dann eine mittlere monatliche Niedrigwasserabflußhöhe von 108 mm/a, bzw. nach Korrektur mit der diesem Gebiet entnommenen Wassermenge von 1,11 Mio. m<sup>3</sup>/a der Wert von 126 mm/a.

Es fällt auf, daß sich der Abfluß der Aller bis zum Pegel Weferlingen stark verändert. Möglich ist u.a., daß ein Teil dieses MoMNO noch dem Zwischenabfluß zuzurechnen ist.

- Programm NASIM: Mit dem Programm NASIM wird die Grundwasserneubildung auf der Basis von Tageswertzeitreihen für Niederschlag, Verdunstung und Abfluß ermittelt. Diese stehen für das Untersuchungsgebiet für den Zeitraum 1988-1995 zur Verfügung. Die mit dem Programm ermittelten Grundwasserneubildungsraten für das Einzugsgebiet Alleringersleben-Walbeck (Fläche 58,6 km<sup>2</sup>) betragen:

	mm/a	Mio. m <sup>3</sup> /a
GWN unkorrigiert	99	5,80
Entnahmen minus Zuleitungen		1,08
GWN korrigiert	117	6,88

- Bodenwasserhaushalt: Die GFE ([7]) berechnete die Grundwasserneubildung für das oberirdische Einzugsgebiet der Aller zwischen Alleringersleben und südlich Schwanefeld (50,08 km<sup>2</sup>) auf der Grundlage von Bodenwasserhaushaltsberechnungen nach Renger et al. [1]. Aufbauend auf einer bodenkundlichen Kartierung sowie Kartierungen der Landnutzung und Hangneigung wurden 492 Berechnungseinheiten abgegrenzt. Für das erwähnte Einzugsgebiet ergeben sich folgende Werte:

		westlich der Aller	östlich der Aller
Fläche	km <sup>2</sup>	24	26
Teilflächen	mm/a	320	172
Mittlere GWN ohne Reliefkorrektur	mm/a	82	79
GWN-Acker	mm/a	124	131
GWN-Grünland	mm/a	16	8
GWN-Wald	mm/a	62	38
Mittlere GWN mit Reliefkorrektur	mm/a	90	84

Die Bodenwasserhaushaltsberechnung ermittelt lediglich die direkte GWN aus Versickerung von Niederschlägen am Ort ihres Auftreffens. Sie berücksichtigt einen Teil des Zwischenabflusses durch die Reliefkorrektur. Insgesamt wird der Zwischenabfluß auf etwa 20% des Direktabflusses, die reale Grundwasserneubildung auf etwa 80 mm/a geschätzt.

- GWD: Das von BAGROV entwickelte Verfahren ist zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der realen Evapotranspiration geeignet. Das Verfahren ist für die praktische Anwendung weiterentwickelt worden (Darstellung z.B. in [5]). Es ist geeignet für nicht oder wenig geneigtes Gelände. Mit dem auf diesem Verfahren basierenden Programm GWD wurde die GWN im Untersuchungsgebiet ERAM ermittelt. Für die Berechnungen der BGR der Grundwasserneubildung im Modellgebiet zwischen Alleringersleben und Walbeck wurde statt des im Programm vorgegebenen Rasters von 1x1 km der Raster auf 250x250m verfeinert.
- Die GWN wurde für die folgenden Einzugsgebiete der Aller bestimmt:
  - (a) oberirdisches EZG zwischen Alleringersleben und südlich Schwanefeld (Modell GWD\_2.1) als Vergleich zu den Berechnungen nach dem Bodenwasserhaushalt und mit NASIM
  - (b) unterirdisches EZG zwischen Alleringersleben und südlich Schwanefeld (Modell GWD\_3) als Vorgabe bei der Kalibrierung des hydraulischen Modells
  - (c) unterirdisches EZG zwischen Alleringersleben und Walbeck (Modell GWD\_4) als Vergleich zu den Ergebnissen nach dem MoMnQ-Verfahren und mit NASIM

Als Eingangsdaten wurde die Nutzungsform, die Bodenart, der Grundwasserflurabstand, der Niederschlag (unkorrigiert), die potentielle Verdunstung und der Reduktionsfaktor für bedeckte Grundwasserleiter spezifiziert. Es wurden folgende Werte erhalten:



Modell	Fläche, km <sup>2</sup>	GWN, mm/a
GWD_2.1	49,1	83
GWD_3	44,6	84
GWD_4	58,0	87

- *A<sub>0</sub>-Linienverfahren. Für den Zeitraum 1992 bis 1996 wurde auf der Basis der Tageswerte des Abflusses an den Pegeln Alleringersleben und Weferlingen der unterirdische Abfluß nach dem A<sub>0</sub>-Linienverfahren abgegliedert. Als Mittelwert für den Zeitraum 1992-1996 (ohne Berücksichtigung des Jahres 1994 mit erhöhten Niederschlägen) ergibt sich eine GWN von ca. 110 mm/a. Dies entspricht erwartungsgemäß der nach dem MoMNQ-Verfahren berechneten GWN von 115 mm/a.*
- *Wasserwerk Helmstedt. Das Einzugsgebiet der im Brunnental gelegenen Brunnen Waldfrieden, Clarabad, Burgberg, Quellenhof und Adam & Eva weist eine Fläche von etwa 6,5 km<sup>2</sup> auf. In den Jahren 1972-1995 förderten diese Brunnen im Mittel etwa 0,986 Mio. m<sup>3</sup>/a. Grundwassermeßstellen stromabwärts (Hy Hmt 11/70) und stromauf (Hy Hmt 16/70) zeigen keine langjährige sinkende Tendenz: das Grundwassersystem dürfte sich daher in einem quasi-stationären Zustand befinden. Aus den obigen Werten berechnet sich im Einzugsgebiet Brunnental eine GWN von etwa 150 mm/a (Näherungswert). Die Berechnung und Feldbeobachtungen legen nahe, daß im Bereich des Brunnentales auch eine erhöhte indirekte GWN erfolgt.*

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Grundwasserneubildung für das Einzugsgebiet der Aller zwischen Alleringersleben und Walbeck sind nachstehend zusammengestellt. Um einen Vergleich der Ergebnisse untereinander zu ermöglichen, sind die Einflüsse unterschiedlicher Ausgangsdaten, Grundwasserentnahmen, Einleitungen etc. korrigiert worden (weitere Werte in [12], Tabelle 4.9):

Berechnungsverfahren		Fläche km <sup>2</sup>	mittlere GWN mm/a	Bezugs- zeitraum
MoMNQ-Verfahren nach DEMUTH	BfG	58,0	126	1972-95
NASIM	BfG	58,6	117	1989-95
GWD Modell 4	BGR	58,0	87	1971-94

*Auffällig ist, daß die Neubildungsberechnungen aus Abflußmessungen (MoMNQ-Verfahren, NASIM) deutlich über den Neubildungsraten aus der Verdunstungsberechnung (GWD) sowie der Bodenwasserhaushaltsberechnung liegen. Dies dürfte nach [12] (Kap. 4.1.3.8) weitgehend auf Unsicherheiten in den Abflußmessungen zurückzuführen sein.*

*Die Berechnungen mit dem Programm GWD bieten ebenso wie die Berechnungen aus dem Bodenwasserhaushalt den Vorteil einer flächendifferenzierten Darstellungsmöglichkeit der GWN. Die Ergebnisse nach dem BAGROV/GLUGLA-Verfahren (GWD) scheinen der Wirklichkeit am nächsten zu kommen.*

*Die mittlere langfristige Grundwasserneubildungsrate beträgt unter den heutigen Verhältnissen für das unterirdische EZG der Aller zwischen Alleringersleben und Walbeck etwa 87 mm/a. Die mit GWD Modell 4 erhaltene flächendifferenzierte Verteilung der GWN für das Modellgebiet (Abbildung 28) wird als Vorgabe der Grundwasserneubildung in den Süßwasserechnungen benützt.*

#### 4.1.2 Im Modellgebiet betriebene Brunnen

Im Modellgebiet wird von den Wasserwerken (WW) Helmstedt und Beendorf in mehreren Brunnen Grundwasser entnommen ([12], Kap. 4.1.4.1).

Das WW Helmstedt betreibt die Brunnen Burgberg, Quellenhof, Waldfrieden (Brunnen II), Adam & Eva, Clarabad (Brunnen II), Halbmeilenberg, Harkling und Bröddel. Die Brunnen Waldfrieden (Brunnen I), Clarabad (Brunnen I), Karlsquelle und Neuer Brunnen sind stillgelegt worden, die Brunnen Harkling und Bröddel befinden sich außerhalb des Modellgebietes. Das WW Beendorf betreibt von ursprünglich zehn Brunnen nur noch den im Modellgebiet liegenden Brunnen 8.

Die Position und Stratigraphie der Filterstrecken der im Modellgebiet betriebenen Brunnen sowie die mittleren Entnahmemengen in den Jahren 1992-1996 sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, entnehmen die Brunnen das Wasser aus unterschiedlichen Horizonten:

- Der Brunnen Clarabad (Hy Hmt Cl II/72), der von allen 8 Einzelbrunnen des WW Helmstedt die größte Förderleistung erbringt, ist im Rhät in ko(2b) bis ko(1)6/L3, L4 und L5 ausgebaut ([12], Kap. 5.2.10).
- Fünf der acht Brunnen des WW Helmstedt fördern ausschließlich aus dem Jura-L1 (die Brunnen Adam & Eva, Halbmeilenberg, Harkling, Quellenhof und Waldfrieden) sowie ein weiterer gleichzeitig aus Jura und Rhät (Brunnen Buchberg). Die Brunnen sind im Liassandstein verfiltert, einige zusätzlich auch im Oberen, sowie im Unteren Hettangium [..]. Die Bildungen des Sinemur spielen als Förderhorizont keine Rolle ([12], Kap. 5.2.11).
- Der Brunnen 8 (Hy Beo 1b) der Wasserversorgung Beendorf fördert aus dem Mittelrhät ko(2b) bis Oberrhät ko(3c)/L3 ([12], Kap. 5.2.10) oder L4/L5 ([12], Tabelle 3.5).

Um die Konsistenz zwischen den für den Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten herangezogenen Potentialmeßwerten mit den Rechenwerten zu gewährleisten, wird in den Kalibrierungsrechnungen R42 (und ebenfalls im Rechenfall R43) aus den Brunnen der Mittelwert der Entnahmen in den Jahren 1992 bis 1996 entnommen ([12], Tabelle 4.10). Dieser betrug für die im Modellgebiet liegenden Brunnen  $986'664 \text{ m}^3/\text{a}$  oder  $31,29 \text{ l/s}$  (Tabelle 1).

#### 4.1.3 $k_f$ -Werte und Porosität

Die in [8] und [12] dokumentierte Parametrisierung des  $k_f$ -Wertes und der Porosität (Basiswerte, Bandbreiten) der hydrostratigraphischen Modelleinheiten des Deckgebirges ERAM basiert auf mehreren Grundlagen:

- dem lithologisch-petrographischen Befund (Schichtenverzeichnisse der Bohrungen Hy Mors 1983-1985 und Dp Mors 1994-1995 sowie bohrlochgeophysikalisch überarbeitete Schichtenverzeichnisse der Bohrungen Dp Mors 1988-1990)

- Laboruntersuchungen (Sieb- und Sedimentationsanalyse, Durchströmungsversuche, Dünnschliffuntersuchungen, Porositätsbestimmungen im Labor)
- geophysikalischen Bohrlochmessungen (z.B. Circumferential Borehole Imaging Log = CBIL-Messungen, Fluid-Logging, Porositäts-Log)
- hydraulischen Tests (Drillstem-Tests, vereinzelt Druckpulstests)
- Kurzpumpversuchen in Grundwassermeßstellen

Die hydrostratigraphischen Einheiten können als Porenwasserleiter, als Kluftwasserleiter oder als Mischform zwischen den beiden erwähnten Typen ausgebildet sein:

- Poröse Medien treten nur in quartären und kretazischen Lockergesteinssedimenten auf.
- Mischformen der Grundwasserströmung mit überwiegender Kluftwasserbewegung und untergeordneter Porenwasserströmung (Doppelporosität) charakterisieren die Sandsteine des Lias, des Rhät, des Schilfsandstein und des Buntsandstein.
- Im übrigen Modellraum findet die Grundwasserströmung entlang von Klüften statt.

Im vorliegenden Grundwassermodell werden alle hydrostratigraphischen Einheiten als äquivalent-poröse Medien betrachtet.

Die Definition äquivalenter  $k_f$ -Werte für größere geklüftete Gebirgsbereiche kann über die Verknüpfung von Transmissivität, Häufigkeit, Vernetzung, Raumlage und eventuell weiterer bekannter Parameter wasserführender Strukturen (Klüfte) in geeigneten Modellen erfolgen.

Die in [8] (Kap. 4.3) und [12] (Kap. 5.2) vorgenommene Gegenüberstellung der Klufthäufigkeit (basierend auf CBIL-Messungen) gegen gemessene Transmissibilität [ $m^3$ ] (spezifische Permeabilität multipliziert mit Aquifermächtigkeit) läßt für den gesamten Datensatz (unabhängig vom Klufftyp) keine Abhängigkeit der Profildurchlässigkeit von der Klufthäufigkeit erkennen. Auch für verschiedene Kluffklassen wurde keine Abhängigkeit zwischen Häufigkeit der Struktur und Transmissibilität gefunden. Ebenfalls als unkorreliert wird die Klufthäufigkeit innerhalb der getesteten Intervalle im Steinmergelkeuper und die hier ermittelte Transmissibilität eingestuft. Lediglich für die Gesamtheit aller mit Kalzit verfüllten Klüfte wird eine Abhängigkeit zwischen Häufigkeit der Struktur und Transmissibilität erkannt.

Die Problematik, auf der Grundlage der unkorrelierten Beziehung von Klufthäufigkeit und hydraulischem Testergebnis hydraulische Durchlässigkeiten für ein äquivalent-poröses Medium zu schätzen, wird z.B. anhand des Steinmergelkeuper ([8] Kap. 4.2.7, [12] Kap. 5.2.9) deutlich. Die Parameterzuweisung für die „Gebirgsdurchlässigkeit“ geklüfteter Medien erfolgte daher vorwiegend auf der Grundlage der Auswertungsergebnisse geohydraulischer Tests mit größerer Reichweite. In die Argumentation zur Herleitung dieser Parameter wurden u.a. Ergebnisse von Durchströmungsmessungen und Kurzpumpversuchen mit einbezogen.

Soweit vorhanden erfolgte in [8] und [12] die Zuweisung des Porositätsparameters der hydrostratigraphischen Modelleinheiten auf der Grundlage von Auswertungsergebnissen der aufgeführten Labormessungen. Im Falle des Fehlens porosimetrischer Untersuchungsergebnisse wurden für Tonsteine effektive Porositätswerte aus der Literatur entnommen.

Die als Ausgangswerte für die Kalibrierungsrechnungen dienenden hydraulischen Leitfähigkeiten (Basiswert) und ihre Bandbreiten sowie die effektiven Porositäten aller hydrostratigraphischen Einheiten (K-Klassen) des 3D Süßwassermodells sind in Tabelle 4 bis Tabelle 6 wiedergegeben. Ihre Festlegung basiert auf [8] und [12]; die effektive Porosität der Schichtenfolge DGL beruht auf an Bohrkernen ermittelten Porositäten. Für die Kalibrierungsrechnungen vorgenommene Modifikationen der  $k_f$ -Werte und Bandbreiten werden in Kap. 4.3.3.1 diskutiert.

Die Festlegung des zusammenfassenden  $k_f$ -Wertes für das Quartär A1-A4 erfolgte unter Berücksichtigung der Mächtigkeiten und Heterogenität der Einheiten A1 bis A4 und der  $k_f$ -Basiswerte und Bandbreiten dieser Einheiten. Dem Quartär wurde in den Basiswerten eine einheitliche anisotrope (parallel und senkrecht zur Schichtung) Durchlässigkeit zugewiesen, mit einem Basiswert von  $10^{-5}$  m/s in horizontaler Richtung und  $10^{-7}$  m/s senkrecht zur Schichtung. Die Bandbreiten für diese beiden Richtungen betragen  $10^{-6}$  bis  $10^{-4}$  bzw.  $5 \cdot 10^{-8}$  bis  $5 \cdot 10^{-7}$  m/s (vgl. Tabelle 5).

In nachstehender Aufstellung sind die Basiswerte der BGR für die einzelnen Einheiten A1 bis A4 aus [12] den für A1-A4 festgehaltenen Werten gegenübergestellt

BGR $k_f$ -Basiswerte Quartär (Bandbreite) nach [12] (Tab. 5.1.4)	3D Süßwassermodell ERAM
A1 qw/f – Sande (Niederterrasse)	$5 \cdot 10^{-4}$ A1-A4/210 Anfangswerte und Bandbreiten
A2 $q_e(2)$ -qh+t – Schluff, Sand, Ton (Mischquartär)	$10^{-6}$ Kalibrierung
A3 $q_e(1-2)$ gf – Schmelzwasser-Sande (Elster-Zwischensande)	$10^{-4}$ Horizontal: $1 \cdot 10^{-5}$ ( $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ ) Vertikal: $1 \cdot 10^{-7}$ ( $5 \cdot 10^{-8}$ – $5 \cdot 10^{-7}$ )
A4 $q_e/gm$ – Geschiebemergel (Elster-Grundmoräne)	$5 \cdot 10^{-8}$

Die für A1-A4 festgehaltenen Bandbreiten decken die Bandbreiten in [12] annähernd ab. Um die mit der Zusammenfassung des Quartär zu einer Einheit und der Parameterzuweisung zusammenhängende Unsicherheit abzumindern, werden die anisotropen  $k_f$ -Werte des Quartär A1-A4 in die Kalibrierungsrechnungen R42 einbezogen.

#### 4.1.4 Grundwasserpotentiale

Im Modellgebiet ERAM besteht in [12] und [8] ein umfangreicher Datensatz zu gemessenen Grundwasserpotentialen in Bohrungen. Die Meßwerte der Grundwasserpotentiale beruhen auf zwei unterschiedlichen Quellen:

- Periodische Messungen des Grundwasserspiegels in den Grundwassermeßstellen Dp Mors, Hy Beo, Hy Hmt, Hy Mors und StAU. Grundwasserganglinien liegen für zahlreiche Grundwassermeßstellen im Modellgebiet in [8] (Anlage 24) und in [12] (Anlage 9) vor. Für die Grundwassermeßstellen wurde eine sogenannte Referenz-Wasseranalyse definiert, die ebenfalls einen Meßwert der Grundwasserdichte (oder zumindest der elektrischen Leitfähigkeit) umfaßt ([12], Anlage 7.2.1). In Grundwassermeßstellen mit erhöhter Grundwasserdichte erfolgte in der Darstellung der Ganglinien der Grundwassermeßstellen ([8], Anlage 24) eine Dichtekorrektur – neben der gemessenen Grundwasserganglinie wird eine Ganglinie des äquivalenten Süßwasserpotentials gegeben. Die Ganglinien

der Grundwasserpotentiale der meist wenig tiefen Grundwassermeßstellen mit geringer Salinität blieben unkorrigiert.

- Weitere, zur Modellbeurteilung herangezogene Grundwasserpotentiale beruhen auf geohydraulischen Tests ([12], Anlage 10). Auch hier erfolgte die Angabe eines äquivalenten Süßwasserpotentials, da für gemessene Formationswasserdrucke systematisch das äquivalente Süßwasserpotential berechnet wurde.

Die Ermittlung der Süßwasserpotentiale in [8] und [12] wird in Kap. 4.3.4.1 behandelt.

## 4.2 Modellkonzept und Randbedingungen

### 4.2.1 Einleitung

Das 3D Süßwassermodell ERAM kann entweder mit einer fest vorgegebenen Modelloberfläche oder mit Vorgabe einer regional differenzierten Grundwasserneubildung, in der der Grundwasserspiegel frei berechnet wird, gerechnet werden. Die Form der Grundwasseroberfläche ist ein Resultat der Wechselwirkung des Aquifers mit den Oberflächengewässern wie der Aller, der Infiltration von Niederschlägen, der Exfiltration in Quellen und Brunnen sowie der Wasseraustritte in Wasserläufe und der Verdunstung.

In den Modellrechnungen mit einer festen Grundwasseroberfläche als oberem Modellrand liegt dieser auf dem Niveau des vorgegebenen Grundwasserspiegels und wird für alle Knoten der Modelloberfläche als Dirichlet-Randbedingung mit  $h = z$  definiert. Die Potentiale an den Knoten werden auf der Basis des Grundwassergleichensplans (Anlage 8 in [12]) linear interpoliert.

Eine alternative Möglichkeit ist die geländeabhängige Vorgabe einer Infiltrationsrate und die Berechnung der freien Grundwasseroberfläche (Neuman-Randbedingung).

Die beiden Methoden weisen folgende Vor- und Nachteile auf:

#### a) Freie Grundwasseroberfläche

Bei einer Neuman-Randbedingung mit freier Grundwasseroberfläche wird der Grundwasserfluß im Modellraum von der Grundwasserneubildung am oberen Rand des Modellgebietes gespeist. Dazu wird am oberen Rand z.B. eine Grundwasserneubildungsrate vorgegeben oder ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Grundwasserneubildung und z.B. dem Grundwasserflurabstand, der Bodenbeschaffenheit oder dem Bewuchs angesetzt.

Die berechnete Grundwasseroberfläche, sowie je nach Vorgehen die berechneten In- und Exfiltrationsraten, können mit der aus den Grundwasserspiegelmessungen abgeleiteten Grundwasseroberfläche und den mit bodenkundlichen Methoden ermittelten flächenspezifischen Grundwasserneubildungsraten (Kap. 4.1.1) verglichen werden.

Bewertungsgrößen zur Beurteilung der Modellgüte sind die Lage der Grundwasseroberfläche, berechnete und gemessene Potentiale in der Tiefe und die Grundwasserin- und -exfiltration.

b) Modelloberfläche mit Festpotentialrandbedingung

Bei der festen Vorgaben der Grundwasseroberfläche als oberer Modellrand (Dirichlet-Randbedingung) sind die In- und Exfiltrationsraten bei vorgegebener Durchlässigkeitsverteilung implizit in der Vorgabe enthalten.

Die physikalische Lage der Grundwasseroberfläche ist primär eine Funktion des Zusammenwirkens von In- und Exfiltration und der  $k_f$ -Verteilung v.a. in den oberflächennahen Schichten. Da jedoch die vorgegebene Grundwasseroberfläche keine physikalisch ermittelte Fläche darstellt (resultierend aus Infiltration/Exfiltration und Durchlässigkeitsverteilung im Untergrund), sondern aus den Meßdaten konstruiert worden ist, entstehen lokale Inkonsistenzen, die in Modellrechnungen zu unrealistischen Grundwasserflüssen über den oberen Modellrand Anlaß geben. Die Wasserbilanz ist damit ein Indiz für die Konsistenz von Grundwassergleichenplan, Durchlässigkeitsverteilung und Infiltrationsrate.

In den Rechnungen mit dem 3D Süßwassermodell ERAM wird die Grundwasserneubildung vorgegeben und der sich einstellende Grundwasserspiegel berechnet (Neuman-Randbedingung).

#### 4.2.2 Modellkonzept freie Grundwasseroberfläche, Rechenprogramm

Für die Berechnung der freien Grundwasser-Oberfläche wurde das Rechenprogramm CGM (Colenco Groundwater Model) verwendet, das für die speziellen Randbedingungen an der Grundwasser-Oberfläche

Fall 1: hydraulisches Potential an der Modelloberfläche entspricht der topographischen Höhe  $h = z$

Fall 2: Fluß über die Grundwasser-Oberfläche

Fall 2a: falls  $h < \text{Geländehöhe}$ :  $q_n = Q_{\text{Infiltration}}$

Infiltration

Fall 2b: falls  $h = \text{Geländehöhe}$ :  $q_n = k_f dh/dn$

Exfiltration

erweitert wurde (FSCGM, Free Surface Colenco Groundwater Model, [15]).

Die Randbedingung (1)  $h = z$  wird über ein vertikales Verschieben der Modelloberfläche realisiert, was eine Veränderung der hydraulischen Transmissivität dieser Einheit bedeutet (Abbildung 29). Die Lösung des Problems erfolgt durch eine Picard Iteration, die als abgeschlossen betrachtet wird, falls die größte Verschiebung eines Oberflächenknotens innerhalb zweier aufeinanderfolgender Iterationen kleiner als ein vorgegebener Grenzwert ist.

Der Fluß über die Modelloberfläche wird für den Fall „Infiltration“ als Eingabeparameter vorgegeben und ist als Randbedingung zweiter Art realisiert (Neumann Randbedingung, Fall 2a). Der Eingabeparameter Infiltrationsrate wird auf 2-dimensionalen Oberflächenelementen definiert (Abbildung 32).

Für den Fall „Exfiltration“ (Fall 2b) werden die Knoten mit einer Randbedingung 3. Art behandelt, falls die berechnete Grundwasseroberfläche an oder über der Geländeoberfläche liegen würde.

Für die Modellrechnungen mit freier Oberfläche ist ein Basiselementnetz, das die hydrogeologische Geometrie definiert, erforderlich. Sinkt der berechnete Grundwasserspiegel ab, so wird das Elementnetz komprimiert; bei einem Anstieg weitet es sich, unter Einhaltung des Basiselementnetzes aus. Erreicht der berechnete Grundwasserspiegel die Geländeoberfläche (digitales Geländemodell), so kann Exfiltration erfolgen. Das in den Modellrechnungen verwendete Geländemodell basiert auf von der BGR im Maßstab 1:10'000 digitalisierten Höhenkurven (siehe Abbildung 30).

Abbildung 32 visualisiert die Modellrandbedingung „flächenhafte Grundwasserneubildung“, die im ersten nichtlinearen Iterationsschritt wirksam ist. Tritt in weiteren Iterationsschritten eine Verschneidung der freien Grundwasseroberfläche mit der Geländeoberfläche ein, so erfolgt zur Bestimmung der Exfiltrationsgebiete eine iterative Anpassung der Abgrenzung Ex- und Infiltrationsgebiet. Für die Infiltrationsgebiete wird die in Abbildung 32 illustrierte Randbedingung beibehalten. Die Exfiltrationsgebiete und die zugehörigen Exfiltrationsraten konvergieren im Rahmen der Lösung der Nichtlinearität gemeinsam mit der freien Grundwasseroberfläche auf ihre endgültige Form.

#### 4.2.2.1 Konvergenzkriterium

Folgende Genauigkeit (Konvergenzkriterien) wurde in den Kalibrierungsrechnungen R42 angewendet:

	R42 Phase A	R42 Phase B
Rechenprogramm	FSCGM Version 1.0	FSCGM Version 2.0
Beendigung der Iterationen:		
(a) bei der Iteration gegenüber der vorhergehenden die Variation des Potentials an keinem Beobachtungspunkt (Meßstellen) den Wert von x Metern erreicht	x = 1 m	x = 0,15 m
(b) auf alle Fälle nach Ausführung von n Iterationen	n = 5	n = 25
Interne Iterationen des Löser	20000	6000

#### 4.2.2.2 Verwendetes Programm

Die ersten 543 Iterationen von R42 (Phase A) wurden mit der Version 1.0, die 512 Iterationen der Phase B mit der verbesserten Version 2.0 des Programmes FSCGM, durchgeführt.

### 4.2.3 Randbedingungen für die vertikalen Modellränder und die Modellbasis

#### 4.2.3.1 Undurchlässige Modellränder

Die Lage der vertikalen undurchlässigen Modellränder leitet sich aus der in [12] (Anlage 8) angeführten unterirdischen Einzugsgebietsgrenze des Endlagerstandorts ab (Abbildung 1, Hydroisohypsenplan Anlage 8 in [12]).

Der südwestliche Modellrand folgt in den Hochlagen des Lappwalds dem Verlauf der in Anlage 8 [12] ausgewiesenen Wasserscheide des oberflächennahen Grund-

wassers. Der nordöstliche Modellrand in der Weferlinger Triasplatte verläuft entlang der Wasserscheide des oberflächennahen Grundwassers im Erxlebener Forst.

Quer zum Allertal entsprechen der nordwestliche und südöstliche Modellrand dem Verlauf von Stromlinien, die auf der Grundlage des Hydroisohypsenplans ausgehend von den Abflußmeßstellen Alleringersleben (A01) und Walbeck (A06) der Aller (Abbildung 41) innerhalb der Weferlinger Triasplatte und der Lappwaldmulde konstruiert wurden. Die Fläche des Einzugsgebietes der Aller zwischen Alleringersleben (A01) und Walbeck (A06) und damit die Gesamtfläche des Modellgebiets beträgt 58,62 km<sup>2</sup>.

Der untere Modellrand ist innerhalb der Lappwaldmulde die Basis des Schilfsandstein (Anlage 5.2 in [12]). Im Allertal ist der untere Modellrand durch die Basis des Deckgebirges (Salzspiegel) gegeben. In der Weferlinger Triasplatte bildet die Schichtunterkante des mittleren Buntsandstein die Modellbasis ([12], Anlage 5.2).

#### 4.2.3.2 Möglichkeit eines seitlichen Zuflusses im Allertal

In den Kalibrierungsrechnungen R42 ist die gesamte vertikale Modellberandung undurchlässig.

Die Auswirkungen eines im Quartär und der Oberkreide offenen Randes an der Süd- und Nordgrenze des Modells im Allertal wurde nach Abschluß der Kalibrierungsrechnungen mit den kalibrierten Parametern untersucht (vgl. Kap. 4.4.3).

Die zur Dokumentation des heutigen und zukünftigen Zustandes verwendeten Rechenfälle R43 und R44 sind mit einem im Allertal in Quartär und Oberkreide offenen Modellrand berechnet worden.

#### 4.2.3.3 Randzufluß Lappwald

Testrechnungen mit dem Süßwassermodell ERAM zeigten, daß entlang der Modellgrenze Lappwald markant tiefere Potentiale berechnet als gemessen werden. Diese Möglichkeit ist in [8] (Kap. 5.3) angesprochen worden: *Es ist nicht auszuschließen, daß das Einzugsgebiet des WW Helmstedt im Unterrhät-Grundwasserleiter nach Westen weiter reicht, als die unter- und oberirdische Wasserscheide für das oberflächennahe Grundwasser. Nach Osten ist eine Ausbreitung des Senktrichters durch das Auskeilen des ko(1) nicht möglich.*

Eine Möglichkeit, die in den Kalibrierungsrechnungen gegenüber den Messungen generell sehr niedrigen berechneten Potentiale an der Modellgrenze Lappwald zu erklären, ist die Annahme, daß durch die Brunnenentnahme im Brunnenal das unterirdische Einzugsgebiet des Lappwaldes eine Vergrößerung nach Westen erfahren hat, daß also bei der begrenzten Ausdehnung des Süßwassermodells im Lappwald diesem Umstand mit einem Randzufluß Rechnung getragen sollte.

Auf die in den Kalibrierungsrechnungen im Lappwald vorgegebenen Randbedingungen vom Typ "vorgegebener Grundwasserfluß" wird in Kap. 4.3.3.2 eingegangen.



#### **4.2.4 Randbedingungen an der Modelloberfläche**

Wie in Kap. 4.2.1 ausgeführt, werden die Süßwasserrechnungen mit einer freien Oberfläche unter Vorgabe einer regional differenzierten Grundwasserneubildung durchgeführt.

##### **4.2.4.1 Flächenhafte Grundwasserneubildung**

Die Grundlage der Modellrandbedingung „flächenhafte Grundwasserneubildung“ basiert auf der mit dem Programm GWD ermittelten Grundwasserneubildung im 250m-Rastergitter (Abbildung 28). Die Übertragung dieser Daten vom Rastergitter zur Finite-Elemente-Diskretisierung der 3D Modelloberfläche erfolgte mit Kriging (Abbildung 31). Infolge der in Testrechnungen unrealistisch hohen Absenkung in den Entnahmebrunnen wurde die Grundwasserneubildung in einem Teil des Verbreitungsgebietes L1/131 im Brunnental auf 95 mm/a erhöht (vgl. Kap. 4.2.5.5). Die zur Anwendung kommende GWN geht aus Abbildung 32 hervor.

##### **4.2.4.2 Festpotentiale**

Um bei den Rechnungen mit freier Oberfläche eine raschere Konvergenz zu erreichen, werden dafür geeignete Gebiete mit einem Festpotential belegt. Im Modellgebiet ERAM bietet sich dafür die Aller an, die den regionalen Vorfluter darstellt und eine permanente Wasserführung aufweist.

Hierzu werden an allen Modellknoten entlang des Verlaufs der Aller Festpotentiale vorgegeben. Das jeweilige Potentialniveau einzelner „Aller“-Modellknoten wird durch Interpolation aus der Grundwasseroberfläche „Hydroisohypsenplan oberflächennahes Grundwasser (Zeitraum Sept. 1996)“ ([12], Anlage 8) abgeleitet. Das Festpotential der Aller am Südrand des Modells beträgt 113,0 mNN, am Nordrand 94,8 mNN.

Dieser Ansatz impliziert, daß entlang der Aller keine iterative Berechnung der freien Grundwasseroberfläche erfolgt. Entsprechend der Richtung und Größe des an Festpotentialknoten vorliegenden Potentialgradienten erfolgt die Berechnung eines Grundwasserzu- oder -austrittes. Dieser vereinfachende Ansatz vernachlässigt mehrere, im Rahmen einer detaillierteren Betrachtung der hydraulischen Anbindung der Aller zum oberflächennahen Grundwasser potentiell zu berücksichtigende Größen wie zum Beispiel variable Wasserstände im Oberflächengewässer oder eine potentiell vorhandene Kolmatierung des Flußbetts der Aller. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird eine detailliertere Behandlung der Interaktion der oberflächennahen Aquifere mit Oberflächengewässern zur Behandlung der Fragestellung „Langzeitsicherheit ERAM“ nicht als erforderlich betrachtet.

##### **4.2.4.3 2D Verteilschicht und ihre Wirkungsweise**

###### Einführung einer 2D Verteilschicht

Da die Grundwasserneubildung in der Regel (empirische Methoden, GWD) durch die Verhältnisse im Oberflächenbereich (bis einige Meter Tiefe) bestimmt wird, wird die vorgegebene Grundwasserneubildung kaum mit der „Tiefensickerung“ auf dem Niveau der Grundwasseroberfläche übereinstimmen. Es handelt sich dabei um das

Phänomen des in [12] (Kap. 4.1.3.1) angeführten „Zwischenabflusses  $A_z$ “: Die im Rahmen der Untersuchungen der Grundwasserneubildung im Modellgebiet ERAM angewandten Verfahren zählen ausnahmslos zu den Wasserhaushaltsberechnungen. Bei allen Verfahren ist zu berücksichtigen, daß nicht alles in die ungesättigte Zone infiltrierende Niederschlagswasser den Grundwasserleiter erreicht, sondern ein Teil, bei Vorhandensein von wasserstauenden Horizonten über dem obersten Grundwasserleiter, nach mehr oder weniger kurzer Aufenthaltsdauer wieder zum Oberflächenabfluß wird. Dieser sogenannten Zwischenabfluß ( $A_z$ ) läßt sich nur schwer quantifizieren.

Testrechnungen zeigten, daß bei Vorgabe einer für die Durchlässigkeitsverhältnisse im Untergrund zu hohen Infiltrationsrate bei der Berechnung der freien Grundwasseroberfläche ohne besondere Vorkehrungen im Ausstrichbereich geringdurchlässiger Schichten an der Modelloberfläche zu hohe Potentiale berechnet werden.

Ein in [13] verwendetes Vorgehen zur Behandlung dieses Phänomens, das auch in den vorliegenden Rechnungen zur Anwendung kommt, besteht darin, über das gesamte 3D Modell eine 2D Elementschicht auszubreiten. Diese Elementschicht soll neugebildetem Grundwasser erlauben, aus Bereichen mit geringdurchlässigem Untergrund in topographisch tieferliegende abzufließen und die Infiltration in 3D Elemente höherer Durchlässigkeit zu ermöglichen (Abbildung 33, Abbildung 34).

Unter Berücksichtigung der Beschaffenheit der Bodenverhältnisse im Modellgebiet ERAM – der Untergrund aus Festgesteinen ist auch im Lappwald und in der Weferlinger Triasplatte meist von geringmächtigen sandigen Lockergesteinen bedeckt – wurde in Testrechnungen für die gesamte 2D Verteilschicht eine einheitliche Transmissivität von  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  festgelegt. Dies entspricht etwa der Transmissivität einer 1 m mächtigen Sandschicht.

Für das 3D Süßwassermodell ERAM, in dem die Modelloberfläche nicht mit der Geländeoberkante, sondern mit der Grundwasseroberfläche zusammenfällt, ergibt sich aus dem Konzept der Verteilschicht allerdings folgendes Problem:

- Fall 1: Verteilschicht „zu wenig durchlässig“ und/oder Infiltrationsrate „zu hoch“: Ist der Untergrund gering durchlässig so wird aus dieser Konfiguration ein „Grundwasserberg“ resultieren.
- Fall 2: Verteilschicht mit hoher Transmissivität: Ein zu hoher T-Wert der Verteilschicht führt dazu, daß viel Wasser bereits bei einer kleinen Neigung in der Verteilschicht gegen den Vorfluter abfließen kann. Im Extremfall wird der Grundwasserspiegel sehr flach liegen und kein Wasser wird mehr in den Untergrund infiltrieren. Dies ist problematisch dort, wo der Untergrund aus geringdurchlässigen Einheiten aufgebaut ist. Hydrogeologisch würde dies bedeuten, daß das Gebirge auf dem Niveau des berechneten Grundwasserspiegels eine hoch durchlässige Verteilschicht aufweist.

Die vorstehenden Überlegungen führten zu einer Gliederung der 2D Verteilschicht in drei Bereiche und ihren Einbezug als Variable in die Modellkalibrierung.

### Wirkungsweise

Die aus 2D Elementen aufgebaute Verteilschicht entlang der Modelloberfläche und die darunterliegende Oberfläche des Modells aus 3D Elementen weisen gemeinsame Knoten auf.

Die Berechnung im Modell mit freier Oberfläche zielt auf die Einhaltung der Flußbilanz. Für das Ensemble „vorgegebene Grundwasserneubildung / 2D Verteilschicht / 3D Untergrund / Geländemodell (Festpotential)“ wird die zur Einhaltung der Flußbilanz erforderliche Potentialverteilung berechnet. Für jeden Knoten wird ein Potentialwert berechnet. Die intern berechneten Flüsse (Flußerhaltung) werden nicht als Resultate ausgewiesen (Wert 0); lediglich für die Knoten an offenen Modellrändern oder innere Knoten mit z.B. einer Grundwasserentnahme, wird ein Fluß ausgewiesen.

Die Flüsse für die gemeinsamen Knoten 2D/3D an der Modelloberfläche (Randknoten) werden wie folgt berechnet (Abbildung 35):

- Normaler GW-Neubildungsknoten:  $Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$
- Exfiltrationsknoten (d.h. Knoten, der das Geländemodell erreicht) mit  $h = \text{Geländemodell/Festpotential}$ : Exfiltration  $Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4$ . Die Infiltration wird ausgeschaltet. Die Flüsse  $Q_2, Q_3, Q_4$  ergeben sich jetzt ausschließlich aus dem Festpotential  $h$  (und den umliegenden Potentialen).

Das Zusammenwirken von vorgegebener Grundwasserneubildung, In- und Exfiltration in das Modell (= Untergrund) sowie den Flüssen in der Verteilschicht bei den Simulationen mit freier Oberfläche soll anhand von Abbildung 33 diskutiert werden:

- Bei den Simulationsrechnungen mit freier Oberfläche wirkt auf die Modelloberfläche (= Oberfläche der 2D Verteilschicht) die Grundwasserneubildung.
- Das Wasser der Grundwasserneubildung gelangt in die 2D Verteilschicht und sickert aus ihr in das Modell ein, sofern es die Abflußverhältnisse im Untergrund ( $k_f$ -Wert, Gradient) erlauben (Abbildung 33, I).
- Das nicht infiltrierende Wasser aus der Grundwasserneubildung fließt in der 2D Verteilschicht hangabwärts (Abbildung 33, II), bis die Abflußverhältnisse im Untergrund eine Infiltration in den Untergrund (Modell) erlauben (Abbildung 33, III) oder es an einer Stelle, wo die Modelloberfläche (2D Verteilschicht und angrenzender Untergrund) das Geländemodell erreicht (= echte Exfiltrationszone), aus dem Modell austritt (Abbildung 33, IV).
- Aus dem 3D Untergrund kann ebenfalls Wasser in die Verteilschicht gelangen (Exfiltration, Abbildung 33, V). Dies ist z.B. im allgemeinen am Hangfuß der Fall. Dieses Wasser wird in die 2D Verteilschicht eintreten, in ihr abfließen und an einer Exfiltrationszone (Grundwasseroberfläche = Geländemodell) aus dem Modell austreten (Abbildung 33, IV).

Die Einführung der 2D Verteilschicht berücksichtigt diese Modellvorstellung: der Abfluß in den Lockergesteinen bzw. im aufgelockerten Fels in der Lappwaldmulde und in der Weferlinger Triasplatte wird in jenen Bereichen, in denen der Untergrund aus

geringdurchlässigen Gesteinen aufgebaut ist, zu einem kleineren oder größeren Teil in der 2D Verteilschicht erfolgen.

#### 4.2.5 Grundwasserentnahme im Brunntal

In den Modellrechnungen wird angestrebt, am Ort der Entnahmehäuser die in Tabelle 1 zusammengestellten Wassermengen den entsprechenden Einheiten zu entnehmen.

Die Modellierung der Grundwasserentnahme im Brunntal in den Kalibrierungsrechnungen R42 und im Rechenfall R43 ist zusammenfassend in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengestellt. Die geographische Position der Entnahmehäuser geht aus Abbildung 36 hervor.

##### 4.2.5.1 Überblick über die Modellierung der Entnahmehäuser

Bezüglich des Entnahmeniveaus und der hydrostratigraphischen Modelleinheit einzelner Brunnen ist folgendes zu bemerken:

Burgberg: Nach Tabelle 5.13 in [12] befindet sich die verfilterte Strecke in L1 (9,1 m), L2 (65,4 m) und L3 (64,5 m). Im Modell erfolgt die Entnahme an der Basis der am stärksten durchlässigen Einheit L3. Das Entnahmeniveau in L3 befindet sich im Brunnen zwischen 26,5 und -38 mNN, im Modell bei -30 mNN.

Quellenhof: In der Bohrung Quellenhof wird Wasser auf einem Niveau 75 bis 35 mNN aus dem Lias-Sandstein L1 entnommen. Die Basis der Entnahmestrecke liegt an der Oberfläche der Einheit L2. Im Modell erfolgt die Entnahme in L1 bei 79,9 mNN und 120,6-125,8 mNN (und damit etwas zu hoch, vgl. Kap. 4.2.5.3).

Waldfrieden: Im Brunnen Waldfrieden wird Wasser aus dem Lias-Sandstein L1 (Filterstrecke 10 m, 92-82 mNN) entnommen; die Filterstrecke erfaßt auch die gering durchlässige Einheit L2 (6 m). Im Modell erfolgt die Entnahme in L1 auf dem Niveau 119,0-121,8 mNN und in geringerem Maße auf 85,2 und 66,5 mNN.

Adam+Eva: In Adam+Eva wird Wasser in 2 Abschnitten von insgesamt 14 m Länge auf den Höhenlagen 132-126 mNN und 88-80 mNN aus dem Lias-Sandstein L1 entnommen. Die Basis der Entnahmestrecke liegt nahe der Oberfläche von L2. Im Modell erfolgt die Entnahme in L1 auf dem Niveau 72,7 und 98,7 mNN in Knoten, die sich an der Grenzfläche L1/L2 befinden.

Clarabad Br. II: Die Fördermenge des Brunnens Clarabad, der als einziger Brunnen auch aus dem Grundwasserleiter L5 fördert, kann nicht aufgeschlüsselt werden in Mengenanteile aus dem Grundwasserleiter L5 und solchen aus dem Grundwasserleiter L3 ([12], Kap. 5.2.10). Die Grundwasserentnahme erfolgt in einer 125 m langen Filterstrecke in den Einheiten L3 bis L5 zwischen den Niveaus 89 bis -36 mNN. Im Modell wird das Wasser zu zwei Dritteln aus L3 (Niveau 82,1 mNN) und zu einem Drittel aus L5-K2 (Niveau -4,7 mNN) entnommen

Halbmeilenberg: Wie im Brunnen Waldfrieden erfaßt die Filterstrecke des Brunnens Halbmeilenberg neben dem Lias-Sandstein (L1, 31 m, 135-104 mNN) auch 15 m

der geringer durchlässigen Einheit L2 (104-89 mNN). Im Modell wird das Wasser der Einheit L1 auf dem Niveau 121,9 mNN entnommen.

Brunnen 8: Gemäß Kap. 5.2.10 in [12] wird in Brunnen 8 des Wasserwerkes Beendorf das Wasser der Einheit L3/ko(2b)-ko(3c) entnommen. Das Entnahmeniveau befindet sich auf 105-100 mNN und 92-65 mNN. Im Modell wird das Wasser zwischen 99 und 84 mNN an der Basis der Einheit L3a/141, am Kontakt zur liegenden Einheit L6/146 entnommen. Auf die Modellierung des Brunnens 8 wird in Kap. 4.2.5.3 näher eingegangen.

#### 4.2.5.2 Entnahmeknoten

In den Entnahmehäusern mit mäßig durchlässigen Entnahmeeinheiten bei gleichzeitig relativ hohen Entnahmemengen (Quellenhof, Waldfrieden Br. II, Brunnen 8) wurde die Entnahme auf mehrere Knoten verteilt, die sich in der x-y-Ebene am Ort des Brunnens oder in dessen näherer Umgebung befinden. In den übrigen Bohrungen wird das Wasser in einem (Burgberg, Halbmeilenberg) oder 2 Knoten entnommen (Adam & Eva, Clarabad Br. II).

Die Entnahmeknoten mit Angabe der zugehörigen K-Klasse, der Höhenlage, der ungefähren Tiefe unter Geländeoberkante und der Entnahmemenge pro Knoten sind in Tabelle 3 enthalten. Die geographische Position der Entnahmeknoten geht aus Abbildung 36 hervor.

#### 4.2.5.3 Modellierung der Brunnen Quellenhof und Brunnen 8

Geometrisch bedingte Abweichungen zwischen der Modelltopologie und dem realen Ausbauprofil der Brunnen könnten – blieben sie unkorrigiert – im Modell partiell zu Grundwasserentnahme aus anderen als den von den Brunnen wirklich erfaßten Modelleinheiten führen. Die hier notwendigen und durchgeführten Anpassungen bzw. Vereinfachungen basieren neben geometrischen Aspekten auf den hydraulischen Leitfähigkeiten. Insbesondere zeigte sich eine solche Situation für die Brunnen Quellenhof und Brunnen 8 (vgl. Tabelle 1, Tabelle 3).

##### Quellenhof

Der Brunnen Quellenhof ist in der Einheit L1 von 75 m bis 35 mNN verfiltert (Tabelle 1). Hingegen ist im 3D Modell am Ort des Brunnens Quellenhof folgendes Profil realisiert:

127 mNN:	Modelloberfläche in R39 (= Grundwasserspiegel)
127 – 80 mNN:	L1/131/jusi-juhe
80 – 0 mNN:	L2/132/juhe-ko3c
0 – -30 mNN:	L3/142/ko2b

Anstelle der im Brunnen vorliegenden Einheit L1 kommt im Modell damit in der Entnahmestrecke 75-35 mNN die Einheit L2/132 vor. Wie oben ausgeführt worden ist, erfolgt im Modell in R42 und R43 die Entnahme in L1 bei 120,6 bis 125,8 mNN und 79,9 mNN (und damit etwas zu hoch).

### Brunnen 8

Ebenfalls im Gebiet des Brunnens 8 des WW Beendorf weicht die Modellgeometrie am Ort der Bohrung vom Profil der Entnahmebohrung ab.

Die Filterstrecke des Brunnens 8 des Wasserwerkes Beendorf (53,4-59,4 m, 67-94 m) befindet sich in L3/ko(2b)-ko(3c) ([12], Kap. 5.2.10). Das Entnahmeniveau liegt auf 105-100 mNN und 92-65 mNN.

In Abbildung 37 ist das Verbreitungsgebiet von L3a/141, L3/142, L5-K2/144 und L5-K1/145 sowie die Lokation von Brunnen 8 dargestellt. Der Brunnen 8 befindet sich außerhalb des Verbreitungsgebietes der Aquifere L3/142 und L5-K2/144. Entlang einer Nord-Süd verlaufenden Linie stoßen im Knoten 327282 die beiden Verbreitungsgebiete L5-K1/145 im Westen und L3a/141 am Ort von Brunnen 8 aneinander; es besteht damit die Möglichkeit, die Entnahme in das eine oder andere Gebiet zu legen.

Die Entnahme in Brunnen 8 wird an die Basis von L3a/141 (Kontakt zu L6/146) gelegt. Der westlichste Entnahmepunkt entspricht der geographischen Position von Brunnen 8 (Abbildung 37). Diese Entnahmeposition (geographische Lage) erleichtert damit den Zufluß von Wasser aus Richtung Allertal zum Brunnen 8. Die Entnahme erfolgt zu gleichen Teilen in 6 Knoten, die sich mit Ausnahme von Knoten 327282 (L3a/141, L5-K1/145, L6/146) alle in der Grenzfläche von L3a/141 mit L6/146 befinden (vgl. Tabelle 3).

#### **4.2.5.4 Verteilung der Entnahme auf hydrostratigraphische Einheiten**

Die modellierte Gesamtentnahme weist mit 31,29 l/s (Tabelle 2, Tabelle 3) denselben Wert auf wie die Vorgabe (Tabelle 1). In R42 Phase B wird folgenden Einheiten Wasser entnommen:

- In den Brunnen Quellenhof, Waldfrieden II, Adam & Eva und Halbmeilenberg Entnahme von 14,35 l/s in Einheit L1/131 (und sehr untergeordnet in Einheit L2/132)
- In den Brunnen Burgberg und Clarabad Br. II Entnahme von 11,01 l/s aus L3/142 (und sehr untergeordnet in L4/143)
- Im Brunnen Clarabad Br. II Entnahme von 4,07 l/s aus L5-K2/144 (und sehr untergeordnet aus L4/143)
- Im Brunnen 8 des WW Beendorf Entnahme von 1,86 l/s aus L3a/141 (und sehr untergeordnet aus L6/146 und L5-K1/145)

#### **4.2.5.5 Anpassungen im Brunnental**

##### Heraufsetzung der hydraulischen Leitfähigkeit

Die hydraulischen Leitfähigkeiten der Einheiten L1/131 und L6/146 und ihre Bandbreiten wurden im Zuge vorgängig ausgeführter Testrechnungen zur Brunnenentnahme verändert. Diese Modifikation ist motiviert durch die in den Testrechnungen gewonnene Erkenntnis, daß die vorgegebenen Entnahmeraten bei den geometri-

schen und hydraulischen Verhältnissen im Entnahmebereich WW Helmstedt und Brunnen 8 (WW Beendorf) zu unrealistisch hohen Absenkungen im Bereich der Brunnen führen. Realistische Absenkungen waren erzielbar mit einem  $k_f$ -Wert der Einheit L1/131 von  $4 \cdot 10^{-6}$  m/s und einem  $k_f$ -Wert der Einheit L6/146 von  $2 \cdot 10^{-7}$  m/s.

In den Kalibrierungsrechnungen R42 wurde die Bandbreite von L1/131 aus denselben Überlegungen von  $10^{-7} - 10^{-6}$  m/s auf  $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$  m/s, jene von L6/146 von  $10^{-8} - 10^{-7}$  m/s auf  $10^{-8} - 10^{-6}$  m/s ausgeweitet (Tabelle 4).

#### Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate

Die Modellrandbedingung flächenhafte Grundwasserneubildung basiert auf der mit dem Programm GWD ermittelten Grundwasserneubildung im 250m-Rastergitter. Basierend auf den oben angeführten Testrechnungen wurde in den Rechnungen mit freier Oberfläche die Grundwasserneubildung in einem Teil des Verbreitungsgebietes L1/131 im Brunnental von 55 mm/a auf 95 mm/a erhöht (Abbildung 32), ein Wert der etwa der mittleren regionalen Grundwasserneubildung entspricht.

Die Erhöhung der Grundwasserneubildung kann mit der verstärkten Infiltration infolge der Brunnenabsenkung im Brunnental begründet werden und wird durch Beobachtungen im Brunnental gestützt. Das Brunnental verläuft auf der sogenannten Brunnentalstörung. In den Talkessel münden mehrere Rinnen aus Süden und Norden, die der Mühlengraben im Brunnental aufnimmt. Der Mühlengraben wird durch den Teich am Quellenhof und den Schwanenteich (beide auf jurassischem Untergrund) aufgestaut. Die GWM Dp Mors 35 belegt, daß der durch den Brunnenbetrieb abgesenkte Grundwasserspiegel dort die Bachsohle um mehrere Meter unterfährt. Unterhalb des Überlaufes Schwanenteich findet deshalb – in Umkehrung der ursprünglichen Vorflutsituation – eine Infiltration von Oberflächenwasser statt, die zeitweise zum völligen Versiegen des Mühlengrabens führen kann.

Das Gebiet, in dem die Grundwasserneubildung auf 95 mm/a erhöht wurde, hat eine Fläche von 2,81 km<sup>2</sup> und nach den Berechnungen mit GWD eine mittlere GWN von 55 mm/a. Die Erhöhung der GWN in diesem Gebiet um 40 mm/a auf 95 mm/a entspricht einer zusätzlichen Grundwasserneubildung von rund 112'500 m<sup>3</sup>/a (rund 10% der Gesamtentnahme).

#### **4.2.6 Schächte Bartensleben und Marie**

Die Rechenfälle R42 (Kalibrierungsrechnungen) und R43 haben die Nachbildung der heutigen hydrogeologischen Verhältnisse zum Ziel. Dabei wird der anthropogenen Beeinflussung des Grundwasserspiegels durch die Grundwasserentnahme im Brunnental Rechnung getragen.

Abweichend vom Ist-Zustand sind die beiden Schachtanlagen Bartensleben und Marie im Modell hydraulisch inaktiv. Dies wird durch die Lage der beiden Schachtanlagen in meist nur wenig durchlässigen Einheiten und die nur geringen Wasserzuflüsse zu den beiden Schachtanlagen begründet und bei der Kalibrierung durch die Eliminierung einzelner durch die Schächte beeinflusster Wasserspiegelmessungen berücksichtigt (vgl. Kap. 4.3.4.3).

### **4.3 Kalibrierungskonzept und Umsetzung in den Kalibrierungsrechnungen**

Das Ziel der Modellkalibrierung besteht in erster Linie in der Anpassung der in die Kalibrierung einbezogenen Variablen ( $k_f$ -Werte der hydrostratigraphischen Einheiten, Randzufluß im Lappwald, Transmissivität der 2D Verteilschicht) innerhalb Bandbreiten, damit die gerechneten Potentiale den gemessenen (Bestwert, Bandbreite, Maximal- oder Minimalwert) möglichst nahe kommen. Die Modelleichung erfolgt automatisch.

Als erste Rechenläufe der Kalibrierung werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Dabei wird durch Änderung je eines einzelnen Parameters die Auswirkung auf die Potentialverteilung in Form der Zielfunktion (Summe der quadrierten Abweichungen Meßwert-Rechenwert) bzw. der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert ermittelt.

Basierend auf den ermittelten Sensitivitäten erfolgt in den anschließenden eigentlichen Kalibrierungsrechnungen durch das Programm (Simplex-Algorithmus) eine automatische iterative Festlegung von Schätzwerten für einzelne oder mehrere Variablen, eine anschließende stationäre Rechnung mit dem neu festgelegten Parametersatz und die Ermittlung der Zielfunktion bzw. der mittleren Abweichung an Vergleichspunkten zwischen den gemessenen und den berechneten Wasserständen. Unter Berücksichtigung dieses Ergebnisses legt das Programm eine neue Parameterverteilung fest. Es berücksichtigt dabei die positiven (Verringerung der Zielfunktion) bzw. die negativen Auswirkungen (Vergrößerung der Zielfunktion) der Parameterfestlegungen der vorhergehenden 44 Iterationen (= Anzahl Variablen +1). Dieser Prozeß führt zu einer Verringerung der Zielfunktion und wird abgebrochen, wenn sich diese stabilisiert, d.h. wenn neue Parameterkombinationen keine weitere Verringerung der Zielfunktion mehr bewirken.

#### **4.3.1 Variablen und Vergleichswerte für die Kalibrierung**

##### **4.3.1.1 Variablen**

Beim Kalibrierungsprozeß zur Erreichung einer möglichst guten Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Potentialen werden die hydraulischen Leitfähigkeiten von 36 Modelleinheiten (Kap. 4.3.3.1), die möglichen seitlichen Zuflüsse im Lappwald (Kap. 4.3.3.2) und die Transmissivität der 2D Verteilschicht (Kap. 4.3.3.3) innerhalb festgelegter Bandbreiten angepaßt.

Es wird dabei vorausgesetzt, daß die Infiltrationsraten an der Modelloberfläche (Grundwasserneubildung) als gesichert betrachtet werden können.

##### **4.3.1.2 Vergleichswerte**

Für die Kalibrierung der Durchlässigkeitsverteilung können entweder die gemessenen Fließgeschwindigkeiten und -richtungen oder die gemessenen Potentialwerte herangezogen werden. Da von ersteren relativ wenige Werte vorliegen und diese überdies methodische Unsicherheiten aufweisen (Porosität und Einfluß der Klüftung im Testintervall), da andererseits eine Vielzahl von Daten zu Grundwasserpotentialen zur Verfügung steht, beruht die Modelleichung auf der mit Änderungen der Varia-



blen erreichten Angleichung der berechneten Potentialverteilung an die Meßwerte (Kap. 4.3.4).

#### 4.3.2 Definition der Zielfunktion

Innerhalb des Optimierungsprozesses wird die Minimierung der Differenz zwischen den gemessenen Süßwasserdruckspiegelhöhen und den berechneten Süßwasserpotentialen durchgeführt. Da die Modellrechnungen mit einem Süßwassermodell erfolgen und die Meßwerte aus einem teilweise mit salzhaltigem Grundwasser gefüllten Modellraum stammen, wird in die Gleichung der Zielfunktion ein Faktor zur Gewichtung der gemessenen Süßwasserdruckspiegelhöhe in Funktion der Grundwasserdichte eingeführt. Weiter wird die Formulierung der Zielfunktion so entwickelt, daß Vertrauensintervalle von Meßwerten berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Zielfunktion wird folgende Funktion ausgewertet:

$$O = \sum_{i=1}^{n_H} w(d_i) F(H_i^s, H_i^m)$$

mit:

- O = Zielfunktion
- $n_H$  = Anzahl der berücksichtigten Meßwerte
- d = Grundwasserdichte in der Meßstelle
- w = Gewichtungsfunktion Grundwasserdichte
- F = Chi-Quadrat Komponente
- $H^s$  = Berechneter Potentialwert
- $H^m$  = Gemessener Potentialwert (Süßwasserdruckspiegelhöhe)

Der Beitrag eines Vergleichspunktes zur Zielfunktion wird aus der Abweichung Meß-/Rechenwert berechnet. Für die als Intervall, als Minimal- oder Maximalwert vorliegenden Meßwerte ist diese die Unter- bzw. Überschreitung des Minimal- bzw. Maximalwertes.

Einer Meßstelle wird die Zielfunktion 0 zugewiesen, wenn der Rechenwert sich (a) innerhalb des Meßwertintervalls befindet übereinstimmt oder (b) unterhalb des Maximalwertes bzw. (c) oberhalb des Minimalwertes liegt.

In Abhängigkeit von der Grundwasserdichte erfolgt eine lineare Gewichtung der Zielfunktion (Berechnung von  $w(d)$  siehe Abbildung 38). Für die Zielfunktion wurde im Dichteintervall von  $\rho = 1,0$  bis  $1,2 \text{ g/cm}^3$  eine Gewichtung zwischen 1 und 0 festgelegt. Meßstellen mit einer Grundwasserdichte von mehr als  $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$  liefern damit keinen Beitrag zur Zielfunktion.

### 4.3.3 Variablen

#### 4.3.3.1 $k_f$ -Werte der hydrostratigraphischen Einheiten

Die zur automatischen Modelleichung herangezogenen, innerhalb vorgegebener Durchlässigkeitsbandbreiten variablen Durchlässigkeitswerte (36 Einheiten, A1-A4/210 anisotrop) gehen aus Tabelle 4 bis Tabelle 6 hervor. Die Einheiten des Hutgesteins (A13/271-272-273) werden nicht in die Kalibrierung einbezogen (salzwasserführendes Grundwasser, geringe Flüsse).

In folgenden hydrostratigraphischen Einheiten werden  $k_f$ -Bandbreiten eingeführt oder die bestehenden  $k_f$ -Bandbreiten gegenüber der Vorgabe der BGR etwas verändert:

- Für die Einheiten L3/142, L7-K1/147, L3a/141, T7/381 werden die in [12] vorgesehenen Bandbreiten übernommen.
- Im 3D-Modell sind die Einheiten A1-A4 zu einer einzigen Schicht zusammengefaßt (Kap. 3.4.4). In Kap. 4.1.3 ist auf die Festlegung der  $k_f$ -Bandbreite für das Quartär A1-A4 eingegangen worden.
- Die Einheiten A10/247, A12/249 und T7/381 sind in [12] in Untereinheiten unterteilt. Die zugewiesenen Bandbreiten decken die  $k_f$ -Bandbreiten der Untereinheiten ungefähr ab.
- In den Einheiten im Lappwald und im Allertal, für die in [12] ein diskreter  $k_f$ -Wert angeführt wird oder für die in [12] ein  $k_f$ -Wert fehlt, wird eine Bandbreite von einer (L5-K1/145, A5/221, A6/222) bzw. zwei Größenordnungen (L0/111, L7-K2/148, L7-K3/149, L8-K1/151, t/211, A7/223, A8/233-234-235, A11/248, T1-K1/310, T4/364, T5/365) definiert.
- Die in [12] angeführten Bandbreiten (eine Größenordnung) der für die Hydrogeologie des Lappwaldes wichtigen Einheiten L2/132, L4/143, L5-K2/144, L8-K2/150, L8-K3/152, sowie L1/131 und L6/146 (vgl. Kap. 4.2.5.5) wurden z.T. bis auf 2 Größenordnungen ausgeweitet.
- In der Triasplatte werden aufgrund von Testrechnungen für alle Einheiten bis 2 Größenordnungen umfassende  $k_f$ -Bandbreiten festgelegt.

#### 4.3.3.2 Randzufluß im Lappwald

Wie in Kap. 4.2.3.3 erwähnt worden ist, legen Testrechnungen und hydrogeologische Überlegungen nahe, im Lappwald einen Randzufluß in die Kalibrierungsrechnungen einzubeziehen. Die Auswirkungen eines Randzuflusses auf die Potentialverteilung - und damit auf die Zielfunktion – werden in R42 mit der Vorgabe von Zuflüssen entlang des SW Modellrandes Lappwald in die Einheiten L3/142 und L5-K2/144 untersucht. Die Randzuflüsse erfolgen über den ganzen westlichen Modellrand, der in die drei Bereiche „Süd“, „Mitte“ und „Nord“ eingeteilt wird.

Die Lokalisation der Randzufluß-Bereiche „Süd“, „Mitte“ und „Nord“ geht aus Abbildung 39 hervor, die Ausbildung der beiden hydrostratigraphischen Einheiten

L3/142 und L5-K2/144 entlang des westlichen Modellrandes wird in Abbildung 40 gezeigt.

Der Randzufluß wird wie folgt als Variable in die Kalibrierung einbezogen (Tabelle 7):

- Bandbreiten für die drei Bereiche „Nord“, „Mitte“ und „Süd“: 0-1 l/s, 0-5 l/s bzw. 0-4 l/s
- In jedem Abschnitt feste Verteilung des Zuflusses je zur Hälfte auf L3/142 und L5-K2/144
- Anfangswerte für die erwähnten drei Bereiche: 0,5 l/s, 4 l/s und 3 l/s
- Gesamtzufluß: Anfangswert 7,5 l/s, Minimalwert 0 l/s, Maximalwert 10 l/s

Durch die Vorgabe einer Bandbreite (woraus ein maximaler Gesamtzufluß resultiert) kann der Zufluß für jeden Abschnitt getrennt optimiert werden. Für den Gesamtzufluß wird keine weitere Bedingung mehr gestellt.

#### 4.3.3.3 2D Verteilschicht

In Kap. 4.2.4.3 ist die Wirkungsweise der 2D Verteilschicht diskutiert worden. Da die Transmissivität der Verteilschicht einen Einfluß auf die berechnete Grundwasseroberfläche aufweisen kann, wird sie als Variable in die Kalibrierungsrechnungen R42 einbezogen. Sie wird dabei in folgende drei Teilgebiete aufgeteilt (Abbildung 39).

- Westlicher Teil des Lappwaldes (K-Klasse 702)
- Unterer Hangbereich des Lappwaldes gegen das Allertal hin (K-Klasse 701). Dabei werden folgende hydrostratigraphischen Einheiten zum tiefer liegenden Bereich des Lappwaldes geschlagen: L4/143, L5-K1/145, L6/146, L7-K1/147, A8-K1/233, A8-K2/234, A8-K3/235 >60 mNN. Es handelt sich dabei um Grundwasserhemmer, die am Hangfuß des Lappwaldes weit verbreitet sind.
- Allertal/Triasplatte (K-Klasse 700).

In den drei Teilgebieten kommen in den Kalibrierungsrechnungen R42 die in Tabelle 8 zusammengestellten Bandbreiten und Anfangswerte des T-Wertes der 2D Verteilschicht zur Anwendung, wobei als obere Bandbreite der in Kap. 4.2.4.3 erläuterte Wert von  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  zur Anwendung kommt, während die untere Bandbreite im westlichen Teil des Lappwaldes und im Allertal/Triasplatte auf  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , im tieferen, vorwiegend aus Aquitarden aufgebauten Hangbereich des Lappwald auf  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  festgelegt wurde.

#### 4.3.4 Vergleichspunkte für Potentiale

Für die Kalibrierung der Variablen „ $k_f$ -Wert“, „Randzufluß im Lappwald“, und „Transmissivität der 2D Verteilschicht“ wird mit Hilfe des Vergleichs der Potentialmeßwerte in GWM und Packertests mit dem berechneten Potential an derselben

Position im 3D Modell die Angleichung der Rechenwerte an die Meßwerte von 180 Vergleichspunkten (vgl. Kap. 4.3.4.2 bis 4.3.4.4) benutzt.

#### 4.3.4.1 **Bewertung der Abweichungen zwischen Meß- und Rechenwerten**

##### Mögliche Quellen der Abweichungen zwischen Meß- und Rechenwerten

Generell können Abweichungen der berechneten Variablen von Meßwerten im Rahmen der Anwendung numerischer Grundwassermodelle als Folge

- 1) unsicherer bzw. fehlerbehafteter Meßwerte,
- 2) unpassender Werte von Modellparametern,
- 3) fehlerbehafteter Modellrandbedingungen, oder
- 4) eines unzureichenden Modellkonzeptes (z.B. Geometrie hydrostratigraphischer Modelleinheiten oder Typ von Randbedingungen)

entstehen.

Im Rahmen einer stationären Grundwassermodellierung erfolgt die Anpassung des simulierten Grundwasserstandes an Meßwerte häufig durch die systematische Variation sensibler Modellparameter, insbesondere  $k_f$ -Werte (Behandlung Fehlerquelle 2). Auch die Kalibrierungsrechnungen R42 benützen dieses Vorgehen. Ebenfalls die Randbedingungen (Fehlerquelle 3) werden teilweise in die Kalibrierung einbezogen. Auf die Fehlerquellen 1 und 4 soll nachfolgend eingegangen werden.

##### Fehlerquelle 1: Validität der Meßwerte (unsichere bzw. fehlerbehaftete Meßwerte)

Bevor dem skizzierten Weg zur Verbesserung der Modellresultate gefolgt werden kann ist zu prüfen, inwieweit der Datensatz der Grundwasserdruckspiegelhöhen bzw. des äquivalenten Süßwasserpotentials zur Modelleichung verwendbar ist.

##### *Methodik zur Berechnung des Süßwasserpotentials*

Zur Berechnung äquivalenter Süßwasserpotentiale werden in [8] und [12] zwei Ansätze angewendet:

- Die in den Hydrotests ermittelten Initialdrücke sind in [12] (Anlage 10) als äquivalente Süßwasserspiegel dokumentiert: Das äquivalente Süßwasserpotential wurde aus der Höhenlage des Zentrums des Meßintervalls und der aus dem Formationswasserdruck unter der Annahme einer Wasserdichte von  $1000 \text{ kg/m}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$  berechneten Höhe der Süßwassersäule ermittelt. Die entsprechenden Werte sind zusammen mit der Grundwasserdichte im Testintervall in [12] (Anlage 10) zusammengestellt und in Tabelle 9 übernommen worden.
- Die Mehrzahl der Werte der äquivalenten Süßwasserpotentiale der Vergleichsdatenbasis basieren auf Abstichmessungen in Grundwassermeßstellen (GWM) (Ganglinien in [8], Anlage 24). Für GWM mit erhöhter Salinität sind die Ganglinien korrigiert worden. Diese Korrekturen basieren auf den labormäßig ermittelten letzten Dichtewerten (Referenzanalyse), da die Grundwasserdichte der Wassersäule in der GWM nicht für jede Grundwasserstandsmessung ermittelt wurde ([8], Kap. 5.1.1). Der verwendete Dichtewert ist den Abbildungen in [8] (Anlage 24) zu entnehmen. Aus der gemessenen Wasserspiegelhöhe über dem Zentrum des Meßintervalls wird mit dem Dichtewert der Referenzwasseranalyse die Höhe der Süßwassersäule berechnet und zur Höhe des Intervallzentrums addiert. Die auf diese Weise ermittelten äquivalenten Süßwasserpotentiale sind wahrscheinlich nur wenig fehlerbehaftet. Die übrigen Gangli-

nien sind nicht dichtekorrigiert. Die an den zugehörigen, relativ flachen Meßstellen erhobenen Grundwasserdichten sind gering, so daß keine nennenswerte Dichtebeeinflussung des Meßwertes vorliegt.

#### *Unterschiedliche Beobachtungszeitpunkte*

Ein anderes, die Vergleichbarkeit der Rechen- und Meßwerte einschränkendes Problem beruht darauf, daß nicht alle der als Vergleichswerte benützten Meßwerte zum gleichen Zeitpunkt erhoben wurden. Die aus Packertests stammenden Potentiale wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten gewonnen, während für die GWM Ganglinien vorliegen (meistens Mai 1995 bis November 1996) und als Vergleichswerte die Meßwerte von September 1996 genommen werden. Hier ist anzumerken, daß in mehreren GWM – Dp Mors 36A, 38A bis C, 40B1, 49A, 51B, 55B, 56A, 60A, 61A und B, 69A, 71A, 94A - während der gesamten Beobachtungsperiode der Grundwasserspiegel sank.

#### *Bedeutung der Länge von Testintervallen*

Zum Vergleich von berechneten Grundwasserpotentialen und Potentialmeßwerten ist die Länge und Orientierung des Testintervalls relativ zum Potentialfeld in der jeweiligen hydrogeologischen Modelleinheit von Bedeutung. Im aktuellen Fall wird das berechnete Potential in der Mitte des Testintervalls zum Vergleich mit den Meßwerten herangezogen. Die Geometrieeffekte, die in der Betrachtung der Modellfehler qualitativ zu berücksichtigen sind, sollen anhand zweier Konstellationen vorgestellt werden:

- Das Meßintervall verläuft vorwiegend parallel zu den berechneten Isopotentialflächen. Diese Situation ist typisch für (sub-)horizontal gelagerte Aquifere im Lappwald und in der Triasplatte, kann aber auch in Aquitarden realisiert sein (Jurascholle der SW-Randstörung, Hutgestein, NE-Randstörung). Es ist zu erwarten, daß v.a. in den Aquiferen das gemessene Mischpotential gut mit dem wirklichen Potential im Zentrum des Intervalls übereinstimmt.
- Das Meßintervall verläuft quer zu den berechneten Isopotentialflächen. Das in diesem Fall gemessene Mischpotential reflektiert in der Natur in Aquitarden unter Umständen einen weiteren Potentialbereich. In diesem Falle wird man weniger hohe Erwartungen an die Reproduktion von Meßwerten durch das Grundwassermodell stellen.

Mit zunehmender Länge des Meßintervalls repräsentieren Meßwerte ausgeprägtere Mischpotentiale, deren Aussagekraft zur Beurteilung der Modellgüte in Frage zu stellen ist.

#### *Bewertung der Meßdaten*

Aus den obigen Ausführungen geht zusammenfassend hervor, daß die aus den Abstichmessungen in den GWM und in geringerem Ausmaß auch die aus den Packertests ermittelten äquivalenten Süßwasserpotentiale aus methodischen Gründen z.T. etwas fehlerbehaftet sind. Unter Berücksichtigung der Ausführungen in [8] und [12] sind einige Vergleichspunkte eliminiert (d.h. keine Aufnahme in die Datenbasis der Vergleichspunkte Tabelle 9) oder es sind Anpassungen vorgenommen worden (vgl. Kap. 4.3.4.3, Fußnoten in Tabelle 9).

#### Fehlerquelle 4: Mit dem Modellkonzept zusammenhängende Fehlerquellen

Die Potentialrandbedingung des 3D Süßwassermodells ERAM unter Süßwasserbedingungen basiert wesentlich auf süßwasserbetonten Meßwerten. Für das Modell ist, da es die gravitative Auswirkung der in der Regel mit größerer Tiefe zunehmenden Grundwasserdichte unberücksichtigt läßt, anzunehmen, daß die den berechneten Süßwasserpotentialen entsprechenden Drucke kleiner als die Formationsdrucke des salzwasserführenden Grundwassers ausfallen. Unter der Voraussetzung, daß das Modell die richtigen  $k_f$ -Werte berücksichtigt, ist davon auszugehen, daß äquivalente Süßwasserpotentiale im salzwasserführenden Grundwasser („gemessener“ Wert) generell höher sind als berechnete Süßwasserpotentiale. Positive Differenzen zwischen Meßwerten (=äquivalentes Süßwasserpotential) und simulierten Süßwasserpotentialen stellen daher vorliegend den zu erwartenden Normalfall dar. Betragsmäßig ist eine Zunahme der positiven Differenz mit zunehmender Grundwasserdichte und Höhe der salzwasserführenden Grundwassersäule zu erwarten.

In den Kalibrierungsrechnungen wird der Fehlerquelle 4 durch die Gewichtung (Abminderung) der Zielfunktion in Funktion der Grundwasserdichte an einem betrachteten Vergleichspunkt Rechnung getragen (vgl. Kap. 4.3.2).

Das Vorkommen von salzwasserführendem Grundwasser im Modellgebiet ist auf die tieferen, aus gering durchlässigen Gesteinen aufgebauten Modellabschnitte beschränkt. Der Einfluß dieser Bereiche auf die Fließverhältnisse in den höheren, stärker durchlässigen Bereichen des Deckgebirges dürfte nur gering sein. Dafür spricht z.B. die geringe Salzkonzentration in den höheren Bereichen des Deckgebirges in allen drei tektonischen Strukturen des Modellgebietes.

#### Ansprüche an die Kalibrierung

Bei dem gewählten Kalibrierungsprozeß (Kap. 4.3.2) wird mit der Variation der Variablen an Vergleichspunkten (Intervallzentren von GWM oder Packertests) eine möglichst weitgehende Angleichung der berechneten Potentiale mit den Meßwerten angestrebt. Bei einer Modellkalibrierung in alluvialen Aquiferen wird oft ein Zielwert der mittleren Abweichung zwischen Meß- und Rechenwerten von etwa 1% der Potentialdifferenz innerhalb des Modellgebietes angestrebt. Im Falle des Deckgebirges ERAM mit einer Potentialdifferenz innerhalb des Modellgebietes von etwa 65 m würde damit in alluvialen Aquiferen bei der Kalibrierung eine Verringerung der mittleren Abweichung zwischen Meß- und Rechenwert auf 0,65 m angestrebt. Wegen des komplexen Modellaufbaus des Modellgebietes ERAM, bei dem alluviale Aquifere eine untergeordnete Rolle spielen, und der heterogeneren Datenbasis für die Vergleichswerte (Potentialmeßwerte) sind in ERAM geringere Ansprüche an die Kalibrierung zu stellen. Das Erreichen einer mittleren Abweichung zwischen Meß- und Rechenwert in der Größenordnung des 2-3 fachen der oben genannten Faustregel (d.h. etwa 2,0 m) erscheint bereits als befriedigend.

#### **4.3.4.2 Vergleichswerte für die Kalibrierungsrechnungen**

Die für die Kalibrierung R42 verwendete Liste der Vergleichspunkte (Tabelle 9) enthält 180, den Berichten [8] (Anlage 24) und [12] (insbesondere Anlage 10) entnommene Meßwerte des äquivalenten Süßwasserpotentials.

Tabelle 9 enthält neben der Grundwasserspiegelhöhe (in Einzelfällen dichtekorrigiert) bzw. dem aus dem Formationswasserdruck abgeleiteten äquivalenten Süß-

wasserpotential (Hydrotests) auch Angaben zur Bohrung, die Tiefe und Geologie des Meßintervalls, die Grundwasserdichte etc.

Es sind jedoch nicht alle der in den beiden erwähnten Dokumenten enthaltenen GWM und Packertests in die Liste der Vergleichspunkte übernommen worden. Auch sind an einzelnen Vergleichspunkten Änderungen vorgenommen worden. Auf beide Punkte soll nachstehend eingegangen werden.

#### 4.3.4.3 Nichtberücksichtigung von Meßstellen, Modifikationen

Die Gründe, die zur Nichtberücksichtigung von Meßstellen oder zu Änderungen und Anpassungen führten, werden nachstehend beschrieben. Die Kalibrierung wurde in zwei Phasen A und B ausgeführt (weitere Ausführungen in Kap. 4.4). Die vor Beginn der Phase B erfolgten Modifikationen an den Vergleichspunkten werden ebenfalls angeführt.

- Im Schacht Bartensleben sind für den Schilfsandstein zwischen 178 und 220 m Teufe mehrere Zutrittstellen bekannt. Die hydraulischen Auswirkung dieser anthropogenen hydraulischen Senke im kmS wird an der GWM Dp Mors 51A als signifikante Absenkung des Druckwasserspiegels registriert ([12], Kap. 5.2.7).
- Der Test Dp Mors 51A/95T1 erfaßt den Schilfsandstein. Wie die bereits eliminierte GWM Dp Mors 51A ist auch der Test Dp Mors 51A/95T1 durch den Wasserzufluß aus dem Schilfsandstein zum Schacht beeinflusst. In Phase B wurde der Meßwert 114 mNN als Minimalwert gesetzt.
- Die Meßstelle Dp Mors 48A/95 ist durch einen alten Entwässerungsstollen aus dem ehemaligen Rhätkohle-Abbau beeinflusst, d.h. gegenüber den natürlichen Bedingungen abgesenkt ([12], Kap. 7.4).
- Der Test Dp Mors 5z1/T2 (Bohransatz 120 mNN) liegt etwa 125 m vom Schacht Bartensleben entfernt und befindet sich im Jura-Aquitard A8-K1/233. Es wurde eine Grundwasserhöhe von 134 mNN ermittelt ([12], Anlage 10). Dieser Meßwert von 134 mNN ist nicht nachvollziehbar.
- Die in L2/132 verfilterten GWM Hy Hmt 13, Dp Mors 53A und Dp Mors 54C scheinen gemäß dem Verlauf der Ganglinien ([8], Anlage 24) noch nicht stabilisiert zu sein, der Wasserspiegel scheint, z.T. mit größeren periodischen Schwankungen, noch weiter abzusinken.
- Dp Mors 54B (ebenfalls in L2/132 verfiltert) erscheint einigermaßen stabilisiert, befindet sich jedoch an der Basis des Aquitards L2, wenig oberhalb des Aquifers L3 und unterhalb der nicht stabilisierten Meßstelle Dp Mors 54C. Es wirken damit Einflüsse von oben (Dp Mors 54C) und unten (Dp Mors 54A, Potential 136,4). Auch diese Meßstelle wird – trotz des kurzfristig stabilisiert erscheinenden Verlaufes ([8], Anlage 24) - als nicht stabilisiert angesehen.
- Hy Hmt 16 weist im Aquitard L2 zwei Meßintervalle auf: 22-23 m (154-155 mNN) und 75-76 m (101-102 mNN). Die Ganglinie zeigt in den Beobachtungen 1973-1997 ([8], Anlage 24) starke Schwankungen zwischen 150 mNN und 170 mNN. Bei Wasserständen unterhalb 154 mNN wird damit der Druck im Intervall 101-

102 mNN gemessen, bei den stets raschen Anstiegen über 154 mNN kann auch im Intervall 154-155 mNN Wasser in das Piezometer eintreten.

Es ist anzunehmen, daß die hohen Wasserspiegel durch Zuflüsse über das obere, anscheinend besser durchlässige Intervall erfolgen. Dadurch wird der Druck auch auf das tiefere Intervall übertragen. Der Wasserspiegel sinkt bis 154 mNN jeweils rasch ab. Unterhalb von 154 mNN (lediglich Intervall 101-102 mNN aktiv) ist das Absinken langsamer und flacht sich ab, ohne das jedoch jemals eine Stabilisierung erreicht wird, da diese jeweils durch rapide Anstiege (durch das obere Intervall) unterbrochen wird. Der stabilisierte Wert des Intervalls 101-102 mNN würde also tiefer liegen.

- Beim Brunnen Hy Hmt A+E variiert der Grundwasserspiegel zwischen 149 (Absenkung) und 151 mNN (Ruhewasserspiegel) ([8], Anlage 24). Der Brunnen liegt im wenig durchlässigen Aquifer L1. In den Rechnungen R42 und R43 wird aus Hy Hmt A+E der Mittelwert der Grundwasserförderung 1992-1996 entnommen. Während der Entnahmeperiode 1992-1996 (in der die Wasserförderung abnahm) wurde ein Wasserspiegel (Absenkungs- und „Ruhe“-Wasserspiegel zwischen 133 und 153 gemessen. Das Meßwertintervall 149-151 mNN liegt damit zu hoch und entspricht dem Zustand bei einer geringeren Entnahme. Der Brunnen Hy Hmt A+E ist nicht in die Liste der Vergleichspunkte (Tabelle 9) aufgenommen worden.
- Die Packertests Dp Mors 3/89T1 bis T3 sind in einer frühen Erkundungsphase durchgeführt worden. Gemäß den Ergebnissen einer Neuauswertung [14] sind die Meßdaten nicht sehr belastbar (vgl. ebenfalls [8], Kap. 5.3). Dies gilt insbesondere für den Packertest Dp Mors 3/89T1, jedoch ebenfalls für Dp Mors 3/89T2.
- Hy Hmt 31/80 weist gemäß [12] (Tab. 3.5) zwischen Bohrtiefe 30 m und 120 m 9 Filterstrecken in den Einheiten L3, L4 und L5 auf (vgl. Tabelle 9).

Sie ist in L3 verfiltert, überbrückt L4 und reicht bis in L5. Dennoch weist sie gegenüber L5 einen signifikant höheren Druckwasserstand auf. Bei idealer, d.h. ausschließlicher Verfilterung im L3 würde sich eher ein noch etwas höherer Wasserstand einstellen können. Die Druckdifferenz zwischen L3 und L5 könnte deshalb sogar noch etwas größer sein als jetzt meßbar. Der Meßwert ist damit ein Mischwert aus L3, L4 und L5. Da das Potential in L3 größer ist als in L5, ist der Wert für L3 ein Minimalwert, für L5 ein Maximalwert.

In R42 Phase A wurde der Rechenwert (Potential) auf dem Niveau 137,8 mNN (Filterstrecke 30-42 m) in der Einheit L3 abgegriffen. Der Rechenwert (R42 = 127 mNN) liegt systematisch tiefer als der Abgreifpunkt. Das Intervall wurde in R42 Phase B auf die Einheit L4 ausgeweitet (30-74 m, Intervallzentrum in L4) und der Unsicherheit des Meßwertes bei der vorliegenden komplexen Verfilterung mit einer Bandbreite von  $\pm 3$  m Rechnung getragen.

- Die GWM Hy Hmt 30/79 ist von 48-54 m in ko(2b)/L3, von 62-83 m in ko(2a), ko(1)8,9/L4 verfiltert ([12], Tabelle 3.5). Hydraulisch dominierend ist das Meßintervall in L3. Der Meßwert (Bestwert 138,5 mNN) ist damit ein Mischwert aus L3 und L4. Da das Potential in L3 größer ist als in L5-K2/144, ist der Wert für L3 ein Minimalwert.



Da ähnlich wie bei Meßstelle Hy Hmt 31/80 in den Rechnungen R42 Phase A (Rechenwert = 128 mNN) der Rechenwert oft unterhalb des Abgreifpunktes (Intervall 48-54 m, Zentrum 127,9 mNN) liegt, wird für Phase B das Abgreifintervall auf 48-83 m festgelegt (Zentrum 65,5m, 113,4 mNN); der Abgreifpunkt kommt damit in L4/143 zu liegen. Den Unsicherheiten wird mit der Vorgabe einer Bandbreite von  $\pm 3$  m Rechnung getragen (Meßwert 138,5 mNN = Bestwert, Bandbreite 135,5-141,5 mNN).

- Korrektur des Meßwertes von Dp Mors 74B in Phase B, dem in Phase A der irrtümliche Wert von 119,7 mNN (statt 109,7 mNN) zugewiesen wurde.

Die vorstehend erwähnten Meßstellen wurden in den Kalibrierungsrechnungen entweder nicht berücksichtigt oder der Potentialwert wurde angepaßt. In nachstehender Aufstellung sind die wichtigsten Maßnahmen zusammengefaßt:

Dp Mors 48A	Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Dp Mors 51A	Meßwert durch Schacht Bartensleben beeinflusst. Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Dp Mors 51A/T1	Meßwert beeinflusst durch Schacht Bartensleben. Meßwert (Bestwert) als Minimalwert gesetzt
Dp Mors 5z1/T2	Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Dp Mors 53A	Grundwasserspiegel in GWM nicht stabilisiert. Meßwert (Bestwert) als Maximalwert gesetzt
Dp Mors 54B	Grundwasserspiegel in GWM nicht stabilisiert. Meßwert (Bestwert) als Maximalwert gesetzt
Dp Mors 54C	Grundwasserspiegel in GWM nicht stabilisiert. Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Dp Mors 3/T1	Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Dp Mors 3/T2	Meßwert (Bestwert) als Maximalwert gesetzt
Dp Mors 3/T3	Meßwert als Bestwert beibehalten, jedoch Einfügen einer Bandbreite
Hy Hmt A+E	Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Hy Hmt 13	Nicht in Liste der Vergleichspunkte aufgenommen
Hy Hmt 16	Meßwert (Bestwert) als Maximalwert gesetzt
Hy Hmt 30	Beobachtungsintervall 48-83 m mit Zentrum in L4, Meßwert (Bestwert) mit einer Bandbreite $\pm 3$ m versehen

#### 4.3.4.4 Überblick über die 180 Vergleichspunkte

Nach Bereinigung der Datenbasis verbleiben 180 zur Kalibrierung geeignete Vergleichspunkte. Die für die Phase B gültigen Daten sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Diese Liste der Vergleichspunkte setzt sich wie folgt zusammen:

- 107 Werte stammen aus Grundwassermeßstellen (darunter 5 Entnahmehbrunnen), 62 Werte sind Packertestresultate, 11 weitere Werte sind Stützstellen in der Triasplatte.
- Bei den Meßwerten der Vergleichspunkte handelt es sich um 101 Bestwerte, 54 Bandbreiten, 19 Maximalwerte und 4 Minimalwerte.
- In den Meßintervallen der berücksichtigten Werte wurden folgende Grundwasserdichten beobachtet:

	Grundwassermeßstellen und Stützstellen Triasplatte	Hydrotests
$\rho \leq 1,01 \text{ g/cm}^3$ :	107	22
$1,01 < \rho \leq 1,05 \text{ g/cm}^3$ :	10	19
$1,05 < \rho \leq 1,10 \text{ g/cm}^3$ :	1	10
$\rho > 1,1 \text{ g/cm}^3$	1	10
Insgesamt	119	61

Die Wasserdichte wird zu einer Gewichtung der Vergleichspunkte in ihren Beiträgen zur Zielfunktion der Kalibrierung verwendet (Kap. 4.3.2). 8 Potentialwerte von GWM sind dichtekorrigiert.

- In einigen Vergleichspunkten erfolgte aus den in Kap. 4.3.4.3 angeführten Gründen eine Modifikation des Vergleichswertes. 4 Bestwerte (Dp Mors 3/T2, Dp Mors 53A, Dp Mors 54B, Hy Hmt 16) wurden als Maximalwerte behandelt, bei drei Beobachtungspunkten wurde der Meßwert (Bestwert) durch eine Bandbreite erweitert (Dp Mors 3/89T3, Hy Hmt 30, Hy Hmt 31), in einer Meßstelle wurde der Meßwert als Minimalwert gesetzt, da der reale Wert sicherlich höher wird (Dp Mors 51A/95T1).
- Für mehrere Vergleichspunkte wurde das Beobachtungsintervall angepaßt, um zu gewährleisten, daß das Potential im Modell in derselben Einheit abgegriffen wird, wie sie in der Filterstrecke der entsprechenden Bohrung vorliegt (also um eine Übereinstimmung zwischen der Hydrostratigraphie in der Bohrung mit dem Abgreifpunkt im Modell zu erreichen). Für 13 Vergleichspunkte war eine solche Anpassung des Intervall erforderlich (Dp Mors 10/T2, 38A, 5z3, 5z5, 86A, 94A/T1, Hy Beo 1, 2, 4, Hy Hmt 30, 31, HyMors8, 9, vgl. Anmerkungen in Tabelle 9).
- Die geographische Verteilung der Vergleichspunkte auf die drei strukturellen Teilgebiete und hydrostratigraphischen Einheiten geht aus Abbildung 41 hervor und ist in Tabelle 10 zusammengefaßt.
- Im Lappwald weisen die Einheiten Jura bis Mittelrhät, L1/131 bis L4/143 und Schilfsandstein L8/150-151-152 je mehrere Vergleichspunkte auf; eine größere Anzahl weist das Unterrhät L5/144-145 und der Steinmergelkeuper L6/146 auf. Im Allertal bestehen zahlreiche Vergleichspunkte in Quartär und Oberkreide, mehrere im Jura (A8/233-234-235) und Steinmergelkeuper/Unterrhät A9/245-246, zahlreiche im Hutgestein (A13-K1/271-272). In der Triasplatte sind im Buntsandstein, Sollingfolge, Volpriehausen-Serie und NE-Randstörung insgesamt nur 11 Vergleichspunkte aus GWM und Packertests verfügbar. Die Vergleichspunkte in der Weferlinger Triasplatte wurden durch 11 Stützstellen erweitert, so daß jetzt 76 (42%) der Vergleichspunkte im Lappwald, 82 (46%) im Allertal und (22) 12% in der Triasplatte liegen.

#### 4.4 Ausführung der Kalibrierungsrechnungen

Nach dem in Kap. 4.3 skizzierten Vorgehenskonzept wurden die Kalibrierungsrechnungen R42 in 2 Phasen A und B durchgeführt. Nach der Stabilisierung der Zielfunktion in Phase A ließen Verbesserungen in der Version 2.0 des Programms FSCGM eine Fortführung der Kalibrierung als Phase B (basierend auf den als Vorkalibrierung zu betrachtenden Rechenläufen der Phase A) als empfehlenswert erscheinen<sup>(2)</sup>. Vor Beginn der Rechenläufe der Phase B wurde die Modellierung des Brunnens 8 nochmals überprüft und modifiziert (Kap. 4.2.5.3), weiter erfolgte die Überprüfung und Modifikation einiger Vergleichspunkte (Kap. 4.3.4.3).

<sup>2</sup> In der Version 2.0 wurde die Berücksichtigung der Exfiltrationszonen verbessert.

#### 4.4.1 Vorkalibrierung (Phase A)

##### 4.4.1.1 Sensitivität

In den Sensitivitätsrechnungen R42 Phase A (Abbildung 42, Abbildung 43) wurde in den Iterationen 2 (L1/131), 30 (T1-K1/310), 32 (T2-K1/361), 34 (T3/363) sowie in Iteration 38 (2D Verteilschicht, Bereich „Allertal-Triasplatte“) eine hohe Sensitivität ermittelt.

##### 4.4.1.2 Entwicklung der Zielfunktion und der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert

Die Entwicklung der Zielfunktion bzw. der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert in den 543 Iterationen der Phase A (Abbildung 46, Abbildung 47, Tabelle 11) zeigt folgendes:

- Der Anfangswert der Zielfunktion zu Beginn der Kalibrierungsrechnungen R42 – nach Ausführung der Sensitivitäts-Iterationen 1 bis 44 – beträgt rund 4000 m<sup>2</sup>, die mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert 2,95 m.
- Zwischen Iteration 44 und 190 verbessert sich die Zielfunktion rasch (Abnahme der Zielfunktion 12,6 m<sup>2</sup> pro Iteration) auf 2200 m<sup>2</sup> (mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert 2,46 m). Wie Abbildung 48 zeigt, wird diese Verbesserung zu einem großen Teil durch die Erhöhung des T-Wertes der 2D Verteilschicht „Triasplatte-Allertal“ (Q-Klasse 700) bis an die obere Bandbreite 1·10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> bewirkt. Weiter erfolgt für L1/131 eine leichte Zunahme, für L2/132 eine leichte Abnahme des k<sub>r</sub>-Wertes.
- In den Iterationen 191-380 verbessert sich die Zielfunktion langsamer (2,4 m<sup>2</sup>/Iteration) auf 1750 m<sup>2</sup>. Es werden im wesentlichen Einheiten der Triasplatte und der östlichen Seite des Allertals sowie im Lappwald die beiden Einheiten L1/131 und L2/132 variiert. Abbildung 48 zeigt, daß die Verbesserung der Zielfunktion bzw. der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert (2,12 m) durch eine Erhöhung des k<sub>r</sub>-Wertes von T2-K1/361, T3/363, A11/248 und L1/131, weniger ausgeprägt von T1-K1/310 sowie der wenig ausgeprägten Verringerung von L2/132, L7-K2/148 und A10/247 erreicht wird.
- In den Iterationen 381-543 ist die Abnahme der Zielfunktion pro Iteration nur noch 1,2 m<sup>2</sup>/Iteration. Es erfolgen weiterhin Änderungen in den k<sub>r</sub>-Werten mehrerer Einheiten der Triasplatte und des östlichen Teils des Allertal, jedoch werden dominierend Einheiten des Lappwaldes in die k<sub>r</sub>-Variationen einbezogen (erneut L1/131 und L2/132 sowie praktisch alle Keuper-Einheiten, ohne den Schilfsandstein).
- Die Vorkalibrierung der Phase A stabilisierte sich bei etwa 540 Iterationen bei einem Betrag der Zielfunktion von rund 1550 m<sup>2</sup>. Die Abweichung Meßwert-Rechenwert nahm von 2,95 m auf 2,04 m ab.

## 4.4.2 Kalibrierungsrechnungen R42 Phase B

### 4.4.2.1 Sensitivitätsrechnungen R42 Phase B

Die ersten 43 Iterationen der Phase B (Abbildung 44, Abbildung 45) stellen Sensitivitätsrechnungen dar (vgl. Kap. 4.3), wobei in den Iterationen 544 bis 580 die Sensitivität der  $k_f$ -Werte der in die Kalibrierung einbezogenen hydrogeologischen Einheiten, in den Iterationen 581 bis 583 jene des T-Wertes der 2D Verteilungsschicht und in den Iterationen 584 bis 586 die Sensitivität des Randzuflusses im Lappwald getestet werden.

Es ergaben sich hohe Sensitivitäten für die  $k_f$ -Werte der Einheiten L5-K2/144 (Iteration 550), A1-A4/210 (Iteration 559), A5/221 (Iteration 562) sowie die 2D Verteilungsschicht „Allertal-Triasplatte“ (Iteration 581). Eine mittlere Sensitivität haben die Einheiten T3/363 (Iteration 577) und T5/365 (Iteration 579) sowie die 2D Verteilungsschicht „Unterer Hangbereich Lappwald“ (Iteration 582) und „westlicher Teil des Lappwaldes“ (Iteration 583). Der Randzufluß im Lappwald (Iterationen 584-586) ist nur mäßig sensitiv.

### 4.4.2.2 Durchführung der Rechnungen R42 Phase B

In den Rechenläufen der Phase B wurden 512 Iterationen durchgeführt, davon 86 Iterationen zur Ermittlung der Sensitivitäten. R42 Phase B umfaßte somit 426 Kalibrierungsiterationen.

Ausgangspunkt für die Rechnungen der Phase B waren die Werte der Phase A. Infolge eines Rechnerproblems bei Iteration 709 und dem dadurch erforderlichen Neustart umfassen die Rechnungen der Phase B zwei Abschnitte:

- Beginn der Rechnungen mit Iteration 544, erster Abbruch bei Iteration 709
- Neustart mit Iteration 710, ausgehend von den Resultaten der Iteration 709 und Weiterführung der Rechnungen bis zur Stabilisierung der Zielfunktion bei Iteration 1022, Abbruch der Rechnungen R42 bei Iteration 1055.
- Übernahme der  $k_f$ -Verteilung von Iteration 1022
- Zwischen den Iterationen 1022 und 1055 variierte die Zielfunktion zwischen 1241 und 1290 m<sup>2</sup> (keine weitere Verringerung)

Die Rechnungen der Phase A und B mit je rund 500 Iterationen erforderten eine Rechenzeit von 4 Monaten.

### 4.4.2.3 Entwicklung der Zielfunktion bzw. der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert

Bei den Sensitivitätsrechnungen der Phase B (Iteration 544 bis 587) lag die Zielfunktion bei den wenig sensitiven Einheiten um 2400 m<sup>2</sup>, bei sensitiven Einheiten zwischen 2000 und 2500 m<sup>2</sup> (Abbildung 44). Das Verhalten der mittleren Abweichung Meßwert-Rechenwert geht aus Abbildung 45 hervor.

Die Entwicklung der Zielfunktion bzw. der mittleren Abweichungen Meßwert-Rechenwert in den Kalibrierungsrechnungen R42 ist in Abbildung 46 und Abbildung 47 dargestellt. Die Zielfunktion verringerte sich von Iteration 588 bis 670 von 2400 m<sup>2</sup> auf 1700 m<sup>2</sup> (Abnahme 8,3 m<sup>2</sup>/Iteration), von Iteration 671 bis 709 von 1700 auf 1540 m<sup>2</sup> (4,4 m<sup>2</sup>/Iteration). Bis Iteration 709 ging die mittlere Abweichung zwischen Meßwert und Rechenwert von 2,33 m in den Sensitivitätsrechnungen auf 1,92 m zurück (Tabelle 11).

Nach einem Neustart mit Iteration 710 (Abbildung 46, Abbildung 47) reduzierte sich die Zielfunktion in den Iterationen 754 bis 847 von 1510 m<sup>2</sup> auf 1334 m<sup>2</sup> (Abnahme 1,86 m<sup>2</sup>/Iteration), von Iteration 848 bis 1022 auf 1241 m<sup>2</sup> (Abnahme etwa 1,77 m<sup>2</sup>/Iteration, Tabelle 11).

In den Rechnungen der Phase B (Iterationen 544-1022) ging der Wert der mittleren Abweichung zwischen Meß- und Rechenwerten auf etwa 1,77 m zurück. Insgesamt konnte damit in R42 eine Verbesserung der Zielfunktion von rund 4000 m<sup>2</sup> auf 1240 m<sup>2</sup>, der mittleren Abweichung zwischen Meß- und Rechenwerten von anfänglich 2,95 m auf 1,77 m erreicht werden.

Die beiden Darstellungen der Anpassung der Modellergebnisse an die verfügbaren Meßdaten sind etwas unterschiedlich:

- Bei der Zielfunktion wird die Abweichung an Vergleichspunkten zwischen gemessenem und berechnetem Potential quadriert; die Zielfunktion ist die Summe dieser quadrierten Abweichungen.
- Bei der zweiten, anschaulicheren Darstellungsart wird die mittlere Abweichung zwischen Meß- und Rechenwert an den 180 Vergleichspunkten dargestellt.

Die Kalibrierung erfolgt durch eine Optimierung der zu kalibrierenden Variablen und führt zu einer Minimierung der Summe der quadrierten Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Potential, der Zielfunktion. Dabei reagiert die Zielfunktion stärker auf die Meßstellen mit großen Abweichungen: dort bewirken kleine Änderungen eine größere Verringerung der Zielfunktion als eine entsprechende Veränderung an einem Vergleichspunkt, in dem der Unterschied zwischen Meß- und Rechenwert nur gering ist.

In der zweiten, abgeleiteten Darstellungsart werden alle Verbesserungen der Abweichungen zwischen Meß- und Rechenwert gleich gewichtet. Wie aus Abbildung 44 und Abbildung 45 hervorgeht, weist der Kurvenverlauf größere Ausschläge aus als der kontinuierlichere Verlauf der Zielfunktion.

#### **4.4.3 Untersuchung der Auswirkungen eines offenen Modellrandes in Quartär und Oberkreide des Allertals**

Nach Abschluß der Kalibrierungsrechnungen R42 wurde mit dem kalibrierten Parametersatz die Auswirkungen eines im Quartär und in der Oberkreide offenen Modellrandes im Allertal (Zufluß am Südrand, Abfluß am Nordrand) untersucht: Entlang der Schnittflächen der Sedimentkörper Quartär (Modelleinheit A1-A4) und Oberkreide (A5 und A6) mit den vertikalen Modellrändern im Allertal wirkt ein fest vorgegebener Grundwasserzu- (südliches Allertal) bzw. -abstrom (nördliches Allertal). Die

Abschätzung der jeweiligen Durchflußrate  $Q$  erfolgte auf der Grundlage der Querschnittsflächen  $A$  (Oberkreide, Quartär) am Modellrand, der kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeiten  $k_f$  der beteiligten Einheiten und eines mittleren hydraulischen Gradienten  $i$  der Sedimentkörper (vgl. Tabelle 12).

Der Vergleich der berechneten Grundwasserpotentiale für den Fall mit vollständig undurchlässiger vertikaler Berandung und dem Fall mit Randzufluß an den Schnittflächen der Sedimentkörper Quartär und Oberkreide zeigt unbedeutende Abweichungen im Nahbereich des Modellrandes: Am Südrand steigt im Allertal das Potential um 0 bis 10 cm an, am Nordrand fällt es um 0 bis 10 cm ab.

## 4.5 Ergebnisse der Kalibrierung

### 4.5.1 Variablen

#### 4.5.1.1 $k_f$ -Verteilung

Die aus den Kalibrierungsrechnungen R42 resultierenden  $k_f$ -Werte der hydrostratigraphischen Einheiten ERAM sind – zusammen mit den Ausgangswerten (Anfangswerte und Bandbreiten) – in Tabelle 4 bis Tabelle 6 zusammengestellt.

Der Vergleich der resultierenden Werte mit den Basis-Bandbreiten und erweiterten Bandbreiten, die in den Kalibrierungsrechnungen R42 zur Anwendung kamen (auf die Unterschiede ist in Kap. 4.2.5.5 und 4.3.3.1 eingegangen worden) zeigen, daß mit wenigen Ausnahmen alle Werte innerhalb der Basis-Bandbreite liegen. Bei drei Einheiten befindet sich der kalibrierte  $k_f$ -Wert innerhalb der erweiterten Bandbreite, in einer einzigen Einheit erreicht er deren unteren Grenzwert:

- Für 35 Einheiten verbleibt der kalibrierte  $k_f$ -Wert innerhalb der in Kap. 4.3.3.1 definierten  $k_f$ -Bandbreiten. Der Variationsbereich innerhalb des Kalibrierungsprozesses ist meist geringer als eine halbe Größenordnung.
- Für die oberflächennahe Schicht L1/131, aus der vom WW Helmstedt rund 14 l/s entnommen werden (Tabelle 2), resultiert mit  $9,0 \cdot 10^{-6}$  m/s ein  $k_f$ -Wert etwas oberhalb der in [12] angeführten Bandbreite.
- In der Triasplatte steigt die Durchlässigkeit der Einheiten T1-K1/310, T2-K1/361 und T3/363 auf einen höheren Wert als die obere Grenze der ursprünglichen Bandbreite [12] an.
- Nur der  $k_f$ -Wert einer einzigen Einheit bewegt sich während den Kalibrierungsrechenläufen an den Rand der für die Rechnungen festgelegten Bandbreite: Die Durchlässigkeit des Mergelhorizontes des Unterrhät im Lappwald (L4/143) gelangt an den unteren Rand der in R42 gegenüber dem Basiswert von  $5 \cdot 10^{-8}$  auf  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s herabgesetzten Untergrenze der Bandbreite.

#### 4.5.1.2 Randzufluß im Lappwald

Der als Anfangszustand vorgegebene Randzufluß von insgesamt 7,5 l/s erfuhr während der Kalibrierung eine Erhöhung auf 8,52 l/s, wobei die Erhöhung hauptsächlich im Abschnitt „Mitte“ erfolgte (Tabelle 7).

#### 4.5.1.3 Transmissivität der 2D Verteilschicht

In den Rechnungen R42 wurde als Bandbreite des T-Wertes der in drei Bereiche aufgeteilten 2D Verteilschicht als Obergrenze der Wert von  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  vorgegeben; der untere Grenzwert ist 1 oder 2 Größenordnungen geringer (Tabelle 8). Während der Kalibrierung erfolgte durchwegs eine Herabsetzung unter den in Testrechnungen benutzten Wert von  $T = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  auf rund  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  in den Teilgebieten „westlicher Teil des Lappwaldes“ und „Triasplatte-Allertal“. In dem zu einem großen Teil aus Aquitarden aufgebauten Teilgebiet „tieferliegender Bereich des Lappwaldes“ resultierte ein T-Wert von etwa  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (Tabelle 8).

#### 4.5.2 Vergleich der Rechenresultate R42 mit den Meßwerten

Der in R42 bei Abschluß der Kalibrierungsrechnungen (Iteration 1022) vorliegende Modellzustand soll die heute herrschenden hydrogeologischen Verhältnisse im Modellgebiet repräsentieren. Nachfolgend werden die Rechenresultate R42 mit der Datenbasis (Meßwerte) verglichen.

##### 4.5.2.1 Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Potentialen

Die nach Abschluß der Kalibrierungsrechnungen R42 verbleibenden Unterschiede zwischen Meß- und Rechenwerten  $\Delta h$  am Ort von Meßstellen sind geordnet nach hydrostratigraphischen Einheiten in Tabelle 13 zusammengestellt.

Die Werte der Zielfunktion bzw. der Abweichungen  $\Delta h$  zwischen Meß- und Rechenwerten weisen folgende Häufigkeiten auf:

Zielfunktion	Abweichung Meßwert-Rechenwert	Anzahl	davon positive Werte (Meßwert höher als Rechenwert)
> 25 m <sup>2</sup>	> 5 m	12	10
25 bis >9 m <sup>2</sup>	5 bis >3 m	31	7
9 bis >4 m <sup>2</sup>	3 bis >2 m	23	10
4 bis >0 m <sup>2</sup>	2 bis >0 m	71	24
0 m <sup>2</sup>	0 m	43	

Der Anteil positiver Werte für  $\Delta h$  Meßwert-Rechenwert (d.h. berechnetes Potential geringer als das gemessene) beträgt 37% im Lappwald, 23% im Allertal und 10% in der Triasplatte (siehe nachstehende Aufstellung):

	Anzahl	Anzahl der Vergleichspunkte mit $\Delta h$ Meßwert-Rechenwert		
		+	-	Null
Lappwald	76	29	29	18
Allertal	82	19	48	15
Triasplatte	22	3	9	10

Bei der Verteilung der Zielfunktion bzw. der Abweichungen Meßwert-Rechenwert in den drei Strukturen Lappwald, Allertal und Triasplatte (Tabelle 14) lassen sich folgende Tendenzen feststellen:

- In allen drei strukturellen Einheiten findet sich eine ähnliche Verteilung der Zielfunktion bzw. der Abweichungen Meßwert-Rechenwert. Größere Abweichungen (>3 m) zwischen Meß- und Rechenwert betreffen im Lappwald 31%, im Allertal 14%, in der Triasplatte 33% der Vergleichspunkte. Dabei verteilen sich die größeren Abweichungen in den drei Strukturen auf folgende hydrostratigraphische Einheiten:
  - Im Lappwald kommen größere Abweichungen am häufigsten in L5-K2/144, L5-K1/145, L6/146, weniger häufig in L4/143, L3/142 und L3a/141 vor.
  - Im Allertal bestehen größere Abweichungen vor allem in A1-A4/210 bis A8-K1/233.
  - In der Triasplatte konzentrieren sich die großen Abweichungen auf T2-K1/361 und T3/363.
- Bezüglich der Verteilung der Vergleichspunkte auf die hydrostratigraphischen Einheiten innerhalb der Einheiten Lappwald, Allertal, Triasplatte bestehen folgende Verhältnisse:
  - Im Lappwald werden in L5-K2/144, L5-K1/145, L6/146 oft zu hohe Potentialwerte berechnet. Jedoch weisen L5-K1/145 und L6/146 auch Vergleichspunkte mit stark positiven Differenzen Meßwert-Rechenwert auf. In den hangenden Einheiten L3/142 und L4/143 sind die Rechenwerte meist geringer als die Meßwerte.
  - In der Allertalzone dominieren in den oberflächennahen Aquiferen negative Abweichungen (Rechenwert höher als Meßwert). Dies kann am ehesten auf die Randbedingung der Aller und eventuell auf die zu einfache Modellierung in Nähe der Grundwasseroberfläche (Einheiten A1 bis A4) zurückgeführt werden.
  - In der Triasplatte sind die Abweichungen mehrheitlich negativ (d.h. die Meßwerte sind niedriger als die Rechenwerte); jedoch kommt ebenfalls ein Vergleichspunkt mit einer stark positiven Differenz Meßwert-Rechenwert vor.
- In 25 Vergleichspunkten ist der Beitrag zur Zielfunktion über 16 m<sup>2</sup>, d.h. die Abweichung zwischen Meß- und Rechenwert übersteigt 4 m. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 15 zusammengestellt. Ihre Lokalisierung und die Unterscheidung in positive und negative Werte der Abweichung gehen aus Abbildung 49 hervor. Abbildung 49 zeigt, daß die Vergleichspunkte mit größeren Abweichung über das gesamte Modellgebiet verteilt sind, allerdings mit einer Häufung im Lappwald. Weiter ist zu erkennen, daß in allen drei Teilgebieten sowohl negative wie auch positive Abweichungen – oft in derselben Einheit - vorkommen.

In der Weferlinger Triasplatte weisen 6 Vergleichspunkte Abweichungen von über 4 m auf. Zu den zwei Vergleichspunkten mit positivem  $\Delta h$  Meß-/Rechenwert zählt die in T2-K1/361 (Oberer Buntsandstein) gelegene Stützstelle WTP\_z11; der zweite (Dp Mors 93A) befindet sich in der Sollingfolge T3/363 bei Schwanefeld (d.h. nahe der Exfiltrationszone).

Von den Vergleichspunkten mit negativem  $\Delta h$  befinden sich zwei in der Sollingfolge T3/363, einer in T2-K1/361 (Oberer Buntsandstein) sowie ein Vergleichspunkt in der NE-Randstörung T7/381. Generell wird im südlichen Modellabschnitt ein zu hohes Potential berechnet, im Norden ein zu geringes.



In den drei Vergleichspunkten des Allertals mit  $\Delta h$  größer als 4 m ist die Abweichung Meßwert-Rechenwert positiv. Es handelt sich je um einen Vergleichspunkt in A8-K1/233 (Dp Mors 40A/95T4), A13-K1/271 (Dp Mors 11/90T1) und A1-A4/210 (Dp Mors 74B).

Von den 16 Vergleichspunkten im Lappwald, die einen Beitrag von über 16 m<sup>2</sup> zur Zielfunktion aufweisen, ist  $\Delta h$  bei je 8 Vergleichspunkten positiv bzw. negativ.

Abweichungen über 4 m werden in den Einheiten L3/142 (2 Werte), L3a/141 (1 Wert), L4/143 (2 Werte), L5-K2/144 (5 Werte), L5-K1/145 und L6/146 (je 3 Werte) berechnet. In den Einheiten L3 und L4 (142, 143) resultiert ein positives  $\Delta h$ , d.h. die Rechenwerte sind geringer als die Meßwerte.

In der Einheit L5-K2/144 ist  $\Delta h$  in 4 von 5 Werten negativ (d.h. der berechnete Potentialwert ist größer als der Meßwert). Die entsprechenden Meßstellen liegen nördlich oder wenig südlich des Brunntals.

In der Steinmergelfazies des Unterrhät (L5-K1/145) im unteren Brunntal und in L6/146 im südlichen Lappwald kommen sowohl negative wie positive Werte für  $\Delta h$  vor.

Gesamthaft zeigen die Werte im Lappwald keinen eindeutigen Trend, es bestehen gegenläufige Tendenzen. Die generell geringeren Abweichungen im südlichen Lappwald – d.h. im Gebiet südlich des Schachtes Marie – sind als positiv zu bewerten.

- In den nachstehend zusammengestellten vier Gruppen von Vergleichspunkten sind die gemessenen Potentialdifferenzen zwischen dem Mittelrhät- und dem Unterrhät-Sandstein größer als die in R42 berechneten Potentialunterschiede. Ursache dafür könnten Abflüsse aus dem Oberrhät-Sandstein entlang der Brunntal-Störung in den Unterrhät-Sandstein, eine andere Aufteilung des Randzuflusses zwischen L3/142 und L5-K2/144 oder ein tiefere Position der Unterrhät-Aufschlüsse im nördlichen Allertal (und/oder eine bessere Anbindung des Unterrhät an das Allertal) sein.

	Einheit	Meßwert (vgl. Tabelle 9)	Rechenwert R42 (vgl. Tabelle 13)
<i>Dp Mors 60B</i>	<i>L4/143</i>	<i>127,3 mNN</i>	<i>127,0 mNN</i>
Dp Mors 60A	L5-K2/144	121,8 mNN	125,9 mNN
<i>Dp Mors 61C</i>	<i>L3/142</i>	<i>130,4 mNN</i>	<i>130,8 mNN</i>
<i>Dp Mors 61B</i>	<i>L4/143</i>	<i>125,6 mNN</i>	<i>128,0 mNN</i>
Dp Mors 61A	L5-K2/144	120,8 mNN	125,6 mNN
Hy Hmt 31	L4/143	134-140 mNN	126,1 mNN
Hy Hmt 28	L5-K2/144	122,2 mNN	126,3 mNN
Hy Hmt 30	L4/143	135,5-141,5 mNN	128,0 mNN
Hy Hmt 29	L5-K2/144	121,9 mNN	126,8 mNN

*kursiv* = Meßstellen mit  $\Delta h$  Meßwert-Rechenwert <4 m

#### 4.5.2.2 Grundwasseroberfläche, In- und Exfiltration

Der Vergleich der berechneten Grundwasseroberfläche mit dem aus den Meßdaten konstruierten Grundwassergleichenplan des oberflächennahen Grundwassers (vgl. [12], Anlage 8) wird bei der Beschreibung des Rechenfalls R43 in Kap. 5.2.1 erfolgen. Die berechneten In- und Exfiltrationen werden in Kap. 6.5 mit den vorliegenden Daten verglichen.

#### 4.5.3 Vorschlag eines Datensatzes

Basierend auf den in Kap. 4.5.1 vorgestellten Kalibrierungsergebnissen werden für die kalibrierten Variablen „ $k_f$ -Werte der hydrostratigraphischen Einheiten“, „Randzufluß im Lappwald“ und „T-Wert der 2D Verteilschicht“ als Parameter für die beiden Rechenfälle R43 (heutiger Zustand) und R44 (Zustand ohne Brunnenentnahme) die in Tabelle 4 bis Tabelle 6 ( $k_f$ -Werte), Tabelle 7 (Randzuflüsse im Lappwald) und Tabelle 8 (T-Wert der 2D Verteilschicht) zusammengestellten gerundeten Werte vorgeschlagen.

## **5 Rechenfall R43 (heutige Verhältnisse)**

### **5.1 Einleitung**

Der Rechenfall R43 hat die Nachbildung der heutigen hydrogeologischen Verhältnisse zum Ziel. Diese werden im Lappwald wesentlich durch die Grundwasserentnahme der Wasserwerke Helmstedt und Beendorf im Brunntal beeinflusst. Dieser wird im Rechenfall R43 mit einer Entnahme von insgesamt 31,29 l/s (Mittelwert der Jahre 1992-1996), verteilt auf die Orte der Entnahmebrunnen Rechnung getragen.

Zur Kompensation der Ausweitung des Einzugsgebietes infolge der Grundwasserentnahme wird in R43 als Randzufluß in die Einheiten L3/142 und L5-K2/144 im Lappwald der kalibrierte Wert von insgesamt 8,52 l/s (Tabelle 7) vorgegeben. Die  $k_f$ -Werte entsprechen dem kalibrierten Datensatz von R42 (Tabelle 4 bis Tabelle 6).

Im Allertal erfolgt in Oberkreide und Quartär ein vorgegebener Randzu- bzw. -abfluß, der aus dem Gradienten des Grundwassergleichenplans ([12], Anlage 8) und den kalibrierten  $k_f$ -Werten der erwähnten Einheiten ermittelt wurde (Tabelle 12).

Abweichend vom Ist-Zustand sind beide Schachtanlagen Bartensleben und Marie im Modell hydraulisch inaktiv (keine zusätzlichen Randbedingungen und keine veränderten Parameterwerte im Schachtnahbereich).

Als weiterer Rechenfall wird in Kap. 6 der Referenzfall R44 – mit Parametern wie R43, jedoch ohne Grundwasserentnahme im Brunntal und ohne den damit zusammenhängenden Randzufluß im Lappwald - detailliert dargestellt werden.

Zur Darstellung der Simulationsresultate (Potentialverteilung, Vektoren des Darcyflusses) werden 7 vertikale, quer zum Allertal orientierte Schnitte und 4 Schnitte parallel dem Allertal (Abbildung 23, Abbildung 24, Lokalisation siehe Abbildung 22) verwendet. Weiter wird die Potentialverteilung entlang der Basisflächen der wesentlichsten hydrostratigraphischen Einheiten, deren Verbreitung und Höhenisolinen in Abbildung 25 bis Abbildung 27 wiedergegeben sind, dargestellt.

Die Verhältnisse im Allertal und in der Triasplatte sind in den Rechenfällen R43 und R44 praktisch identisch und werden bei der Darstellung des Rechenfalls R44 in Kap. 6.3 und Kap. 6.4 beschrieben. Die Beschreibung der Potentialverhältnisse und Darcyflüsse im Rechenfall R43 wird daher auf den Lappwald (Grundwasserentnahme Brunntal) beschränkt. Bei der Diskussion des Rechenfalls R44 werden auch die Veränderungen gegenüber dem Rechenfall R43 herausgearbeitet.

### **5.2 Potentialverteilung**

Die Abweichungen zwischen den Meß- und Rechenwerten an Vergleichspunkten sind bei der Besprechung der Kalibrierungsergebnisse R42 in Kap. 4.5.2 behandelt worden.

Die Darstellung der Grundwasseroberfläche (Abbildung 50) gibt einen Überblick über die Potentialverteilung im Modellgebiet. Sie läßt klar mit den Grundwasserent-

nahmen zusammenhängende Absenktrichter erkennen (Brunntal, Brunnen 8). Lediglich jene der Brunnen Burgberg und Halbmeilenberg sind weniger deutlich ausgebildet.

### 5.2.1 Grundwasseroberfläche

Die in R43 resultierende Grundwasseroberfläche ist in Abbildung 50 wiedergegeben.

Im Lappwald ergeben sich zwischen der in R43 berechneten Grundwasseroberfläche und dem Grundwassergleichenplan BGR ([12], Anlage 8) in folgenden Gebieten Unterschiede:

- Entlang der Modellgrenze im Lappwald ist sowohl in der NW- wie in der SE-Ecke die Grundwasseroberfläche des Hydroisohypsenplans BGR (158 mNN bzw. 147 mNN) mehrere Meter höher als die in R43 berechneten Werte von 151 bzw. 137 mNN. Weit ausgeprägter sind jedoch die Unterschiede – trotz Randzufluß im Lappwald – im zentralen Teil, in dem der Unterschied zwischen dem Wert des Grundwassergleichenplans (163 mNN) und dem Rechenwert (132 mNN) mehr als 30 m beträgt.
- Das Gebiet mit hohen Potentialen südlich des Brunntals ([12], Anlage 8) ist in der berechneten Grundwasseroberfläche (Abbildung 50) nur andeutungsweise ausgebildet. Weiter fehlt der vorspringende Grundwasserrücken nördlich des Brunntals.
- Beiderseits des Brunntals sind zungenförmige Zonen mit tieferem Potential entlang der Gebiete ausgebildet, in denen die Grundwasseroberfläche in den Grundwasserleitern L3/142 und L1/131 liegt. Diese Gebiete sind auch in der topographischen Karte als in das Brunntal mündende Seitentäler ausgebildet.
- Alle Entnahmefrühen – auch die Brunnen Burgberg und Clarabad II, die Wasser in den tieferen Aquifere L3/142 bzw. in L5-K2/144 entnehmen - sind in der Grundwasser-Oberfläche gut sichtbar. Die tiefste Wasserspiegelhöhe im oberflächennahen Grundwasser befindet sich im Brunntal bei etwa 120 mNN.
- Die berechnete Grundwasseroberfläche ist stärker gegliedert als die notwendigerweise glättende Interpretation der BGR ([12], Anlage 8). In den Gebieten, in denen der Untergrund auf der Höhe der Grundwasseroberfläche aus Aquitarden aufgebaut ist (L2/132 und die Aquitarden im unteren Hangbereich des Lappwaldes), ist das Gefälle der Grundwasseroberfläche markant steiler als in den Verbreitungsgebieten der Aquifere L1/131 und L3/142. Im tieferen Hangbereich des Lappwaldes ist eine sekundäre Wasserscheide ausgebildet.

Die im Allertal und in der Weferlinger Triasplatte berechnete Grundwasseroberfläche ist in den beiden Rechenfällen R43 und R44 praktisch identisch. Ihre Beschreibung erfolgt in Kap. 6.3.1.

## 5.2.2 Potentialverteilung entlang Schnitten und Basisflächen hydrostratigraphischer Einheiten im Lappwald

### 5.2.2.1 Vertikalschnitte

Die Darstellung der Potentialverteilung im Rechenfall R43 entlang Vertikalschnitten ist in Abbildung 52 Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Schnitte 1 bis 7 quer zum Allertal und Abbildung 53 wiedergegeben.

Als wesentliche Elemente fallen in den Schnitten auf:

- In allen Schnitten resultiert in den Aquiferen L3/142 und L5-K2/144 eine sehr flache Potentialverteilung, die auf die Grundwasserentnahme in L3/142 (Clarabad Br. II und Burgberg) und L5-K2/144 (Clarabad Br. II) zurückgeführt wird.
- Diese flache Potentialverteilung überträgt sich vom Unterrhät-Aquifer L5-K2/144 auf die tieferliegenden Einheiten, die lediglich durch Leckage aus den höheren Einheiten gespeist werden. Eine Ausnahme bildet der Obere Gipskeuper L7/147-148-149 in den Schnitten 3 bis 5, in dem infolge des tieferen Potentials in der stärker durchlässigen Ausbildung L8-K2/150 des Schilfsandstein ebenfalls ein Potentialabbau stattfindet.
- Ein markanter Potentialabbau ist jedoch vor allem in den höheren Aquitarden L2/132 und L4/143 zu verzeichnen, am ausgeprägtesten in Schnitt 1 sowie in den Schnitten 5 bis 7. In den Schnitten 2 bis 4 ist infolge der Grundwasserentnahme in L1/131 die Potentialdifferenz zwischen höheren Aquitarden und den tieferen Aquiferen geringer.

Auf weitere Eigenschaften der Potentialverteilung im Lappwald wird bei der Besprechung des Rechenfalls R44 (Kap. 6.3) eingegangen.

### 5.2.2.2 Basisflächen hydrostratigraphischer Einheiten

Die Potentialverteilung entlang der wichtigsten Aquifere des Lappwaldes ist in Abbildung 54 bis Abbildung 56 wiedergegeben.

Im Mittlerhät-Sandstein L3/142 ist der Absenktrichter des Brunnens Burgberg und insbesondere des Brunnens Clarabad II sichtbar (Abbildung 54); beide Brunnen entnehmen Wasser im Mittlerhät-Sandstein. Die Entnahmeorte der beiden Brunnen weisen die tiefsten Potentiale in L3/142 auf.

Im Unterrhät L5/144-145 (Abbildung 55) ist der Absenkungstrichter von Clarabad Br. II im Aquifer L5-K2/144 zu erkennen. Der Gradient in L5-K2/144 ist sehr flach, das tiefste Potential ist jedoch an der nördlichen Verbreitungsgrenze, wo die Einheit L5 unter das Allertal reicht, zu verzeichnen.

Die Entnahme des Brunnens 8 an der Basis der Versturz- und Gleitsedimente von Keupermaterial (L3a/141) über dem liegenden Steinmergelkeuper (L6/146) wirkt sich in das Verbreitungsgebiet von L5-K1/145 aus (Abbildung 55).

Zwischen den Schnitten 3 und 6 besteht im Schilfsandstein L8 ein Potentialgradient gegen des Allertal hin (Abbildung 56). Wie bereits oben erwähnt, dürfte dies mit der höheren Durchlässigkeit der Einheit L8-K2/150 und der relativen Nähe der östlichen Verbreitungsgrenze dieser Einheit zum Oberkreidetrog im Gebiet von Schnitt 5 (Abbildung 23) in Zusammenhang stehen.

### 5.3 Berechnete Grundwasserflüsse im Lappwald

Die Darstellung der Darcyflüsse beschränkt sich für den Rechenfall R43 auf ausgewählte Schnitte (Abbildung 57) und die Basisflächen der Einheiten L3/142/Mittelrhät-Sandstein und L5/144-145/Unterrhät (Abbildung 58, Abbildung 59). Diese Abbildungen sollen die durch die Grundwasserentnahme im Brunntal beeinflussten Darcyflüsse im Lappwald illustrieren.

Die in Abbildung 57 dargestellten Darcyflüsse sind Projektionen dreidimensionaler Fließvektoren in die jeweilige Ebene der Vertikalschnitte. Da der Betrag des Vektors seine Farbgebung bestimmt und alle Vektoren im Raum gleich lang sind, ist aus der Gestalt der Pfeile qualitativ ableitbar, ob die Richtung der Darcyfließvektoren in der Schnittebene verläuft oder aus ihr abweicht.

Schnitt 5 (Abbildung 57) repräsentiert den südlichen Teil des Lappwaldes, in dem in den Aquiferen ein Fluß quer zur Schnittlage erfolgt, während im nördlichen Teil des Lappwaldes der Fluß schief zu den Schnitten 3 bis 1 nach NNE gerichtet ist. In Schnitt 1 ist die Exfiltration aus L5-K2/144 und L6/146 in die Oberkreide (A5/221, A6/222) des Allertals zu erkennen.

Der Darcyfluß in den Längsschnitten 9 und 10 ist in den beiden Rechenfällen praktisch gleich und wird beim Rechenfall R44 in Kap. 6.4.1 beschrieben.

In Abbildung 58 sind die Darcyflüsse an der Basis des Mittelrhät-Sandstein L3/142 dargestellt. Die Grundwasserfließrichtungen weisen durchgehend eine Komponente parallel zum Allertal auf. Im Gebiet westlich der Schächte Marie und Bartensleben ist sie parallel zum Allertal und dreht dann im nördlichen Lappwald nach NNE zur Exfiltrationszone in der Nordecke Lappwald/Allertal um.

Der Mittelrhät-Sandstein L3/142 weist keine Exfiltration an die Terrainoberfläche auf (Abbildung 51), noch tritt Wasser der Tiefensickerung in die 2D Verteilschicht aus (Abbildung 61). Abflüsse aus dem Aquifer L3/142 erfolgen durch L5-K2/144 und A8-K2/234 zu den Unteren Walbecker Schichten A5/221 und zum Quartär A1-A4/210 des Allertals oder aber durch L5-K2/144 und L6/146 in die Oberen Alleringerslebener Schichten A6/222 des Allertals.

Der Randzufluß am Modell-Westrand ist in den Abschnitten „Süd und „Mitte“ (Lokalisation der Abschnitte siehe Abbildung 39) deutlich sichtbar.

Im Gebiet des Brunntals bildet sich als Folge der Grundwasserentnahme in den Brunnen Clarabad Br. II und Burgberg (Tabelle 3) ein durch radiale Anströmung gekennzeichnetes Fließfeld aus. Der Betrag der Darcygeschwindigkeit liegt großflächig im Größenordnungsbereich  $1 \cdot 10^{-9}$  bis  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s. Entlang vertikaler Schichtversetzungen an Störungen sind die Grundwasserflüsse durch die Mächtigkeitsverringere-

rung entlang des Versatzes beeinflusst. Lokal existieren hier Darcyflüsse größer als  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s.

Die Darcyflüsse an der Basis des Unterrhät L5/144-145 (Abbildung 59) sind durch die beiden Faziesbereiche „klüftiger Feinsandstein“ L5-K2/144 im westlichen Teil des Lappwalds und „Unterrhät in Steinmergelkeuperfazies“ L5-K1/145 am Ostrand des Schichtvorkommens bestimmt. Während der Ostteil in Steinmergelkeuperfazies durch vorwiegend quer zum Allertal gerichtete Grundwasserfließrichtungen mit Darcygeschwindigkeiten von  $10^{-10}$  bis  $10^{-8}$  m/s charakterisierbar ist, liegt im westlichen und stärker durchlässigen Faziesbereich ein Fließfeld mit Darcygeschwindigkeiten zwischen  $10^{-9}$  und  $10^{-7}$  m/s vor. Nördlich des Vertikalschnitts 6 (Abbildung 22) sind die Grundwasserfließrichtungen im Unterrhät-Sandstein L5-K2/144 vorwiegend nach NNW ausgerichtet und nehmen im Nahbereich des Exfiltrationsgebietes im Norden des Lappwalds nordöstliche Richtungen zum Allertal ein.

Aus der Ausbißfläche des Unterrhät-Sandstein L5-K2/144 im nördlichen Lappwald erfolgt keine Exfiltration an die Geländeoberfläche (Abbildung 51). Auch in den Ausbißflächen der Einheiten L4/143 und A8-K2/234, an die der Aquifer L5-K2/144 seitlich angrenzt, kommen im Hangfuß des Lappwaldes nur geringfügige Exfiltrationszonen vor (Abbildung 51, Abbildung 61). Dagegen sind in der vorgelagerten Talsohle des Allertals größere Wasseraustritte aus A1-A4/210 und A5/221 zu verzeichnen.

Das niedrige Potential des Allertals nahe der Modell-Nordgrenze ermöglicht die indirekte Drainage der wesentlichen Aquifere des Lappwaldes in das nördliche Allertal (Abbildung 22, Schnitt 1 in Abbildung 23). Die wichtigsten Abflüsse aus dem Lappwald erfolgen als seitlicher Abfluß durch die Einheiten A8-K2/234 in Oberkreide und Quartär (A5/221, A1-A4/210) und als Leckage zum liegenden Steinmergelkeuper L6/146, der seinerseits an die Oberkreide des Allertals (A6/222) stößt. Dieser Wasserabfluß aus L5-K2/144 über Zwischenschichten in die Talsohle des Allertals 1 km südlich des nördlichen Modellrandes stellt die wichtigste Exfiltrationszone der tieferen Einheiten des Lappwaldes dar.

## 5.4 Berechnete In- und Exfiltrationen

Für die Bilanzierung und die Darstellung der Infiltration in das und der Exfiltration aus dem 3D Modell sind zwei Vorgehensweisen möglich:

- Die In- und Exfiltrationen aus dem Gesamtmodell mit Einschluß der 2D Verteilungsschicht wird aus den in den Modellknoten ausgewiesenen Grundwasserflüssen berechnet (vgl. Kap. 4.2.4.3). Sie beinhalten alle Zu- und Abflüsse in das bzw. aus dem Modell.
- Diese Flüsse sind bilanziert worden und sind, aufgegliedert in Teilbeträge, in Tabelle 18 zusammengestellt. Infolge der großen Ungenauigkeiten, die sich bei Einbezug der 2D Modellschicht in der detaillierten Darstellung der Flüsse ergeben, wird von einer detaillierten graphischen Darstellung dieser In- und Exfiltrationen Abstand genommen.
- Als zweites ist eine Bilanzierung der Flüsse möglich, die aus der 2D Modellschicht in den 3D Modelluntergrund eintreten oder aus diesem in die 2D Verteil-

schicht abfließen. Im vorliegenden Bericht werden diese Flüsse als „Tiefensickerung“ bezeichnet. Sie stellen den Grundwasseraustausch 2D Verteilschicht/3D Modell dar. Wie in Kap. 5.4.2 erwähnt wird, ist ihre Berechnung mit einem größeren Fehler behaftet, als die oben angeführte Bilanzierung; die für R43 ermittelten Werte sind in Tabelle 19 zusammengestellt. Hingegen ist (mit dem erwähnten Fehler) eine detaillierte grafische Darstellung der In- und Exfiltrationen über die Modelloberfläche möglich (Abbildung 60, Abbildung 61).

Beide Bilanzierungen sind von Interesse und sollen nachfolgend etwas ausführlicher diskutiert werden.

#### 5.4.1 In- und Exfiltration (Gesamtbilanz)

Die Bilanzierung der gesamten Wasserflüsse, die in das Modell ein- (Infiltration) oder aus ihm austreten (Exfiltration) erfolgt mit den von FSCGM berechneten Knotenflüssen. In- oder Exfiltrationen (z.B. an der Modelloberfläche) liegen vor, wenn in den vier in Abbildung 35 dargestellten Teilflüssen ein Überschuß (Infiltration) bzw. ein Defizit (Exfiltration) besteht. Die Bilanz erfaßt nur jene Knotenflüsse, die einen Überschuß oder ein Defizit darstellen.

Die Bilanzierung dieser Wasserflüsse erfolgt in Tabelle 18. Neben der Bilanzierung der Wasserflüsse in den Knoten des 3D Modells (F) werden die mit verschiedenen Methoden abgeschätzten Werte der GWN (A), die in den Modellrechnungen angewendete GWN (B), die Vorgaben für die Grundwasserentnahme Brunnen (C), die im Allertal am südlichen und nördlichen Modellrand vorgegebenen Zu- bzw. Abflüsse in Quartär und Oberkreide (D) sowie der kalibrierte Randzufluß im Lappwald (E) aufgeführt.

Die Bilanzierung F ist gegliedert in die In- und Exfiltrationen:

- Die Infiltrationen F1, d.h. die Zuflüsse in das Modell, sind aufgeteilt in die Infiltrationen aus der Aller (Fixpotentialknoten, F1.1), die Zuflüsse durch die Elemente mit frei berechnetem Grundwasserpotential der Modelloberfläche (F1.2, Grundwasserneubildung an der Modelloberfläche mit Ausnahme der Gebiete, in denen Exfiltration an der Geländeoberfläche stattfindet), die Zuflüsse über den südlichen Modellrand in Quartär und Oberkreide des Allertals (F1.3) sowie die (kalibrierten) Randzuflüsse im Lappwald (F1.4).
- Die Exfiltrationen F2 umfassen die Exfiltrationen in die Aller (Fixpotential, F2.1), die Brunnenentnahme (Entnahmeknoten, F2.2), den Abfluß aus Quartär und Oberkreide des Allertals am nördlichen Modellrand (F2.3) sowie die Exfiltrationen in jenen Gebieten, in denen der Grundwasserspiegel die Geländeoberfläche (digitales Geländemodell, Abbildung 30) erreicht und zu Wasseraustritten Anlaß gibt (F2.4, Exfiltrationsknoten als Kreuze in Abbildung 51).
- In den Knotenflüssen sind weiter die In- und Exfiltrationen aus dem Modelluntergrund aus der bzw. in die 2D Verteilschicht enthalten. Die Knotenflüsse an der Modelloberfläche stellen damit die Flüsse im Ensemble „3D Untergrund und 2D Verteilschicht“ dar.



Im Rechenfall R43 (Tabelle 18) beträgt die berechnete In- und Exfiltration je rund 165 l/s, die Differenz zwischen den berechneten In- und Exfiltrationen (F3.2) ist gering (2,65 l/s). Die Zuflüsse in das Modell aus der Aller (Fixpotential, 0,008 l/s) und über die übrigen Elemente der Modelloberfläche (Infiltration, 157,05 l/s) ist etwas kleiner als die realisierte Vorgabe der Grundwasserneubildung (B2<sup>bis</sup>, 161,9 l/s). Der Unterschied von 4,8 l/s dürfte von den Exfiltrationszonen herrühren (Abbildung 51), in denen die GWN nicht wirksam ist.

#### 5.4.2 „Tiefensickerung“

Wie oben erwähnt, interessieren jedoch ebenfalls die Teilflüsse, die in den 3D Modelluntergrund in- oder aus ihm exfiltrieren, d.h. der Fluß Q3 in Abbildung 35. Ihre exakte Berechnung ist schwierig, da sich die Knotenflüsse in einem Oberflächenknoten, in dem 2 oder mehrere Einheiten zusammenstossen (siehe Beispiel in Abbildung 37), aus Teilflüssen aus Bereichen unterschiedlicher Durchlässigkeit zusammensetzen.

Die Flüsse Q3 können mit dem Programm FED näherungsweise berechnet und dargestellt werden. Dabei wird aus dem 3D Feld der Darcyflüsse die Flußkomponente senkrecht zur freien Grundwasseroberfläche, d.h. der Fluß in und aus dem 3D Modelluntergrund ermittelt. Die Flußbilanz ist allgemein mit einem höheren Fehler behaftet als die oben angeführte Bilanz der Knotenflüsse.

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die In- bzw. die Exfiltrationsgebiete und die die Fließraten der „Tiefensickerung“ für den Rechenfall R43. Die Bilanzierung dieser In- und Exfiltrationen zusammen mit dem Randzufluß im Lappwald und den Brunnenentnahme ist in Tabelle 19 versucht worden.

Nach dieser Bilanz, die allerdings mit einem Fehler von rund 15% behaftet ist, beträgt die „Tiefensickerung“ – Infiltration in den und Exfiltration aus dem unter der 2D Verteilschicht liegenden Modellbereich – im Rechenfall R43 rund 89 l/s, d.h. 54% der gesamten Zu- und Abflüsse aus dem Modell (rund 165 l/s, Tabelle 18). Aus dem Modelluntergrund treten etwa 2/3 in die 2D Verteilschicht aus, 1/3 wird in den Brunnen entnommen.

Die In- und Exfiltrationen werden bei der Besprechung des Referenzfalls R44 ausführlicher diskutiert (Kap. 6.5). Dabei wird auch auf die Werte des Rechenfalls R43 und die Unterschiede zu R44 eingegangen.

### 5.5 Abklärung des Einzugsgebietes des Brunnens 8 mit Trajektorienrechnungen

Der Brunnen 8 befindet sich westlich von Beendorf, am Ausgang des Brunntals in das Allertal (Abbildung 22, Abbildung 41). Die Wasserentnahme erfolgt, wie in Kap. 4.2.5.3 beschrieben, an der Basis der dem Steinmergelkeuper L6/146 aufliegenden Versturzt- und Gleitsedimente des Oberrhät L3a/141. Die Einheiten des Lappwalds sind durch die Juraschollen der SW-Randstörung A8-K1/233 vom Allertal abgetrennt (Abbildung 23, Schnitt 3).

Im Rechenfall R43 weist der Brunnen 8 einen markanten Absenkungstrichter auf (vgl. Abbildung 50). Infolge der nahen Lage zum Allertal soll das Einzugsgebiet des Brunnens 8 mit Trajektorienrechnungen näher charakterisiert werden. Die Rechnungen werden als „Rückwärtstracking“ ausgeführt, d.h. die Partikel werden in der Austrittzone gestartet und verlaufen gegen den Strom zum Herkunftsgebiet (Grundwasserneubildung, Randzufluß). Dazu werden im vorliegenden Falle die Startpunkte für die Trajektorien auf den Niveaus 97 mNN, 83 mNN und 70 mNN kreisförmig (Radius 75 m) um den Entnahmeort angeordnet (Abbildung 62). Die Startpunkte des obersten Niveaus befinden sich in der Einheit L3a/141 oder in L5-K1/145, jene der beiden tieferen Lagen im Steinmergelkeuper L6/146.

Die Fließwegverläufe der Trajektorienrechnungen sind in Abbildung 63 dargestellt. Der Zufluß erfolgt vollständig aus dem Lappwald. Lediglich 3 Trajektorien verlaufen auf einer kurzen Strecke in der Oberkreide (A5/221) des Allertals. Die Fließwegverläufe ab den drei Niveaus sind sehr ähnlich. Im Westen und Osten des Brunnens 8 starten die Fließwege (der Verlauf in der 2D Verteilschicht wird nicht gezeigt) in L5-K1/145 und gelangen dann über die Einheit L6/146 in die Umgebung des Entnahmepunktes. Die Fließwege aus Süden stammen aus L3a/141 und verbleiben in dieser Einheit bis in die Brunnumgebung oder steigen in den unterliegenden Steinmergelkeuper L6/146 ab. Das Einzugsgebiet des Brunnens 8 beschränkt sich damit auf den Lappwald.

Wie bereits in Kap. 4.2.5.3 bemerkt worden ist, entspricht der westlichste Entnahmepunkt der geographischen Position von Brunnen 8. Die modellierte Position der Entnahmepunkte (geographische Lage, hydrogeologische Situation) erleichtert den Zufluß von Wasser aus Richtung Allertal.

## **6 Rechenfall R44 (Referenzfall, ohne Grundwasserentnahme)**

### **6.1 Einleitung**

Der Rechenfall R44 (Referenzfall) hat die Nachbildung der hydrogeologischen Verhältnisse, wie sie sich bei geschlossenen Schächten Bartensleben und Marie und ohne Grundwasserentnahme im Brunntental ergeben werden, zum Ziel. Er wird mit freier Oberfläche unter Vorgabe der Grundwasserneubildung gemäß GWD (Abbildung 31), d.h. ohne die in den Kalibrierungsrechnungen R42 und in R43 erfolgte Vergrößerung der Neubildungsrate im Brunntental, ohne Grundwasserentnahme und ohne einen Randzufluß im Lappwald gerechnet. Es soll den Zustand nach Stilllegung des ERAM als Basis für die Langzeitsicherheitsanalyse repräsentieren.

Für den Rechenfall R44 sollen die Verhältnisse im gesamten Modellgebiet dargestellt und beschrieben werden. Auf die Unterschiede zum Rechenfall R43 im Lappwald wird eingegangen.

### **6.2 Darstellung der Ergebnisse**

Der geologische Aufbau des 3D Süßwassermodells ist mit mehreren Figuren illustriert:

- Der hydrostratigraphische Aufbau entlang der Grundwasseroberfläche geht aus Abbildung 22 hervor. Diese Abbildung enthält ebenfalls den Verlauf der Schnitte 1 bis 10. Insbesondere im Lappwald (Brunntental und seine Seitentäler) ist die Oberflächentopographie deutlich durch den geologischen Bau beeinflusst (vgl. Abbildung 41).
- Die unabhängig von den numerischen Modellberechnungen entwickelte Vorstellung eines regionalen Fließfeldes mit Grundwasserfließrichtungen, die von den Erhebungen des Lappwalds und der Weferlinger Triasplatte quer zum Allertal gerichtet sind, führte zur Anordnung quer zum Allertal (Azimut 60°) der Vertikalschnitte 1 bis 7 (Abbildung 23). Dabei verlaufen die Schnitte 2 und 3 (Schnitt 3 mit Schacht Marie) im Lappwald beiderseits des Brunntentals, Schnitt 4 liegt zwischen den Schächten Marie und Bartensleben und verläuft in der Weferlinger Triasplatte entlang des Hauptgrabens. Schnitt 5 geht durch den Schacht Bartensleben.
- Die Lokalisation der Längsschnitte 8 bis 10 (Abbildung 24) ist ebenfalls aus Abbildung 22 ersichtlich. Die beiden Schnitte 8 und 9 verlaufen durch die Talsohle des Allertals: Schnitt 8 in der östlichen Talhälfte, in der der Untergrund größtenteils aus Keupergesteinen und Hutgestein aufgebaut ist. Schnitt 9 zeigt den geologischen Aufbau in der westlichen Talhälfte, dominiert durch Quartär- und insbesondere Oberkreideablagerungen, die mit gering mächtigen Zwischenschichten das Hutgestein überlagern.

Schnitt 10 verläuft durch den unteren Hangbereich des Lappwaldes und ist zu einem großen Teil aus den tieferen Einheiten des Lappwaldes (Steinmergelkeu-

per bis Schilfsandstein) aufgebaut. Er erfaßt die östlichen Randbereiche des Unterrhät-Sandstein, teilweise in seiner geringer durchlässigen Ausbildung ("Steinmergelkeuperfazies" L5-K1/145); gegen Norden wird er von den höheren Einheiten L4/143 und L3/142 überlagert. Der Schnitt zeigt das für die Serie des Lappwaldes typische Einfallen gegen Norden.

- Um die komplexeren räumlichen Strömungsverhältnisse insbesondere im Lappwald zu illustrieren, werden die Potentialverteilung und die Darcyflüsse zudem entlang der Basisflächen ausgewählter hydrostratigraphischer Einheiten dargestellt:
  - im Lappwald entlang der Basisflächen des Mittelrhät-Sandstein L3/142, des Unterrhät L5/144-145 sowie des Schilfsandstein L8/150-151-152
  - im Allertal entlang der gemeinsamen Basisfläche der Aquifere Quartär, Tertiär und Oberkreide (A1-A4/210, Tertiär/211, A5/221, A6/222 und A7/223) sowie der Basisfläche des Hutgesteins A13/271-271-273
  - in der Weferlinger Triasplatte entlang der Basisfläche der Sollingfolge smS T3/363 und des Volpriehausen-Sandstein T5/365.

Die Isohypsen der Basisflächen dieser Modelleinheiten (Abbildung 25 bis Abbildung 27) lassen die Struktur dieser Einheiten bzw. ihre Kontaktfläche zum Salzstock (Hutgestein) erkennen. Die drei dargestellten Einheiten des Lappwaldes weisen eine Muldenstruktur auf, die leicht nach Norden abfällt; im südlichen Teil befindet sich nur der Ostflügel der Mulde innerhalb des Modellgebietes. Die Basisfläche des Hutgesteins ist im Modellgebiet horizontal und liegt auf -140 mNN. In der Triasplatte fällt die leicht verbogene Platte der Sollingfolge gegen NW, in einem kleinen Gebiet entlang des Südrandes auch gegen Süden ab. Die Basis des Volpriehausen-Sandstein (Modellbasis) hat ebenfalls die Form eines Muldenschenkels; die Achse der Struktur ist jedoch ungefähr horizontal. Das Allertal als Vorfluter sinkt von Süden (113,0 mNN) nach Norden (94,8 mNN) ab.

Die Darstellung der Potentialverteilung und der Darcyflüsse erfolgt auf allen oder einem Teil dieser geologischen Schnitte. Die Abbildung der Geologie beschränkt sich dabei auf die Umrisse der hydrostratigraphischen Einheiten.

## **6.3 Potentialverteilung**

### **6.3.1 Grundwasseroberfläche**

Die in R44 ohne Grundwasserentnahme resultierende Grundwasseroberfläche (Abbildung 64) gibt einen Überblick über die Potentialverhältnisse. Ausgehend von der die Aller begleitenden Potentialsenke nehmen die Grundwasserpotentiale in den Talflanken des Allertals zu, um in den höheren Lagen der Weferlinger Triasplatte und der Lappwaldmulde maximale Potentialwerte von bis 159 mNN in der Triasplatte, bis 163 mNN im Lappwald zu erreichen.

Typische Vergleichswerte zwischen den in R43 und R44 berechneten Grundwasseroberflächen sind in Tabelle 16 zu finden.

Der Vergleich mit der für den Rechenfall R43 berechneten Grundwasseroberfläche (Abbildung 50) zeigt folgende Verhältnisse:

- Die Weferlinger Triasplatte weist in beiden Rechenfällen eine praktisch identische Potentialverteilung auf. In der östlichen Modellecke der Triasplatte ist das berechnete Potential mit 159 mNN etwas höher als jenes des Hydroisohypsenplans BGR (153 mNN, [12], Anlage 8). Ebenfalls im Allertal werden in den beiden Rechenfällen weitgehend dieselben Potentiale berechnet.
- Die Grundwasseroberfläche erfährt im Brunnental in der Umgebung der Entnahmebrunnen im Verbreitungsgebiet von L1/131 und L2/132 einen Anstieg um bis 29,5 m (Tabelle 16), entlang der Grenzen dieser Einheiten im Süden und Norden um bis 15 m. In den Einheiten L3/142 bis zur Talsohle des Allertals reduziert sich der Anstieg von 5 bis 6 m bis auf 0 m.
- Entlang der Modellgrenze im Lappwald ist in der NW-Ecke die Grundwasseroberfläche gleich wie im Hydroisohypsenplan BGR ([12], Anlage 8, 157 mNN). Im zentralen Teil und an der SE-Ecke steigt die Grundwasseroberfläche gegenüber R43 etwas an (3 m bzw. 1 m, Tabelle 16), bleibt jedoch mit 135 mNN bzw. 138 mNN immer noch deutlich unterhalb der Werte im Hydroisohypsenplan der BGR (ca. 163 mNN bzw. 147 mNN).
- Durch das Wegfallen der Entnahme im Brunnental steigt in R44 das Potential im oberflächennahen Grundwasser am Ort der Brunnen mit Entnahme in L1/131 um 25,3 m bis 29,5 m (Quellenhof, Waldfrieden Br. II, Adam & Eva) bzw. um 16,3 m (Halbmeilenberg) an (Tabelle 16). Am Ort des Brunnens 8 (mit Entnahme in R43 in L3a/141) beträgt der Anstieg in R44 25,3 bis 31,0 m. In der Umgebung der Brunnen Burgberg und Clarabad II, in denen in R43 den Einheiten L3/142 (Burgberg, Clarabad II) und L5-K2/144 (Clarabad II) Wasser entnommen wird, beträgt der Anstieg der Grundwasseroberfläche rund 25,5 bzw. 11 m.

In der Weferlinger Triasplatte zeigt die Grundwasseroberfläche eine räumliche Gliederung, die deutlich mit dem hydrostratigraphischen Aufbau des Modellgebietes in Oberflächennähe zusammenhängt (Abbildung 22):

- Im östlichen Teil der Triasplatte, in dem der Untergrund entlang der Oberfläche aus Ton- und Schluffsteinen der Volpriehausen-Folge (T4/364) oder gering mächtigen Quartärlagerungen (T1-K1/310) aufgebaut ist, weist der berechnete Grundwasserspiegel ein erhöhtes Gefälle auf (rund 15 m/km).
- Im mittleren Hangabschnitt, in dem der Untergrund auf der Höhe der Grundwasseroberfläche von den Grundwasserleitern des Oberen Buntsandstein, der Solingfolge oder des Quartär (T2-K1/361, T2-K2/362, T3/363 und T1-K1/310) eingenommen wird, resultiert ein flacherer Gradient (3 m/km) und eine Fließrichtung ungefähr nach NW.
- In den in der Flanke des Allertals verlaufenden (auch morphologisch abgezeichneten) Grundwasserhemmern der NE-Randstörung (T7/381) und in dem sie begleitenden Steinmergelkeuper des Allertals (A9-K2/246) fällt der Grundwasser-

spiegel erneut mit einem größeren Gefälle (25 bis 30 m/km) zur Sohle des Allertals ab.

- In den zungenförmigen, z.T. tief in die Triasplatte eingreifende Bereichen mit tieferen Potentialen (Tälchen bei Schwanefeld, Tälchen zwischen Schwanefeld und Groß-Bartensleben, Hauptgraben) kommen Exfiltrationszonen vor (Abbildung 65).

Die berechnete Grundwasseroberfläche ist stärker differenziert als der manuell konstruierte Grundwassergleichenplan der BGR.

Im Allertal bildet die Aller den Vorfluter (Fixpotential Aller am Modell-Südrand 113,0 mNN, am Nordrand 94,8 mNN). Das Potentialgefälle ist gegen die Aller hin gerichtet (typischer Gradient im Quartär 10-15 m/km). Die gut durchlässige Oberkreide macht sich als Zone mit flachem Potentialgefälle bemerkbar (rund 4 m/km), wie im Quartär mit einer Fließrichtung quer zum Talverlauf.

Am differenziertesten ist die Form der Grundwasseroberfläche im Lappwald. Sie wird von der Beschaffenheit des Untergrundes aus einer Folge flachliegender Aquifere und Grundwasserhemmer, die in den Talhang ausstreichen (Abbildung 22) beeinflusst. Das Brunntal weist in R44 im Verbreitungsgebiet der Einheit L1/131 (Bad Helmstedt) und in den Versturz- und Gleitsedimenten aus Oberkeupermaterial (L3a/141 bei Beendorf) Exfiltrationszonen auf (Abbildung 65). Auf das Fehlen von Exfiltrationszonen im Mittelrhät-Sandstein L3/142 des Brunntals wird weiter unten eingegangen.

Wie in der Triasplatte zeichnet sich der geologische Aufbau in der Grundwasseroberfläche markant ab: in den drei SE-NW verlaufenden, aus Aquitarden aufgebauten Bändern – L1/131 im Westen; Mergel des Unterrhät (L4/143, L5-K1/145), des Steinmergelkeuper (L6/146) und der Juraschollen (A8/233,235) in den tieferen Hangabschnitten des Lappwaldes - sind erhöhte Gradienten zu verzeichnen (15-45 m/km), während die dazwischenliegenden Aquifere (insbesondere L1/131/Jurasandstein und L3/142/Mittelrhät-Sandstein) sich durch flache Gradienten (2-5 m/km) und eine Fließrichtung ungefähr parallel zum Allertal auszeichnen.

### **6.3.2 Potentialverteilung entlang Vertikalschnitten quer zum Allertal**

In den Schnitten 1 bis 7 quer zum Allertal sind die folgenden typischen Elemente der Potentialverteilung zu erkennen (Abbildung 66).

#### **6.3.2.1 Lappwald**

Innerhalb der Lappwaldmulde zeichnen sich zwei Aquitarde durch hohe abwärts gerichtete Potentialgradienten aus. In den Modelleinheiten L2/132 (Unteres Hettangium) und L4/143 (Mergelhorizont des Unterrhät) erfolgt ein wesentlicher Potentialabbau. Dieser ist in den Schnitten 1 bis 3 (Brunntal bis nördlicher Modellrand) sehr ausgeprägt, im südlichen Teil des Lappwaldes geringer. Ebenfalls im oberen Gipskeuper (L7/147-148-149) erfolgt ein Potentialabbau zum liegenden Schilfsandstein, insbesondere im Verbreitungsgebiet der etwas stärker durchlässigen Unter-einheit L8-K2/150 (Schnitte 3 bis 5).

Weiter ist in der Übergangszone der Lappwaldmulde zur Allertalzone in den geringdurchlässigen Schichten des Jura (A8/233-234-235) ein markanter horizontaler Potentialgradient zu verzeichnen (Schnitte 1 bis 7).

Im Mittelrhät-Sandstein L3/142, im Sandstein des Unterrhät L5-K2/144 und im Steinmergelkeuper kmSM L6/146 herrschen parallel zur Schnittrichtung nur geringe Potentialgradienten. Da der berechnete Grundwasserfluß in diesen Einheiten meist quer zu den Schnitten 1 bis 7 ausgerichtet ist, wird die Potentialverteilung und die Auswirkungen der Grundwasserentnahmen im Mittelrhät- und Unterrhät-Sandstein in Kap. 6.3.4 entlang der Basisflächen dieser Einheiten beschrieben.

### 6.3.2.2 Weferlinger Triasplatte

Wie bereits bei der Darstellung der Grundwasseroberfläche erwähnt worden ist, beträgt der Gradient in den höheren Hangbereichen, in denen der Untergrund aus den wenig durchlässigen Einheiten der Volpriehausen-Folge und lokal wenig mächtigem Quartär aufgebaut ist, etwa 15 m/km. Wie die Schnitte 2 bis 6 zeigen, schlägt der Oberflächengradient bis an die Modellbasis (Basis des Volpriehausen-Sandstein) durch.

Bedingt durch die Anwesenheit stärker durchlässiger Einheiten (Oberer Buntsandstein und Sollingfolge (T2/361-362 und T3/363) ist im Mittelteil der Triasplatte der horizontale Gradient entlang der Schnitte 1 bis 7 gering (3 m/km). In der Sollingfolge, die durch Leckage aus dem Hangenden Zuflüsse erhält, liegt in allen Schnitten 1 bis 7 ein gegen das Allertal gerichteter flacher Gradient vor. Auf die Potentialverteilung in der Sollingfolge wird in Kap. 6.3.4 erneut eingegangen.

Da die Sollingfolge relativ hohe Grundwasserpotentiale aus der Weferlinger Triasplatte an die NE-Randstörung heranführt, bestehen hier am Übergang von der Weferlinger Triasplatte zum Allertal im nördlichen Modellteil (Schnitte 1 bis 4) hohe horizontale Gradienten.

Die Schnitte 4 und 5 verlaufen in der Weferlinger Triasplatte entlang des Oberflächengewässers Hauptgraben. Aufgrund dieser Depression in der Geländeoberfläche werden im hangenden Oberen Buntsandstein T2/361-362 aufwärts gerichtete Gradienten berechnet.

### 6.3.2.3 Allertal

Das Allertal (Schnitte 1 bis 7) ist durch vorwiegend vertikale, zur Aller hin gerichtete Grundwasserpotentiale gekennzeichnet. In den Schnitten 2 bis 5 ist dieses Bild etwas weniger deutlich infolge des erhöhten Potentials in der NE-Randstörung (T7/381, Schnitte 2 bis 5) oder im Schilfsandstein A11/248 des Allertals (Schnitte 4 und 5), das in der Einheit A10/247 zu flach verlaufenden Potentiallinien mit einem vertikalen Potentialabbau Anlaß gibt. In allen Schnitten stellt die Aller infolge ihres niedrigen Potentials die Exfiltrationszone dar. Die Potentialverteilung im gut durchlässigen Oberkreidetrog ist in allen Schnitten sehr flach.

Auf die Potentialverteilung in der Oberkreide und im Quartär wird in Kap. 6.3.4 nochmals eingegangen werden.

### 6.3.3 Potentialverteilung entlang Längsschnitten parallel des Allertals

Entlang der Längsschnitte 8 bis 10 (Abbildung 67, Lokalisation Abbildung 22) resultiert folgende Potentialverteilung:

In Schnitt 9 zeigt die Oberkreide und das darunterliegende Hutgestein eine sehr flache Potentialverteilung. Insgesamt variiert das Potential vom Südrand bis wenig vor dem nördlichen Modellrand zwischen 113 und 119 mNN. In den letzten 1,6 km vor dem nördlichen Modellrand wird durch die Einheit L6/146 das erhöhte Potential des Lappwaldes in die Talsohle des Allertals getragen; in der darüberliegenden Einheit A8-K2/234 findet ein ausgeprägter Potentialabbau auf die Werte im Oberflächenaquifer A5/221 (117 bis 99 mNN) statt. Dieser Potentialabbau hat nur wenig mit dem geschlossenen Modellrand zu tun, sondern ist eine Konsequenz der nach Norden einfallenden Lappwaldmulde.

In Schnitt 8 durch den östlichen Teil des Allertals liegen die Potentiale vom Südrand bis 2 km vor dem Nordrand zwischen 110 und 116 mNN. Als Folge des unregelmäßigen Verlaufs der Aller, die den Schnitt mehrere Male quert, wechseln entlang des Schnittes Wasserscheiden und Senken ab. Als Folge einer Schwelle von Festgestein, die den Oberkreidetrog praktisch unterbricht, fällt auf den letzten 2 km vor dem Nordrand das Potential von 115 auf 101 mNN ab. Wie bereits bei den Profilen quer zum Allertal beobachtet, trägt der Schilfsandstein des Allertals (A11/248) aus der Triasplatte ein erhöhtes Potential in das Allertal; es wird in den wenig durchlässigen Schichten des oberen Gipskeupers (A10/247) abgebaut.

In dem durch den tieferen Hangbereich des Lappwaldes verlaufenden Schnitt 10 weist der Schilfsandstein im südlichen Modellteil die niedrigsten Potentialwerte (124-128 mNN) auf. In diesem Abschnitt erfolgt seine Speisung durch Leckage aus der hangenden Einheit L6/146. Auf die Ursache des niedrigen Potentials im Schilfsandstein wird in Kap. 6.3.4 eingegangen.

In den besser durchlässigen Einheiten L5-K2/144, L5-K1/145, L6/146 ist das Potential in den ersten 3 km ab dem Südrand als Folge der komplexen strukturellen Verhältnisse im Tälchen hinter Morsleben relativ tief. Der höchste Potentialwert auf der Höhe des Schnittes 4 beträgt 134 mNN. Das Potential baut sich bis zum Nordrand auf 127 mNN ab.

### 6.3.4 Potentialverteilung entlang Basisflächen von Einheiten

Die Darstellung der Potentialverteilung entlang der Basisflächen wichtiger hydrostratigraphischer Einheiten erlauben zusätzliche Einblicke in die räumlichen Potential- und Fließverhältnisse.

Die Potentialverteilung entlang der Basis des Mittelrhät-Sandstein L3/142 geht aus Abbildung 68 hervor. Dieser Aquifer wird vor allem durch Leckage aus den begrenzenden Aquitarden (vor allem der hangenden Einheit L2/132) gespeist. Strukturelle Komplikationen in der Nähe des Modellrandes Lappwald (Abbildung 22) ermöglichen weitere Wasserzuflüsse, die für den Potentialwert 140 mNN in Abbildung 68 verantwortlich sind. Im Gebiet Bad Helmstedt verursachen Abflüsse aus L3/142 durch L4/143 entlang der Brunntalstörung zum Unterrhät-Sandstein eine Zone mit



niedrigem Potential (132 mNN), das von SE und NW mit einem flachen Gradienten (1 bis 3 m/km) angeströmt wird.

Entlang der Basis des Unterrhät L5/144-145 ist im klüftigen Feinsandstein des Unterrhät L5-K2/144 der Horizontalgradient mit weniger als 1 m/km noch geringer als im Mittelrhät-Sandstein (Abbildung 69). Der Fluß erfolgt von SE nach NW zur Exfiltrationszone aus dem Unterrhät-Sandstein nahe des nördlichen Modellrandes (Schnitt 1).

Im Unterrhät in Steinmergelfazies L5-K1/145 ist das Potentialgefälle mit einem Gradienten von etwa 15 m/km gegen das Allertal gerichtet (Gebiet von Schacht Marie bis SE von Schacht Bartensleben, Schnitte 3 und 6).

Die Basis des Schilfsandstein L8/150-151-152 befindet sich im Lappwald tiefer als der Salzspiegel im Allertal (Abbildung 27).

Der Schilfsandstein wird im südlichen Lappwald durch Leckage aus dem Hangenden gespeist. Das Potential in dieser Einheit ist im nördlichen Lappwald praktisch gleich wie im Unterrhät-Sandstein L5-K2/144 (Abbildung 70). Die tiefsten Potentiale liegen in der südlichen Modellhälfte, im Gebiet von Schacht Marie bis südlich von Schacht Bartensleben. Dies hängt einerseits mit der etwas größeren Durchlässigkeit des Schilfsandstein in diesem Gebiet zusammen (L8-K2/150), andererseits reicht die Verbreitungsgrenze des Schilfsandstein insbesondere in Schnitt 5 nahe an die Talfüllung (Oberkreide) des Allertals heran (Abbildung 23) und verursacht im Südteil des Lappwaldes im Schilfsandstein ein Potentialgefälle quer zum Allertal.

Die Basis von Quartär/Oberkreide ist in Abbildung 25 dargestellt. Im östlichen Teil des Allertals ist ein 300 bis 600 m breites Band von Trögen, deren Basis sich etwa zwischen -100 mNN und 0 mNN befindet, ausgebildet. Diese Tröge sind mit gut durchlässigen Oberkreideablagerungen verfüllt. Der Oberkreidetrog ist etwa 1 km südlich der nördlichen Modellgrenze durch eine etwa 800 m breite Schwelle, in der Festgestein bis nahe an die Oberfläche reicht, unterbrochen.

In der östlichen Hälfte des Allertals liegt die Felsoberfläche (Basis Quartär/Oberkreide) unteuf (einige Meter). Lokal befindet sich die Grundwasseroberfläche bereits im Festgestein.

Die Potentialverteilung im Quartär wird im wesentlichen durch den Verlauf der Aller, die den Vorfluter für die Quartär- und Kreideablagerungen darstellt, bestimmt. Die Fließrichtung ist sowohl im Quartär als auch in der Oberkreide quer zum Tal, aus beiden Talflanken gegen die Aller hin gerichtet. In der erwähnten, den Oberkreidetrog unterbrechenden Schwelle erfolgt dagegen der Fluß in Talrichtung. Quartär und Oberkreide weisen typische Gradienten von 10-15 m/km bzw. 5 m/km auf.

Das Hutgestein ist unter dem Allertal verbreitet (Verbreitungsgebiet siehe Abbildung 27). In den Süßwasserrechnungen R44 ist der Verlauf der Aller an der Basis des Hutgesteins A13/171-172-173 (Modellbasis) als Zone geringsten Potentials ausgebildet (Abbildung 70). Der Fluß im Hutgestein erfolgt quer zum Allertal mit Gradienten von 15 bis 25 m/km.

Die Sollingfolge T3/363 (Abbildung 69) weist einen gleichförmigen, von SE nach NW (Allertal beim nördlichen Modellrand) gerichteten Potentialgradienten von rund 3 m/km auf.

Die Potentialverteilung im oberflächennahen Grundwasser der drei Teilgebiete der Triasplatte (östlicher Teil ohne Sollingfolge, Verbreitungsgebiet der Sollingfolge, NE-Randstörung) paust sich in gedämpfter Form auf die Basis des Volpriehausen-Sandstein T5/365 – die Modellbasis – durch (Abbildung 70). Die Fließrichtung im zweiten Teilgebiet (NNE-WSW) weist einen Winkel von 30° zum Allertal auf; in den beiden anderen Teilgebieten ist sie ungefähr senkrecht zum Talverlauf.

### 6.3.5 Unterschiede in der Potentialverteilung der Rechenfälle R43 und R44

Gegenüber R43 sind im Rechenfall R44 im Lappwald folgende hauptsächlichen Unterschiede in der Potentialverteilung zu verzeichnen:

- Der in Kap. 6.3.1 erwähnte Anstieg der Grundwasseroberfläche durch das Wegfallen der Grundwasserentnahme beträgt im Brunnental und bei Brunnen 8 (Wasserwerk Beendorf) bis 31 m. Auch in der weiteren Umgebung des Brunnentals steigt die Grundwasseroberfläche im Verbreitungsgebiet von L1/131 und L2/132 (Abbildung 22) bis 15 m an. Im tieferen Hangbereich (Verbreitungsgebiet L3/142 bis zum Hangfuß nimmt der Anstieg von 5 bis 6 m auf 0 m ab.
- Der Anstieg des Potentials in den Aquiferen L3/142 und in L5-K2/144 durch das Wegfallen der Entnahme in L3/142 und L5-K2/144 durch die Brunnen Burgberg und Clarabad Br. II beträgt im Mittelrät-Sandstein 7,7 m (Burgberg) und 11,9 m (Clarabad Br. II), im Unterrät-Sandstein (Clarabad Br. II) lediglich 4,4 m.
- Das Allertal und die Triasplatte weisen in den beiden Rechenfällen eine praktisch identische Potentialverteilung auf.

## 6.4 Berechnete Grundwasserflüsse

Da die Potentialverteilung im Lappwald insbesondere in L3/142 und L5-K2/144 und teilweise in der Oberkreide des Allertals Fließrichtungen parallel zum Allertal anzeigt, werden die Darcyflüsse neben den Darstellungen in den Schnitten 1 bis 3 und 5 quer zum Allertal ebenfalls in den Längsschnitten 9 und 10 dargestellt. Zur Illustration der komplexeren räumlichen Strömungsverhältnisse insbesondere im Lappwald werden sie zudem entlang der Basisflächen der wichtigsten Aquifere sowie des Hutgesteins und des Volpriehausen-Sandstein dargestellt (Abbildung 71 bis Abbildung 74)

### 6.4.1 Schnitte

Die Schnittdarstellungen (Abbildung 71) erlauben vor allem Einblicke in das Verhalten der Aquitarde. In Schnitt 5 (durch Schacht Bartensleben) erfolgen im östlichen Teil des Lappwaldes Flüsse in Richtung Allertal (L6/146, L7-K1/147 und L8-K2/150); der Abfluß zum Allertal wird durch den Jura-Riegel 233/A8-K1 der SW-Randstörung behindert ( $10^{-9}$  bis  $10^{-10}$  m/s). Wie die bis zu Punkten verkürzten Fließvektoren zeigen, ist der Fluß in den Aquiferen L3/142 und L5-K2/144 im westlichen Teil des

Lappwaldes schief zur Schnittrichtung. In den Aquitarden L2/132 und L4/143 ist ein Abwärtsfluß in die unterliegenden Aquifere zu verzeichnen.

Im Allertal ist der aus den beiden Talflanken stammende Wasserfluß subhorizontal, mit Exfiltration in die Aller.

In der Triasplatte dominiert ein horizontaler Fluß gegen das Allertal. Zuflüsse zur Sollingfolge durch direkte Infiltration oder durch Leckage aus dem hangenden Buntsandstein T2-K1/361 erfolgen im östlichen Teil; im westlichen Teil exfiltriert Wasser aus der Sollingfolge durch T2-K1/361 an die Oberfläche (Hauptgraben) und durch die NE-Randstörung in das Allertal.

Im Lappwald herrschen in den beiden weiter nördlich verlaufenden Schnitten 3 und 2 in den Aquitarden L2/132 und L4/143 erneut Abwärtsflüsse (Speisung der tieferen Einheiten). In den Einheiten L3/142 und L5-K2/144 sind erneut Flüsse schief zur Schnittlage, in den tieferen Einheiten L6, L7 und L8 vermehrt parallel der Schnittlage gegen das Allertal, zu verzeichnen.

Im Allertal ist das Fließverhalten ähnlich wie in Schnitt 5. In der Triasplatte wird die Sollingfolge erneut direkt sowie aus der hangenden Einheit T2-K1/361 gespeist. Infolge der außerhalb des Hauptgrabens höheren Geländehöhe erfolgt keine Exfiltration an die Geländeoberfläche. Das Wasser der Sollingfolge fließt entlang der NE-Randstörung mit einer Fließrichtung schief zum Schnitt nach Norden ab und gelangt durch die NE-Randstörung ins Allertal oder exfiltriert im Gebiet von Schnitt 1 durch den Oberen Buntsandstein T2-K1/361 in den Taleinschnitt bei Schwanefeld.

Wie in Kap. 5.3 angeführt, ermöglicht das niedrige Potential des Allertals nahe der Modell-Nordgrenze die indirekte Drainage der wesentlichen Aquifere des Lappwaldes (Schnitt 1). Dieser Wasserabfluß aus L5-K2/144 über Zwischenschichten in die Talsohle des Allertals 1 km südlich des Modellrandes stellt auch in R44 die wichtigste Exfiltrationszone der tieferen Einheiten des Lappwaldes dar.

Die Dominanz von Flüssen quer zur Talrichtung im Hutgestein des Allertals äußert sich im Längsschnitt 9 durch verkürzte oder punktförmige Fließvektoren. Auch der Fluß in den Lockersedimenten von Oberkreide und Quartär erfolgt meist quer zum Schnitt mit einer lokal variierenden talparallelen Flußkomponente.

Der Längsschnitt 10 durch den unteren Hangbereich Lappwald (dominierende Einheiten L5 bis L8) zeigt Zonen, in denen der Fluß senkrecht zum Schnitt erfolgt. Im allgemeinen weist er jedoch eine deutliche Komponente parallel zum Allertal auf.

Der Vergleich mit R43 () zeigt folgende Merkmale:

- Wie in Kap. 6.3.1 erwähnt, ist die Potentialverteilung im Allertal und in der Triasplatte in beiden Rechenfällen R43 und R44 praktisch identisch. Unterschiede zwischen den beiden Rechenfällen beschränken sich erwartungsgemäß auf die Lappwaldmulde.
- In beiden Rechenfällen erfolgen natürliche Wasserabflüsse aus den tieferen Einheiten des Lappwaldes in die Lockergesteinsfüllung des Allertals nahe des nördlichen Modellrandes (Schnitt 1).

- Im Gebiet des Brunntals (Schnitte 2 und 3) sind die Fließrichtungen in R43 durch die Brunnenentnahme in den Einheiten L1/131, L3/142 und L5-K2/144 beeinflusst; dieser Einfluß fällt in R44 weg.
- In Schnitt 5 sind die Darcyflüsse in den beiden Rechenfällen sehr ähnlich, außer daß in R43 der seitliche Randzufluß entlang der Modellgrenze Lappwald sichtbar ist, der in R44 wegfällt.
- In den Längsschnitten 9 und 10 sind in Bezug auf den Darcyfluß zwischen den beiden Rechenfällen kaum Unterschiede zu erkennen.

#### 6.4.2 Basisflächen hydrostratigraphischer Einheiten

In Abbildung 72 sind die Darcyflüsse an der Basis des Mittelrhät-Sandstein L3/142 dargestellt. Die Horizontalkomponenten der abgebildeten Grundwasserfließrichtungen verlaufen nur teilweise senkrecht zum Allertal und werden maßgeblich durch die beiden bereits in Kap. 6.3.4 erwähnten Abflußzonen SW Morsleben und im Brunntal (Störungen) sowie im nördlichen Allertal bestimmt. Der Betrag der Darcygeschwindigkeit liegt großflächig im Bereich  $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$  m/s.

Die Speisung dieser Einheit erfolgt durch direkte Grundwasserneubildung an der Modelloberfläche (Abbildung 22) und durch Leckage aus dem Hangenden (L2/132).

Die Speisung des Unterrhät L5/144-145 erfolgt durch Leckage aus der hangenden Einheit L4/143 und untergeordnet durch direkte Grundwasserneubildung.

Die Darcyflüsse (Abbildung 73) sind durch die beiden Faziesbereiche „klüftiger Feinsandstein“ (L5-K2/144) im westlichen Teil des Lappwalds und „Unterrhät in Steinmergelkeuperfazies“ (L5-K1/145) am Ostrand des Schichtvorkommens bestimmt. Während der Ostteil in Steinmergelkeuperfazies noch durch vorwiegend quer zum Allertal gerichtete Grundwasserfließrichtungen mit Darcygeschwindigkeiten zwischen  $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$  m/s charakterisierbar ist, liegt im westlichen und höher permeablen Faziesbereich ein variables Fließfeld mit Darcygeschwindigkeiten zwischen  $10^{-9}$  und  $10^{-7}$  m/s vor.

Im südlichsten Teil des Lappwaldes (Störung im Tälchen SW von Morsleben) erfolgen Abflüsse aus L5-K2/144 an die Oberfläche (Abbildung 65).

Im Modellgebiet nördlich Schnitt 4 erhält der Unterrhät-Sandstein L5-K2/144 entlang der Brunntalstörung Zuflüsse aus dem Mittelrhät-Sandstein (vgl. oben). Es erfolgt ein ausgeprägter Wasserfluß nach Norden; das Grundwasser exfiltriert nahe der nördlichen Modellgrenze im Gebiet von Schnitt 1 (vgl. Abbildung 71). Der Wasserabfluß aus dem Unterrhät L5-K2/144 erfolgt nicht dort, wo diese Schicht an die Modelloberfläche ausstreicht, sondern etwas weiter östlich davon, wo unter der Talsohle das Unterrhät über Zwischenschichten mit dem tiefen Potential der Talfüllung Allertal verbunden ist: Über A8-K2/234 mit den Unteren Walbecker Schichten A5/221 sowie über den liegenden Steinmergelkeuper L6/146 mit den Oberen Aleringerslebener Schichten A6/222. Die Exfiltration im Gebiet von Schnitt 1 ist eine Konsequenz des Absinkens des Unterrhät-Sandstein unter die Talsohle im Gebiet nahe des Modellgebiet-Nordrandes, wo aus topographischen Gründen die niedrigsten Potentiale im Modellgebiet vorkommen.

An der Basis des Schilfsandstein L8/150-151-152 – der Modellbasis - dominieren in der südlichen Modellhälfte mit dem Verbreitungsgebiet der stärker durchlässigen Ausbildung L8-K2/150 Flüsse zum Allertal hin (Abbildung 74). Nördlich des Brunmentals sind im geringer durchlässigen Bereich L8-K1/151 Fließrichtungen gegen den nördlichen Modellrand (Allertal, Schnitt 1) zu verzeichnen. Die Fließgeschwindigkeiten in den drei verschiedenen Durchlässigkeitsbereichen des Schilfsandstein betragen rund  $10^{-15}$  bis  $10^{-14}$  m/s in L8-K1/151,  $10^{-14}$  bis  $10^{-12}$  m/s in L8-K3/152 und  $10^{-12}$  bis  $10^{-10}$  m/s im stärker durchlässigen Bereich L8-K2/150 (Abbildung 74).

Die Speisung des Schilfsandstein erfolgt durch Leckage im Verbreitungsgebiet von L8-K3/152 und insbesondere L8-K2/150. Wasserabflüsse erfolgen zwischen Schnitt 3 (Schacht Marie) bis Schnitt 5 (Schacht Bartensleben) durch den Jura in die Talfüllung des Allertals (Oberkreide) und das Hutgestein.

Den logarithmierten Betrag des Darcyflusses an der Unterfläche des Schichtkomplexes Quartär bis Kreide (A1-A4/210, Tertiär/211, A5/221, A6/222, A7/223) zeigt Abbildung 72. Die Grundwasserfließrichtungen sind im Allertal und auch in der Werflinger Triasplatte vorwiegend quer zum Verlauf der Aller ausgerichtet. Die dargestellten Darcyflüsse sind sehr variabel ( $10^{-12}$  bis  $10^{-6}$  m/s) und reflektieren den  $k_f$ -Wert der jeweiligen Modelleinheit an der Basis des Schichtkomplexes Quartär/ Kreide. Wegen ihrer relativ geringen Darcygeschwindigkeiten ( $10^{-12}$  bis  $10^{-9}$  m/s) ist das Verbreitungsgebiet der Unteren Alleringerslebener Schichten A7/223 an der Kreidebasis gut erkennbar. Erhöhte Geschwindigkeiten ( $10^{-8}$  bis  $10^{-6}$  m/s) weist die Westflanke des Oberkreidetrogs (A5/221, Abbildung 23) und die von unteren Walbecker Schichten bedeckte Festgesteinsschwelle nördlich von Schnitt 1 auf. Die Fließgeschwindigkeiten an der Basis der Oberkreide sind allerdings nicht charakteristisch für die im Oberkreidetrog dominierenden höher durchlässigen Einheiten A5/221 Untere Walbecker Schichten und A6/222 Obere Alleringerslebener Schichten. In diesen werden typische Fließgeschwindigkeiten von  $10^{-7}$  m/s bzw.  $10^{-8}$  m/s berechnet.

Im Quartär der östlichen Talseite des Allertals und der Triasplatte betragen die Darcygeschwindigkeiten zwischen  $10^{-9}$  und  $10^{-6}$  m/s.

In Abbildung 74 sind im Bereich des Allertals die Darcygeschwindigkeiten an der Hutgesteinsbasisfläche A13/171-172-173 (Modellbasis) dargestellt. Im wesentlichen gilt für das Hutgestein eine Ausrichtung der Fließvektoren senkrecht zum Verlauf der Aller. Im Süden des Modellgebietes befindet sich die durch die Aller hervorgerufene Wasserscheide seitlich versetzt unterhalb der Aller. Wie aus der Potentialverteilung in Schnitt 6 und 7 hervorgeht (Abbildung 66) ist dies eine Auswirkung der Schichtenfolge DGL. Abgesehen vom Umfeld des die Aller begleitenden Potentialminimums, das durch im Hutgestein aufsteigendes Grundwasser gekennzeichnet ist, herrschen im Hutgestein (quasi-)horizontale Fließrichtungen vor. Der Wertebereich der Darcygeschwindigkeit an der Hutgesteinsunterfläche reicht etwa von  $10^{-14}$  bis  $10^{-10}$  m/s, wobei sich die Geschwindigkeiten zwischen  $10^{-11}$  und  $10^{-10}$  m/s auf das Gebiet mit erhöhten Gradienten entlang des Lappwaldes – wo das Hutgestein von Jura-Sediment überlagert wird – beschränken.

Wie in Kap. 6.3.4 formuliert, herrscht in der Sollingfolge T3/363 ein gleichförmiger Grundwasserfluß mit Fließgeschwindigkeiten von  $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$  m/s, in kleineren Bereichen von  $10^{-8}$  bis  $10^{-7}$  m/s. Der Fluß ist im südlichen Teil des Modellgebietes gegen das Allertal gerichtet, dreht aber weiter nördlich immer mehr nach NW zu den aus strukturellen und topographischen Gründen nahe der nördlichen Modellgrenze

liegenden Exfiltrationszonen ab. Die Speisung der Sollingfolge erfolgt durch Direktinfiltration und Leckage aus dem hangenden Oberen Buntsandstein T2/361-362.

Das Fließfeld im Volpriehausen-Sandstein T5/365 (Modellbasis) ist ähnlich jenem in der Solling-Folge (Abbildung 74). Infolge der geringen Durchlässigkeit sind die Fließgeschwindigkeiten jedoch bis vier Größenordnungen kleiner (meist  $10^{-13}$  bis  $10^{-11}$  m/s).

Entlang der Basisflächen des Mittelrhät-Sandstein L3/142 und des Unterrhät L5/L144-145 bestehen zwischen den Rechenfällen R44 und R43 (Abbildung 72, Abbildung 73 bzw. Abbildung 58, Abbildung 59) folgende Unterschiede:

- In L3/142 erfolgt in R43 ein radialer Zufluß zu den Brunnen Burgberg und Clara-bad Br. II (Abbildung 58). Auch in R44 ist im Brunntal ein radialer Fluß zu erkennen; dieser steht in Zusammenhang mit Abflüssen entlang der Brunntalstörung zum Unterrhät-Sandstein L5-K2/144. Im Norden des Brunntals herrscht in beiden Rechenfällen ein Fluß gegen Norden.
- Auch in L5-K2/144 ist in R43 ein radialer Zufluß zum Brunnen Clara-bad Br. II zu erkennen (Abbildung 59). In R44 bewirkt der Zufluß aus L3/142 entlang der Brunntalstörung lokal radiale Abflüsse. In beiden Rechenfällen dominiert im nördlichen Lappwald in der Einheit L5-K2/144 ein Fluß zur Exfiltrationszone im nördlichen Allertal.

## 6.5 Berechnete In- und Exfiltrationen

Der Vergleich der geographischen Verteilung der Infiltrationen in den Modelluntergrund (R43: Abbildung 60; R44: Abbildung 75) mit der vorgegebenen Randbedingung Grundwasserneubildung (Abbildung 32 in R43, Abbildung 31 in R44) zeigt teilweise markante Unterschiede in der geographischen Verteilung. In Gebieten, in denen nahe der Oberfläche gering durchlässige Einheiten anstehen (z.B. die Volpriehausen-Folge T4 im östlichen Teil der Triasplatte) sind die Infiltrationen relativ gering. Durch die 2D Verteilschicht kann das Wasser hangabwärts zu stärker durchlässigen Einheiten gelangen und dort infiltrieren. Im angeführten Beispiel sind in der Sollingfolge T3/363 stark erhöhte Infiltrationsraten (bis 500 mm/a und mehr) zu beobachten.

Echte Exfiltrationen aus dem Modell erfolgen in jenen Gebieten, in denen die Grundwasseroberfläche die Geländeoberfläche (Geländemodell) erreicht: Exfiltrationsgebiete (Kreuze in Abbildung 51 bzw. Abbildung 65) befinden sich im Allertal sowie in den Seitentälern der Triasplatte und des Lappwaldes.

Es bestehen jedoch auch außerhalb der echten Exfiltrationszonen Austritte von Wasser aus dem 3D Modelluntergrund in die 2D Verteilschicht. Die Flüsse in dieser Schicht repräsentieren den Zwischenabfluß. Der Wasseraustausch zwischen der 2D Verteilschicht und dem 3D Modelluntergrund ist in Abbildung 60 und Abbildung 61 (R43) sowie Abbildung 75 und Abbildung 76 (R44) dargestellt und repräsentiert die Verteilung der "Tiefensickerung".

Die Berechnung der In- und Exfiltrationen in die 2D Verteilschicht (Grundwasserneubildung) und die "Tiefensickerung" sind in Kap. 5.4 detailliert diskutiert worden.

Nachfolgend sollen die beiden Bilanzierungen "Gesamtumsatz" und "Tiefensickerung" und ihre räumliche Verteilung näher dargestellt werden.

### 6.5.1 „Gesamtumsatz“

Die Bilanzierung der gesamten In- und Exfiltration beträgt in R44 je rund 153 l/s (Tabelle 18, Infiltration 154,10 l/s, Exfiltration 152,52 l/s). Der Rechenfehler von 1,58 l/s macht 1,03% des Mittelwertes von In- und Exfiltration aus.

### 6.5.2 „Tiefensickerung“

Die mit FED (Bemerkung zu den Ungenauigkeiten dieser Berechnungsmethode siehe Kap. 5.4.2) für R44 berechneten Infiltrationen in den bzw. Exfiltrationen aus dem Modelluntergrund („Tiefensickerung“) betragen 72,83 l/s (Mittelwert). Der Fehler zwischen berechneter In- und Exfiltration zum Mittelwert beläuft sich auf 8,07% (Tabelle 19). Die "Tiefensickerung" umfaßt damit etwa die Hälfte (47,5%) der In- und Exfiltration über das Gesamtmodell.

Die Infiltrationen aus der 2D Verteilschicht in den 3D Modelluntergrund bzw. die Exfiltrationen aus dem 3D Modelluntergrund werden nachfolgend für die drei Teilgebiete "Triasplatte", "Allertal" und "Lappwald" dargestellt. Dabei sind die Verhältnisse in der Triasplatte und im Allertal in beiden Rechenfällen identisch. Die Unterschiede zwischen R44 und R43 im Lappwald werden in Kap. 6.5.3 beschrieben.

#### 6.5.2.1 Weferlinger Triasplatte

Im östlichsten Bereich der Weferlinger Triasplatte, in dem der Untergrund aus geringdurchlässigem Volpriehausen-Sandstein T5/365 aufgebaut ist (teilweise bedeckt von gering mächtigem Quartär T1-K1/310, vgl. Abbildung 22), ist die Infiltration aus der 2D Verteilschicht gering (<100 mm/a); mancherorts exfiltriert sogar Wasser aus dem Untergrund in die 2D Verteilschicht.

Der in diesem Gebiet nicht in den Untergrund eingedrungene Teil der Grundwasserneubildung fließt in der 2D Verteilschicht hangabwärts und infiltriert in den Aquifer Sollingfolge T3/363, wobei Infiltrationsraten bis etwa 500 mm/a berechnet werden.

Im mittleren Teil der Triasplatte - an der Modelloberfläche aufgebaut aus den Einheiten T2/361-362 des Oberen Buntsandstein - kann die gesamte vorgegebene Grundwasserneubildung in den Modelluntergrund infiltrieren (<100 mm/a). Die lokale Infiltration von 100-200 mm/a östlich des Hauptgrabens kann mit lokal geringeren Infiltrationen in T2-K2/361 erklärt werden. Ebenfalls in der NE-Randstörung (T7/381) und in den talwärtig anschließenden Mergelkeuper des Allertals (A9-K2/246) erfolgt Infiltration (meist <100 mm/a).

In den in die Triasplatte einspringenden Seitentälern (Hauptgraben, Tälchen südlich und nördlich von Schwanefeld) finden Exfiltrationen statt, stellenweise bis 1000 mm/a und mehr (Abbildung 76).

Lokale Systeme (erhöhte, nahe beieinanderliegende In- und Exfiltrationen) sind stellenweise in der Sollingfolge T3/363 zu beobachten. Diese lokalen Systeme dürften auf die in Kap. 5.4.2 angeführten methodologischen Schwierigkeiten bei der Flußberechnung mit FED zurückgehen und wirken sich, wie die Werte von Tabelle 19 zeigen, nur wenig auf die Gesamtbilanz aus.

#### 6.5.2.2 Allertal

Im Allertal konzentrieren sich die Infiltrationsgebiete auf leicht erhöhte, meist nicht direkt an die Aller angrenzende Gebiete entlang der NE-Randstörung (südliche Modellhälfte), vor allem aber im Übergangsbereich Lappwald/Allertal, in dem einerseits aus dem Lappwald in der 2D Verteilschicht abfließendes Wasser zur Infiltration zur Verfügung steht, andererseits die gut durchlässigen oberflächennahen Schichten (Quartär, Oberkreide) eine größere Mächtigkeit aufweisen. Die Infiltrationen sind meist geringer als 100 mm/a; am Übergang der Schichten des Lappwaldes und der SW-Randstörung in die Lockergesteine des Allertals werden Werte bis 500 mm/a (lokal mehr) berechnet. Aus dem Fixpotential entlang der Aller erfolgt im südlichsten Teil des Modells entlang eines ca. 1 km langen Abschnittes Infiltration (bis 600 mm/a).

Das Allertal ist neben den Einschnitten in die Triasplatte das wichtigste Exfiltrationsgebiet. Dabei erfolgen, wie Abbildung 76 zeigt, die Exfiltrationen entlang der Aller sowie in Gebieten entlang des Salzbaches, Mühlengrabens und des Rhötegrabens. Die Exfiltrationsraten in den angeführten Gebieten weisen mittlere Werte auf (bis 400 mm/a). Die wichtigsten Exfiltrationen im Allertal finden nahe des nördlichen Modellrandes in der Allerniederung südöstlich von Walbeck statt („Bad“). Die letztgenannten Exfiltrationen, die ähnliche Werte wie jene der Seitentäler der Triasplatte aufweisen (bis 1000 mm/a), werden hauptsächlich aus dem Aquifer L5-K2/144 des Lappwaldes gespeist.

#### 6.5.2.3 Lappwald

Infiltrationsgebiete bis 100 mm/a nehmen große Teile des Lappwaldes ein (Abbildung 75). Zonen mit erhöhten Infiltrationen sind meistens an die Übergangszone von einem Aquitard in einen hangabwärts angrenzenden Aquifer gebunden: Das in den geringer durchlässigen Schichten nicht infiltrierte und in der 2D Verteilschicht abfließende Wasser kann beim Übergang in einen talwärts anschließenden Aquifer in den Untergrund infiltrieren. Dies ist z.B. ausgeprägt am Übergang von L2/132 in den talwärts anschließenden Mittelrhät-Sandstein L3/142 zu beobachten (vgl. Abbildung 22), weniger ausgeprägt am Übergang L4/143 in das Unterrhät L5/144-145 sowie – wie weiter oben erwähnt – am Übergang zwischen den Festgesteinen des Lappwaldes und der SW-Randstörung in die Lockergesteine des Allertals. Die berechneten Infiltrationsraten in diesen Übergangszonen betragen meist 100 bis 300 mm/a, in der erstgenannten Zone bis 500 mm/a.

Im Lappwald kommen jedoch auch zwei Zonen vor, in denen höhere Infiltrationsraten berechnet werden: Einerseits erfolgt im Talgrund des Brunnentals bei Bad Helmstedt in einem kleinen Gebiet eine erhöhte Infiltration (bis 1000 mm/a); nahe des westlichen Modellrandes sind in einem weiteren kleinflächigen Gebiet Infiltrationen bis 1000 mm/a berechnet worden. Die erhöhten Infiltrationsraten werden mit zwei Umständen in Zusammenhang gebracht: Beide Gebiete liegen am Fuß eines aus gering durchlässigen Einheiten (L4/143 bzw. L2/132) aufgebauten Hangab-



schnittes, wo der strukturelle Aufbau (lokales Vorkommen von L3/142 am Modell-Westrand bzw. geometrisch bedingte erhöhte Transmissivität entlang der Brunnen-talstörung) die Infiltration in den Untergrund erleichtert.

Exfiltrationen an der Geländeoberfläche erfolgen im Lappwald einerseits in der Tal-sole des Brunnentals bei Bad Helmstedt und westlich Beendorf (Abbildung 65, Abbildung 76) sowie in weiteren in das Allertal mündenden Rinnen und Tälchen, am ausgeprägtesten im Tälchen westlich Morsleben (Störung, vgl. Abbildung 22), nahe des nördlichen Modellrandes im Seitentälchen zum Bach „Riole“ sowie ein Austritt nahe der Talsole des Allertals (aus dem am tiefsten liegenden Vorkommen von L5-K2/144 an der Modelloberfläche, vgl. Abbildung 22). Wie in Kap. 6.5.2.2 erwähnt, sind ebenfalls die starken Exfiltrationen in der Talsole des Allertals 1 km südlich des Modellrandes als Abflüsse aus dem Lappwald zu betrachten.

### 6.5.3 Auswirkung der Grundwasserentnahme im Rechenfall R43

Die auf das Wegfallen der Grundwasserentnahme im Brunnen-tal zurückzuführenden Änderungen beschränken sich auf die Umgebung des Brunnen-tals und die Ausbißfläche von L5-K2/144 im nördlichen Lappwald (Abbildung 22).

Die Grundwasserentnahmen in R43 bewirkt gegenüber R44 folgendes:

- Die rechnerische Absenkung des Grundwasserspiegels im Einzugsbereich der Entnahmebrunnen im Brunnen-tal erreicht bis 30 m (Tabelle 16), wobei die Meßwerte befriedigend reproduziert werden.
- Durch die Absenkung des Potentials in den Aquiferen wird die Infiltration an der Oberfläche verstärkt und weniger Wasser verbleibt in der 2D Verteilschicht. Die Infiltration am Übergang L2/132 in L3/142 ist daher in R43 geringer als in R44.
- Die für den Rechenfall R43 beschriebenen Exfiltrationsgebiete im Brunnen-tal (Gebiet von Bad Helmstedt) sind in R42 von geringerer Bedeutung. In der Ausbißfläche von L5-K2/144 im nördlichen Lappwald erfolgt in R43 keine Exfiltration.
- Die Umgebung der Entnahmebrunnen zeigt in R43 zwei typische Fälle:
  - (a) Exfiltrationen aus dem Modelluntergrund in die 2D Verteilschicht bestehen in R43 (Abbildung 61) am Ort der Brunnen Quellenhof und Waldfrieden Br. II. Dabei handelt es sich um modellbedingte Wasseraustritte aus dem Modelluntergrund in den markanten Absenkungstrichtern der erwähnten Brunnen (Abbildung 50) in die 2D Verteilschicht. Das exfiltrierende Wasser wird anschließend in den Entnahmeknoten an der Modelloberfläche entnommen.
  - (b) Bei Brunnen, die einen weniger ausgeprägten Absenkungstrichter aufweisen (Halbmeilenberg, Adam & Eva, Burgberg sowie Brunnen 8) ermöglicht der Absenkungstrichter ein radiales Sammeln der GWN und erhöhte Infiltrationen in der Brunnumgebung aus der 2D Verteilschicht (Abbildung 60).

Der Vergleich der bilanzierten Flüsse zeigt in R43 eine Gesamtin- bzw. Exfiltration von rund 164,7 l/s, in R44 von rund 153,3 l/s. Der Unterschied von 11,4 l/s rührt vom

Wegfallen des Randzuflusses Lappwald (8,5 l/s) und von der im Brunnental um 3,6 l/s geringeren vorgegebenen Grundwasserneubildung her.

Bei der „Tiefensickerung“ - im Kontext der Modellrechnungen die In- und Exfiltrationen aus dem aus 3D Elementen aufgebauten Modelluntergrund unterhalb der 2D Verteilschicht - nimmt der Mittelwert der In- bzw. Exfiltrationen von 89,4 l/s in R43 auf 72,8 l/s in R44 ab (vgl. Tabelle 19). Die „Tiefensickerung“ ist in R44 damit etwa 16,6 l/s geringer als in R43. Die Verringerung der Tiefensickerung in R44 dürfte mit dem Wegfallen der Grundwasserentnahme Brunnental zusammenhängen: In R43 hatte die mit der Grundwasserentnahme zusammenhängende Absenkung eine verstärkte Speisung der Aquifere L1/131, L3/142 und L5/144-145 durch Leckage und direkte Infiltrationen an der Modelloberfläche (2D Verteilschicht in Aquitarden) zur Folge.

Die Verringerung der Tiefensickerung in R44 ist auch von einer Verkleinerung des Anteils der Tiefensickerung am Gesamtumsatz begleitet. Dieser sinkt von 54,3% in R43 auf 47,5% in R44 ab (Allerdings können die Werte der berechneten Tiefensickerung aus den in Kap. 5.4.2 erwähnten methodologischen Gründen fehlerbehaftet sein.)

Die Unterschiede in den Bilanzen „Gesamtumsatz“ und „Tiefensickerung“ sind damit hydrogeologisch nachvollziehbar.

## **6.6 Trajektorienrechnungen**

### **6.6.1 Startpunkte, Rechenprogramm**

Zur Berechnung potentieller Ausbreitungswege von Radionukliden aus dem Endlager Morsleben durch das Deckgebirge werden 5 m über der Basis des Hutgesteins (-135 mNN) in einem regelmäßigen Rastergitter 30 x 40 m 8476 Partikel gestartet (Abbildung 77).

Die Trajektorienrechnungen werden im stationären Süßwasserfließfeld des Rechenfalls R44 mit dem Programm TRACK\_171198 durchgeführt.

Das Programm TRACK berechnet Trajektorien und Fließzeiten entlang Stromlinien in einem stationären, gesättigten, dreidimensionalen Grundwasserträger. Grundlage ist eine stationäre Süßwasserrechnung, die in demselben Grundwassersystem die Potentialverteilung mit der Methode der finiten Elemente bestimmt.

Für die Berechnung der Trajektorien wurde ein Konzept gewählt, in welchem die konservative Philosophie des schnellsten Weges verfolgt wird. Nach demselben Konzept werden auch Schwierigkeiten behandelt, die sich bei stark kontrastierenden Elementübergängen ("Sprünge" in der Durchlässigkeit) ergeben.

Im stationären Fall sind Trajektorien entlang Fließwegen identisch den Stromlinien. Stromlinien sind allgemein definiert durch das Tangentialfeld an das Geschwindigkeitsfeld zu einem gegebenen Zeitpunkt. Bei Stationarität ist die Geschwindigkeit unabhängig von der Zeit  $t$ .

Für die Fließpfade sind gesucht:

- die Fließpfade, beginnend bei den Startpunkten
- die Fließzeiten
- die lokalen und mittleren Fließgeschwindigkeiten
- sowie die Gründe für einen eventuellen Berechnungsabbruch

Treten die Trajektorien normal aus dem Modell aus, so wird die Meldung „Track left region normally“ angezeigt.

An Elementrändern können jedoch Schwierigkeiten auftreten: Wegen der Unstetigkeit des Geschwindigkeitsfeldes am Elementrand entstehen vornehmlich bei starken Kontrasten der Durchlässigkeit entgegengesetzt gerichtete Geschwindigkeitsvektoren, so daß kein Element die Trajektorie "akzeptiert". Fährt man in diesem Fall mit der größten Geschwindigkeit weiter, wird der nächste Integrationsschritt wieder zurückgeführt, so daß auf dem Rand eine Zickzack-Linie entsteht. In manchen Fällen findet die Trajektorie nicht mehr weg; sie oszilliert, die Abbruchmeldung „Track oscillating“ erscheint. Der Grund für den Abbruch kann auch bedingt sein durch Potentialmulden, die z.B. auf eine ungenügend feine Diskretisierung zurückzuführen sind. In diesem Fall wird die Berechnung mit der Meldung „Track concentrates in small region“ abgebrochen. Der Abbruch erfolgt einige Zeitschritte nach Beginn der Oszillation; die Auswirkungen des oszillierenden Fließwegabschnittes auf die Pfadlänge und die Fließzeit beschränkt sich auf einige Meter bis Dekameter und eine Zeitdauer von wenigen 100 Jahren.

### 6.6.2 Statistik der Trajektorien

Die Statistik über die Meldungen beim Abbruch der Berechnung der einzelnen Partikelpfade zeigt, daß rund 1/3 der gestarteten Trajektorien bereits im ersten Rechendurchgang normal an die Modelloberfläche gelangen. Etwa 2/3 wurden aus numerischen Gründen noch innerhalb des Modells abgebrochen; diese Trajektorien sind jedoch mit Neustarts (mit einem neuen Startpunkt 10 m vom vorherigen Endpunkt) so weit geführt worden, daß sie zu einem großen Teil nahe der Modelloberfläche enden. 986 aus numerischen Gründen abgebrochene Trajektorien, die eine geringe bzw. eine sehr große Partikelpfadlänge aufweisen (<200 m, bei einer Vertikaldistanz Hutgesteinsbasis bis Modelloberfläche von 250 m bzw. >4000 m) oder im Hutgestein abbrechen, wurden eliminiert, so daß für die Auswertung und Darstellung noch 7490 Trajektorien zur Verfügung stehen.

Von den in der Auswertung berücksichtigten Fließpfaden enden etwa 50% normal an der Modelloberfläche. Wie die nachstehende Aufstellung zeigt, sind die mittleren Fließzeiten der abgebrochenen Trajektorien kürzer, die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten größer als jene der Trajektorien, die normal aus dem Modell austreten. Die Werte der abgebrochenen Trajektorien sind damit konservativ in Bezug auf Fließzeit und Fließgeschwindigkeit und werden bei der Darstellung der Ergebnisse der Trajektorienrechnungen mitberücksichtigt.

Anteil Trajektorien %	mittlere Länge m	mittlere Fließzeit a	mittlere Abstandsgeschwindigkeit m/s	Meldung
50,8	891	201'689	0,00545	Track left region normally
32,9	769	150'100	0,00581	Track concentrates within small region
16,3	917	139'541	0,00636	Track oscillating

### 6.6.2.1 Geometrie der Partikelpfade

Die Geometrie der berechneten Partikelpfade beruht auf der Simulation der Grundwasserströmung unter den Süßwasserbedingungen des Rechenfalls R44. Im wirklichen Fließfeld im salzwasserführenden Grundwasser sind abweichende Partikelpfade zu erwarten. Neben der Charakterisierung des Verlaufs der Partikelpfade ab der Basis des Hutgesteins unter Süßwasserverhältnissen sollen die Trajektorienrechnungen auch dazu dienen, in Verbindung mit den 2D Salzwasserrechnungen die Auswirkungen des Dichteeinflusses auf die Partikelpfade zu zeigen.

Abbildung 78 stellt in einer Horizontalprojektion die Verläufe aller in der Auswertung berücksichtigten 7490 Partikelpfade zwischen dem Startpunkt an der Deckgebirgsbasis und ihrem Endpunkt dar<sup>(3)</sup>.

Über 95% der Trajektorien enden im Potentialminimum entlang der Aller. Die Aller und ihre Umgebung stellt unter Süßwasserbedingungen die dominierende Exfiltrationszone für aus dem Hutgestein aufsteigendes Grundwasser dar. Diese Charakteristik der Partikelpfade reflektiert den in Kap. 6.3.2.3 beschriebenen Einfluß der Position der Aller auf das Potentialfeld im Allertal und ist in den Vertikalprojektionen der Partikelpfade in die Ebene der Modellschnitte 1 bis 7 (Abbildung 79) gut nachvollziehbar. Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen auch, daß im Süßwasserfließfeld in ihrem gesamten Verbreitungsgebiet (südlicher Teil des Modellgebietes, Schnitte 3 bis 7) praktisch keine Trajektorien in der Schichtenfolge DGL verlaufen. Die Dominanz der Aller als Endpunkt der Trajektorien nimmt im nördlichen Teil des Modellgebietes etwas ab. Dort kommen – infolge der geringeren Mächtigkeit des Hutgesteins und eines relativ niedrigen Oberflächenpotentials - ebenfalls Aufstiegswege durch den Oberkreidetrog vor (Abbildung 79, Schnitte 3, 2 und insbesondere 1).

In den meisten Partikelpfaden dominierend ist der Verlauf im Hutgestein (Abbildung 78, Abbildung 79). Im Hutgestein verlaufen die Trajektorien flach bis ungefähr unter die Zone mit einem geringen Oberflächenpotential (entlang der Aller, entlang des Lappwaldes). Der Aufstieg durch das Hutgestein in das darüberliegende Deckgebirge ist meist steil.

Entlang der Aufstiegswege durch das Deckgebirge sind horizontale Partikelpfadabschnitte von meist geringer Ausdehnung. Dabei werden südlich des Hochwertes <sup>57</sup>90 - in dem die Aller im Zentrum des Allertals verläuft - Jura, Kreidesedimente und Quartär durchquert. Nördlich des Hochwertes <sup>57</sup>90 erfolgt der Aufstieg durch Keuperschichten zu der entlang der Triasplatte verlaufenden Aller (Schnitte 4 bis 2) bzw. zur Talmitte (Schnitt 1).

<sup>3</sup> Bei der Interpretation von Abbildung 78 ist zu beachten, daß in der Abbildung Partikelpfade mit höherer Ordnungsnummer jene mit niedrigerer Nummer überlagern. Bei in der x-y-Ebene identischen Trajektorienverläufen ist auf der Grafik nur der Verlauf des zuletzt gedruckten Partikelpfades sichtbar. So werden z.B. entlang der Aller südlich des Hochwertes <sup>57</sup>90 teilweise Partikelverläufe in den Deckschichten von Verläufen im Hutgestein überdeckt.

Die Trajektorien mit Startpunkten nahe des Lappwaldes, wo das Hutgestein nur eine geringe Mächtigkeit aufweist, gelangen teilweise in den überliegenden Schilfsandstein (Abbildung 79, Schnitt 5), in die SW Randstörung und/oder in den Oberkreidetrog (Schnitte 1 bis 3, 5).

Die meisten Verläufe erfolgen quer zum Allertal. Verläufe mit einem stärkeren Anteil in Talrichtung sind auf den nördlichsten Modellabschnitt beschränkt.

Die Position der Austrittspunkte der Trajektorien an der Modelloberfläche geht auch aus der - auf den Startpunkt bezogenen - Darstellung der hydrogeologischen Modelleinheit (K-Klasse) der Partikelpfadenden hervor (Abbildung 80). Da die Trajektorien größtenteils entlang der Aller die Modelloberfläche erreichen, reflektiert die Verteilung der Austrittseinheiten der Abbildung 80 den hydrostratigraphischen Aufbau entlang der Aller. Südlich des Hochwerts <sup>57</sup>90 mit einem zentralen Verlauf der Aller, enden die Trajektorien zu einem großen Teil im Quartär. Jedoch sind in diesem Gebiet auch Endpunkte in der Oberkreide verbreitet, da im fraglichen Gebiet sich der z.T. untiefe östliche Ast der Oberkreidetrog in der Nähe der Aller befindet. Die starke Zunahme nördlich von Hochwert <sup>57</sup>90 von Partikelpfadendpunkten im Keuper hängt mit der Verlagerung des Allerlaufs an den östlichen Rand der Talsohle, in dem im Untergrund bis an die Grundwasseroberfläche Keupersedimente dominieren, zusammen.

Die nachstehende Klassierung der Trajektorienendpunkte zeigt, daß über 95% der im Hutgestein über der Modellbasis beginnenden Partikelpfade in einem der Lokergesteinsaquifere des Allertals (Quartär, Tertiär, Oberkreide) oder im Keuper des Allertals enden.

Endpunkte der Partikelpfade / Klassierung nach Einheiten / K-Klassen Einheit/ K-Klasse	Track			Total	Einheiten
	left region normally	concentrates in small region	oscillating		
A1-A4/210, t./211	41,6%	20,9%	13,8%	76,3%	Quartär, Tertiär
A6/222, A7/223	1,2%	6,9%	1,6%	9,7%	Oberkreide
A8-K1/233	0,4%	1,7%	0,0%	2,1%	Jura
A9-K2/246,	7,6%	2,5%	0,6%	10,7%	Keuper
A10/247, A11/248					
A13-K1/271,272	0,0%	0,8%	0,3%	1,1%	Hutgestein (Hochzonen)
L6/146	0,0 %	0,1 %	0,0 %	0,1%	Steinmkergelkeuper, Übergang Lappwald/A lleral
Total	50,8%	32,9%	16,3%	100,0%	

### 6.6.2.2 Partikelpfadlänge, mittlere Abstandsgeschwindigkeiten und Fließzeiten

Aus den für die Auswertung verwendeten 7490 Partikelpfaden sind die in Abbildung 81 bis Abbildung 83 enthaltenen Darstellungen der Partikelpfadlänge, der mittleren Abstandsgeschwindigkeit und der Fließzeit interpoliert worden.

Südlich des Hochwerts <sup>57</sup>90 verläuft die Aller in der Mitte der Talsohle. Abbildung 78 und Abbildung 81 lassen erkennen, daß dies eine Verkürzung der horizontalen Anteile der Partikelpfade zur Folge hat. Im südlichen Allertal überwiegen Partikelpfadlängen kleiner als 1000 m. Im Deckgebirge direkt unter der Aller existieren Partikelpfadlängen kleiner als 500 m.

Nördlich des Hochwerts <sup>57</sup>90 werden zum Erreichen des an den Übergang Allertal / Weferlinger Triasplatte verlagerten Potentialminimums der Aller für im Südwesten des Allertals gestartete Partikel maximale Partikelpfadlängen von bis gegen 2000 m

erreicht (Abbildung 81). Dies gilt allerdings nicht für zwei Gruppen von Startpunkten am Fuß des Lappwalds auf der Höhe von Schnitt 1 bzw. Schnitt 3, die direkt aufsteigen. Für die weiter östlich gelegenen Startpunkt nimmt die Partikelpfadlänge sukzessive bis auf unter 500 m für die Startpunkte nahe der NE Verbreitungsgrenze des Hutgesteins ab. Bei den Partikelpfaden nördlich des Hochwerts <sup>57</sup>90 verläuft der letzte Teil des Partikelpfades nach Austritt aus dem Hutgestein in der Oberkreide und teilweise im Quartär.

Die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten und die Fließzeiten ab Basis Hutgestein sind in Abbildung 82 und Abbildung 83 am Startpunkt des Partikelpfades farbkodiert wiedergegeben.

Die in Abbildung 82 dargestellten mittleren Abstandsgeschwindigkeiten entlang der berechneten Partikelpfade weisen mit wenigen kleinräumigen Ausnahmen einen Wertebereich von kleiner 0,01 m/a auf.

Isolierte Gebiete von Startpunkten für Partikelpfade mit größeren mittleren Abstandsgeschwindigkeiten bis 0,017 m/a befinden sich im mittleren Bereich des Allertals und nahe des nördlichen Modellrandes. Abbildung 83 zeigt, daß die Partikelpfade in den erwähnten Zonen relativ geringe Fließzeiten aufweisen. Die fraglichen Gebiete befinden sich im Gebiet der Einmündung des Mühlengrabens (Brunnental) bzw. des Hauptgrabens in die Aller sowie nördlich von Schnitt 1 in Gebieten, in denen die Partikelpfade über eine anteilmäßig große Strecke in der relativ gut durchlässigen Einheit A9-K2/246 verlaufen.

Andererseits werden westlich von Schwanefeld geringe mittlere Abstandsgeschwindigkeiten (weniger als 0,004 m/a) und lange Fließzeiten berechnet. Es handelt sich um ein Gebiet, in dem die Partikelpfade über längere Strecken im gering durchlässigen oberen Gipskeuper A10/247 verlaufen (Abbildung 79, Schnitt 1).

Die Verteilung der Fließzeiten (Abbildung 83) ist jener der mittleren Abstandsgeschwindigkeiten ähnlich. Es läßt sich folgende Zonierung der Fließzeiten erkennen:

- Die Zonen der Fließzeitintervalle verlaufen parallel zur Aller: Die geringsten Fließzeiten (10'000 bis 100'000 Jahre) weisen Trajektorien mit Startpunkten in der Nähe der Aller auf; für die weiter von der Aller entfernt liegenden Startpunkte werden Fließzeiten zwischen 100'000 und über 300'000 Jahren berechnet. Noch längere Fließzeiten (300'000 bis 1'000'000 Jahre) werden in einem SW-NE verlaufenden Gebietstreifen westlich von Schwanefeld berechnet.
- In Gebieten geringer Ausdehnung entlang des Lappwaldes, vor allem jedoch in drei Abschnitten, in denen die Aller entlang der Weferlinger Triasplatte verläuft, werden Fließzeiten unter 50'000 Jahren berechnet, die sich etwa zu 2/5 auf Fließzeiten zwischen 10'000 und 30'000 Jahren und zu 3/5 auf Fließzeiten zwischen 30'000 und 50'000 Jahren verteilen.

## 7 Schlußfolgerungen

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte Anwendung eines dreidimensionalen geowissenschaftlichen Informationssystems umfaßt eine Methodik, innerhalb derer aus einem umfangreichen, durch die BGR zur Verfügung gestellten Datensatz von Tiefenlinienplänen und Bohrungen, ein geometrisch komplexes dreidimensionales hydrogeologisches Modell entwickelt wird. Neuentwickelte Computerprogramme ermöglichen die Umformung des geometrischen Modells in eine äquivalente 3D Finite-Elemente-Diskretisierung (3D Süßwassermodell ERAM).

Mit dem Süßwassermodell wurden unter Verwendung von Potentialmeßwerten als Vergleichsbasis (180 Vergleichspunkte) die  $k_f$ -Werte der hydrostratigraphischen Einheiten des Modellgebiets, der Randzufluß im Lappwald und der T-Wert der zur Verteilung der vorgegebenen Grundwasserneubildung eingefügten 2D Modellschicht entlang der Modelloberfläche kalibriert.

Zu Beginn der Kalibrierungsrechnungen R42 betrug die mittlere Abweichung zwischen Meß- und Rechenwerten in den 180 Vergleichspunkten rund 2,95 m. In den Kalibrierungsrechnungen konnte eine Verringerung der mittleren Abweichung Meß-/Rechenwerte auf 1,77 m erreicht werden. In Anbetracht des komplexen Aufbaus des Modellgebietes und der in einzelnen Bereichen heterogenen Datenbasis kann dieses Ergebnis als befriedigend betrachtet werden.

Mit den kalibrierten Parameterwerten der oben angeführten Variablen wurden zwei Rechenfälle gerechnet. Der Rechenfall R43 bildet die heutigen hydrogeologischen Verhältnisse mit Grundwasserentnahmen im Brunntal nach, wobei - abweichend vom gegenwärtigen Zustand - die beiden Schachtanlagen Bartensleben und Marie im Modell hydraulisch inaktiv sind. Der Referenzfall R44 soll die hydrogeologischen Verhältnisse nachbilden, wie sie sich nach dem Verschuß des Endlagers darstellen werden: Ohne Grundwasserentnahme im Brunntal und dem damit zusammenhängenden Randzufluß im Lappwald und mit ebenfalls inaktiven Schachtanlagen Bartensleben und Marie.

Die Modellrechnungen erlauben folgende Charakterisierung der Hydrogeologie des Modellgebietes:

Das berechnete Potentialfeld beider Rechenfälle R43 und R44 weist im Umfeld der Aller, dem Hauptvorfluter, minimale Potentiale auf. Unterhalb der Aller besteht ein vorwiegend vertikal aufwärts gerichteter Potentialgradient. Seitlich dieses Gebietes zeigen vertikale Isopotentialflächen für das Allertal einen horizontalen, beidseitig zur Aller gerichteten Grundwassergradienten an. In den Aquiferen der Oberkreide und des Quartär kommen lokal auch Fließkomponenten in der Talrichtung vor.

Die Grundwassergradienten im Gebiet der Weferlinger Triasplatte mit relativ höheren Potentialen zeichnen sich durch eine vorwiegend horizontale Ausrichtung auf das Allertal aus. Lokale Abweichungen von dieser Charakterisierung mit tendenziell vertikalen Fließrichtungen sind durch die jeweilige topographische und hydrogeologische Situation bestimmt. Das neugebildete Grundwasser wird durch den dominierenden Grundwasserleiter, die Sollingfolge, an die NE-Randstörung getragen, wo es durch die NE Randstörung in das Allertal austreten kann. Zum größeren Teil exfiltriert das Grundwasser der Triasplatte jedoch im Einschnitt des Hauptgrabens oder fließt in der nach Norden abfallend Sollingfolge nach Norden, wo es im Geländeeinschnitt von Schwanefeld an die Oberfläche austritt.

Aufgrund der relativ zum Allertal erhöhten Grundwasserpotentiale in der Lappwaldmulde strömt Grundwasser aus dem Lappwald ins Allertal ab.

Der Lappwald weist eine flach nach Norden einfallende Muldenstruktur auf, die aus einer Abfolge von Aquiferen und Aquitarden aufgebaut ist. Gegen das Allertal hin ist diese durch die gering durchlässige, aus Jura-Schollen aufgebaute SW Randstörung abgetrennt. Der Lappwald weist im Süden den Einschnitt des Tälchens westlich Morsleben, im Norden denjenigen des Brunntals auf. Bedingt durch eine mehrfache Wechsellagerung von Aquiferen und Aquitarden und die Grundwasserentnahme im Brunntal weist das Potentialfeld der Lappwaldmulde eine komplexe Charakteristik auf.

Infolge der nach Norden einfallenden Muldenstruktur, des tiefen Potentials des Allertals am Nordrand des Modellgebietes und des Einschnittes des Brunntals befinden sich die hauptsächlichsten Exfiltrationsgebiete im Brunntal und im nördlichen Allertal. Weitere Exfiltrationen erfolgen in der Rinne westlich von Morsleben. Die Grundwasserentnahme bewirkt im Rechenfall R43 eine Absenkung des Grundwasserspiegels in den Entnahmefunnen im Brunntal um bis 30 m und eine Ausweitung des Zuflußgebietes über den Modellrand Lappwald - die topographische Wasserscheide - hinaus. Ein Übertritt von Grundwasser aus dem Allertal in den Bereich Brunntal ist auszuschließen.

Das Gebiet des südlichen Modellteils (südlich von Schacht Marie) wird von der Grundwasserabsenkung im Brunntal nur noch marginal betroffen; die Unterschiede in der Potentialverteilung in diesem Gebiet zwischen den beiden Rechenfällen R43 und R44 - mit und ohne Grundwasserentnahme im Brunntal - sind gering.

Die Grundwasserinfiltration bzw. -exfiltration und damit auch der Gesamtbetrag der über die Modelloberfläche ausgetauschten Wassermenge, die sich als Konsequenz der an der Modelloberfläche vorgegebenen Grundwasserneubildung, des Fixpotentials entlang der Aller, vorgegebener Zu- und Abflüsse über den südlichen und nördlichen Modellrand in Quartär und Oberkreide des Allertals und der nur für den Rechenfall R43 gültigen Randbedingungen einer Brunnenentnahme im Brunntal sowie eines Randzuflusses im Lappwald in der Simulation der beiden Rechenfälle ergibt, stimmen gut mit den Vorgaben überein. Die Verteilung und Beträge der In- und Exfiltration in und aus dem eigentlichen 3D Modelluntergrund ergibt etwas größere Bilanzierungsunterschiede, erlaubt jedoch die Visualisierung der geographischen Verteilung der In- und Exfiltrationen in den Modelluntergrund und – als Auswirkung der den Zwischenabfluß simulierenden 2D Verteilschicht – ihre Verschiebung gegenüber dem Raster der vorgegebenen Grundwasserneubildung.

Die zur Berechnung potentieller Ausbreitungswege von Radionukliden aus dem Endlager Morsleben durch das Deckgebirge ausgeführten Trajektorienrechnungen mit 8476 Startpunkten 5 m über der Basis des Hutgesteins zeigen, daß die Fließwege im Hutgestein ungefähr horizontal bis zu den Potentialminima der Aller (rund 95% der Trajektorien) und der Oberkreide/Jura entlang des Lappwaldes (rund 5% der Trajektorien) verlaufen und dort durch die Deckschichten zur Oberfläche (Exfiltrationszonen) aufsteigen.

Die Partikelpfadlängen betragen bis 500 m für die Startpunkte oberhalb der Potentialminima und nehmen im Gebiet südlich des Hochwertes <sup>57</sup>90 bis zu den Startpunkten entlang des Lappwaldes und der Weferlinger Triasplatte auf 1000 m zu. Im Gebiet nördlich von Hochwert <sup>57</sup>90, in dem die Aller entlang der Weferlinger



Triasplatte verläuft, nehmen die Partikelpfadlängen gegen SW bis zu den entlang des Lappwaldes gelegenen Startpunkten auf rund 2000 m zu.

Die mittleren Abstandsgeschwindigkeiten entlang der berechneten Partikelpfade weisen mit wenigen kleinräumigen Ausnahmen einen Wertebereich von kleiner 0,01 m/a auf. Isolierte Gebiete von Startpunkten für Partikelpfade mit größeren mittleren Abstandsgeschwindigkeiten bis 0,017 m/a befinden sich im mittleren Bereich des Allertals und nahe des nördlichen Modellrandes.

Die Verteilung der Fließzeiten ist jener der mittleren Abstandsgeschwindigkeiten ähnlich. Es läßt sich eine Zonierung der Fließzeiten parallel zur Aller erkennen: die geringsten Fließzeiten (10'000 bis 100'000 Jahre) weisen Trajektorien mit Startpunkten in der Nähe der Aller auf; für die weiter von der Aller entfernt liegenden Startpunkte werden Fließzeiten zwischen 100'000 und über 300'000 Jahren berechnet. Noch längere Fließzeiten (300'000 bis 1'000'000 Jahre) werden in einem SW-NE verlaufenden Gebietstreifen westlich von Schwanefeld berechnet.

In Gebieten geringer Ausdehnung entlang des Lappwaldes und vor allem in drei Abschnitten, in denen die Aller entlang der Weferlinger Triasplatte verläuft, werden Fließzeiten unter 50'000 Jahren berechnet, die sich etwa zu 2/5 auf Fließzeiten zwischen 10'000 und 30'000 Jahren und zu 3/5 auf Fließzeiten zwischen 30'000 und 50'000 Jahren verteilen.

Durch die Mitberücksichtigung der in der Nähe der Modelloberfläche oszillierenden Fließpfade resultieren in den Trajektorienrechnungen insgesamt zu geringe Fließpfadlängen und Fließzeiten. Die dargestellten Resultate der Trajektorienrechnungen sind daher in ihrer Tendenz eher als konservativ zu bewerten.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Renger, O., Wessolek, G., König, R., Fahrenhorst, C., Swartjes, F. & Kashanian, B. (1990): Modelle zur Ermittlung und Bewertung von Wasserhaushalt, Stoffdynamik und Schadstoffbelastbarkeit in Abhängigkeit von Klima, Bodeneigenschaften und Nutzung. – Endbericht zum BMFT-Projekt 0374343, Univ. Berlin, Inst. f. Ökol., FB Bodenkunde, Berlin
- [2] Demuth, S. (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, 1, Freiburg i.Br.
- [3] Houlding, S. W. (1995): 3D Geoscience Modelling - Computer Techniques for Geological Characterization, Springer
- [4] Shewchuk, J.R. (1996): Triangle - Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. – In: Applied Computational Geometry - Towards Geometric Engineering, edited by Lin, M.C. and Manocha, D., Lecture Notes in Computer Science, vol. 1148, Springer
- [5] DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. – Merkblatt z. Wasserwirtschaft, 238, Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft)
- [6] BfG (1997): Hydrologisches Untersuchungsprogramm Morsleben – Wasserhaushaltsbericht 1995. – Projekt 9M, PSP Element 21620010, Koblenz
- [7] GFE (1997): Ermittlung der boden- und nutzungsspezifischen Jahreswerte der Grundwasserneubildung im Raum des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. – Gutachten erstellt im Auftrag des BfS, Halle
- [8] Langkutsch, U., Käbel, H., Ostin, A & Schwamm, G. (1997): Projekt Morsleben, Hydrogeologische Modellbildung. - Archiv-Nr. 116079, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover
- [9] Ziermann, H., Hederich, N. & Zwirner, R. (1998): Projekt Morsleben, Geologische Bearbeitung des Quartärs. – Archiv-Nr. 116619, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- [10] Lotsch, D. (1998): Projekt Morsleben, Geologische Bearbeitung von Kreide und Tertiär. - Archiv-Nr. 116620, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover
- [11] Balzer (1998): Projekt Morsleben, Geologische Bearbeitung des Hutgesteins. – Archiv-Nr. 116622, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover
- [12] 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
- [13] Martin, P.J. & Frind, E.O. (1998): Modeling a Complex Multi-Aquifer System: The Waterloo Moraine. – Ground Water, Vol. 36, No. 4, 679-690
- [14] Kloska, M. (1998): ERA Morsleben. Neuauswertung von Testdaten aus dem Erkundungsprogramm 1988–90. – Abschlußbericht. Erstellt im Auftrag des BfS, Braunschweig
- [15] Genter, M. & Siegel, P. (2001): Programm FSCGM zur Berechnung der transienten Grundwasserströmung mit freier Oberfläche. - CPE-Bericht 1971/5, Colenco Power Engineering, Baden/Schweiz

## 9 Tabellen

ERA  
ERA  
Morsleben  
Morsleben

Entnahmebrunnen	Koordinaten		GOK mNN	Bohrung Stratigraphie / Modelleinheit		Filterstrecke Teufe und Entnahmeniveau nach Tabelle 3.5 und 5.13 in [12]		Stratigraphie		Entnahme 1992-96 (1) [12], Tabelle 4.10 m <sup>3</sup> /a; l/s
	x	y		nach Tabelle 5.11b in [12]	nach Tabelle 5.13 in [12]	m u.GOK	mNN	nach Tabelle 3.5 in [12]	nach Tabelle 5.13 in [12]	
<b>Burgberg</b> Hy Hmt Bu	5789408	4435972	147,0	120,5 – 190,8: ko(3a) / L3	L1: 1,2 - 55,1 L2: 55,1 - 120,5	46 – 185	101 - -38	ko(2/3), juhe = <b>L1, L2, L3</b>	juhel-ko(3a) = <b>L1, L2, L3</b>	89 742; 2,846
<b>Quellenhof</b> Hy Hmt Quh	5789866	4435545	151,0		L1: 2,0 - 116,4 L2: 116,4 - >119,0	76 – 116	75 – 35	juhel = <b>L1</b>	juhe(o), juhel = <b>L1</b>	198 046; 6,280
<b>Waldfrieden Br. II</b> Hy Hmt WA II	5789268	4435738	145,6		L1: 0 - 64,0 L2: 64,0 - >151,0	54 – 80 ([12], Tab.5.13) 54 – 68 78 – 80	92 – 78 68 – 66	juhel juhel = <b>L1, L2</b>	juhe(o), juhel = <b>L1, L2</b>	154 768; 4,908
<b>Adam &amp; Eva</b> Hy Hmt A+E	5788651	4435605	164,1		L1: 5,0 - 85,0 L2 85,0 - >90,0	32 – 38 76 – 84	132 – 126 88 – 80	jusi, juhe juhe = <b>L1, (L2)</b>	juhe(o) juheol = <b>L1</b>	53 204; 1,687
<b>Clarabad Br. II</b> Hy Hmt CI II	5789479	4436514	139,7	1,5 - 181: ko(3a) - ko(1)6 / L3, L4, L5		51 – 176	89 - -36	ko(2b), ko(1)6 = <b>L3, L4, L5</b>		385 862; 12,236
<b>Halbmeilenberg</b> Hy Hmt Ha/	5791084	4434824	165,6		L1: 0 - 62,0 L2: 62,0 - >88,0	31 – 77	135 – 89	juheu-o = <b>L1, L2</b>	juhe(o), juhel, juhe(u) = <b>L1, L2</b>	46 468; 1,473
<b>Brunnen 8</b> Hy Beo 1b	5789861	4437578	158,8			53,4 - 59,4 67 – 94	105 – 100 92 – 65	ko(1)? (2) ko(1)? (2) = <b>(L4), L5</b> bzw. ko(2b)-ko(3c) = <b>L3 (3)</b>		58 575; 1,857
										<b>986 664; 31,287</b>

(1) Für Hy Beo 1b – Brunnen 8 Mittelwert aus den Entnahmen 1993-1996

(2) Tabelle 3.5 in [12]

(3) Kap. 5.2.10 in [12] (Text)

#### Bemerkung

Die Brunnen Harkling (Hy Hmt Hg) und Bröddel (Hy Hmt Brö) des Wasserwerkes Helmstedt befinden sich außerhalb des Modellgebietes

**Tabelle 1** Aktive Brunnen im Modellgebiet der Wasserwerke Helmstedt und Beendorf. Entnahmemengen und Entnahmehorizonte – Vorgaben

Entnahme- brunnen	Grundwasserentnahme, Vorgaben				Modellierung der Entnahme	
	Tiefe Filter- strecke	Entnahme- niveau	Einheit	Entnahme 1992-96	Einheit	Entnahmemenge
	m	mNN		m <sup>3</sup> /a; l/s		l/s; m <sup>3</sup> /a
<b>Überblick über Gesamtentnahme</b>						
Burgberg Hy Hmt Bu/-	46 – 185	101 - -38	L1, L2, L3	89'742; 2,846	L3/142 (L4/143)	2,846; 89'751
Quellenhof Hy Hmt Quh/-	76 – 116	75 – 35	L1	198'046; 6,280	L1/131	6,280; 198'046
Waldfrieden Br. II Hy Hmt WA II/73	54 – 68 78 – 80	92 - 78 68 – 66	L1, L2	154'768, 4,908	L1/131 (L2/132)	4,908; 154'779
Adam & Eva Hy Hmt A+E/-	32 – 38 76 – 84	132 – 126 88 – 80	L1	53'204, 1,687	L1/131 (L2/132)	1,687; 53'201
Clarabad Br. II Hy Hmt CLII/73	51 – 176 31 – 77	89 - -36	L3, L4, L5	385'862, 12,236	L3/142 L5-K2/144 (L4/143)	8,160; 257'334 4,076; 128'541
Halbmeilenberg Hy Hmt Ha/-	53,4 – 59,4 67 - 94	135 – 89	L1, L2	46'468, 1,473	L1/131	1,473; 46'453
Brunnen 8 Hy Beo 1b/82		105 – 100 92 – 65	L5/L3	58'575, 1,857	L6/146 (L3a/141) (L5-K1/145)	1,857; 58'562 (R42 Phase A)
					L3a/141 (L6/146) (L5-K1/145)	1,857; 58'562 (R42 Phase B, R43)
				<b>986664; 31,287</b>		<b>31,287; 986'667</b>
<b>Verteilung auf K-Klassen/Einheiten</b>						
Quellenhof, Waldfrieden Br. II, Adam & Eva, Halbmeilenberg					L1/131, (L2/132)	14,348
Burgberg, Clarabad Br. II					L3/142	11,006
Clarabad Br. II					L5-K2/144, (L4/143)	4,076
Hy Beo 1b – Brunnen 8					L6/146, (L3a/141), (L5-K1/145)	1,857 (R42 Phase A)
					L3a/141, (L6/146), (L5-K1/145)	1,857 (R42 Phase B, R43)
					Insgesamt	<b>31,287</b>

131 (132) = zumindest teilweise Entnahme in einem Knoten, der an zwei K-Klassen stößt. Ohne Klammern: stärker durchlässige Schicht, Hauptentnahme; in Klammern: geringer durchlässige Schicht, geringe Entnahme

Tabelle 2      Rechenfälle R42 und R43, Grundwasserentnahme im Brunntal. Vorgaben und Modellierung

Entnahmeknoten	K-Klasse / hydrostratigraphische Einheit	Entnahmeniveau mNN	ungefähre Tiefe unter GOK	R42, R43	
				l/s	m <sup>3</sup> /a
<b>Bu – Burgberg</b>				<b>2,846</b>	<b>89751</b>
322309	L3/142, L4/143(1)	-30,004	185,1	2,846	
<b>Quh – Quellenhof</b>				<b>6,280</b>	<b>198046</b>
305525	L1/131	101,037	75,5	0,4486	
305527	L1/131	124,926	30,7	0,4486	
305528	L1/131	123,5	32,3	0,4486	
305529	L1/131	122,074	34,7	0,4486	
305530	L1/131	122,66	38,2	0,4486	
305531	L1/131	123,246	38,6	0,4486	
305722	L1/131	122,545	38,7	0,4486	
305756	L1/131	126,129	27,1	0,4486	
305757	L1/131	124,101	28,1	0,4486	
305804	L1/131	122,946	33,4	0,4486	
305836	L1/131	123,846	26,8	0,4486	
305837	L1/131	122,96	28,1	0,4486	
306093	L1/131	122,51	34,5	0,4486	
306154	L1/131	122,309	39,1	0,4486	
<b>WA II – Waldfrieden Br. II</b>				<b>4,908</b>	<b>154779</b>
320627	L1/131	122,643	27,5	0,3775	
320629	L1/131	121,471	33,5	0,3775	
320652	L1/131, L2/132 (1)	92,81	83,5	0,3775	
320659	L1/131	122,05	28,2	0,3775	
320666	L1/131	105,43	64,6	0,3775	
320668	L1/131	120,123	30,8	0,3775	
320669	L1/131	121,086	29,6	0,3775	
320671	L1/131	121,234	29,5	0,3775	
320672	L1/131	120,678	30,3	0,3775	
320779	L1/131	121,383	29,8	0,3775	
320781	L1/131	120,797	31,3	0,3775	
328531	L1/131	121,654	29,2	0,3775	
328633	L1/131	120,889	30	0,3775	
<b>A+E – Adam &amp; Eva</b>				<b>1,687</b>	<b>53201</b>
328654	L1/131, L2/132 (1)	95,621	93,9	0,8435	
328658	L1/131, L2/132 (1)	108,891	67,9	0,8435	
<b>CI II – Clarabad Br. II</b>				<b>12,236</b>	<b>385875</b>
329646	L3/142	81,159	67,9	8,160	257334
330512	L5-K2/144, L4/143 (1)	-4,723	154,7	4,076	128541
<b>Ha – Halbmeilenberg</b>				<b>1,473</b>	<b>46453</b>
305497	L1/131	122,639	41,9	1,473	
<b>Hy Beo 1b – Brunnen 8 (R42 Phase B, R43)</b>				<b>1,857</b>	<b>58562</b>
327282	L3a/141, L5-K1/145, L6/146 (1)	97,289	68	0,3095	
335333	L3a/141, L6/146 (1)	90,561	73	0,3095	
326928	L3a/141, L6/146 (1)	83,833	77	0,3095	
327799	L3a/141, L6/146 (1)	91,615	71	0,3095	
335001	L3a/141, L6/146 (1)	98,343	66	0,3095	
325966	L3a/141, L6/146 (1)	99,397	65	0,3095	
<b>INSGESAMT</b>				<b>31,287</b>	<b>986667</b>

(1) Knoten befindet sich an Grenzfläche zwischen 2 oder 3 K-Klassen.

Tabelle 3      Rechenfälle R42 und R43. Grundwasserentnahme im Brunnental. Details der Modellierung

K-Klasse	Modell-einheit	Strati-graphie ([12], Tab. 5.14)	Werte BGR ([12], Tab. 5.14) [m/s]	Kalibrierung R42			Effektive Porosität [%]
				Anfangswert [m/s]	Bandbreite (1) [m/s]	Kalibr. $k_f$ -Wert [m/s]	
111	L0	q		$10^{-6}$	$10^{-7} - 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	10
131	L1	juhel-jusi	$10^{-7} - 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$10^{-7} - 5 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	3
132	L2	juhe(u), ko(3c)	$10^{-9} - 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	1,75
141	L3a	ko(GL)	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7} - 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	5,5
142	L3	ko(2b) bis ko(3b)	$10^{-5} - 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	6,5
143	L4	koM, ko(2a)	$5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	1,75
144	L5-K2	ko(1)1-7	$10^{-5} - 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	7,5
145	L5-K1	ko(1)1-7	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	3
146	L6	kmSM	$10^{-8} - 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$10^{-8} - 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	3
147	L7-K1	kmGo	$10^{-11} - 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$10^{-11} - 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$	1,5
148	L7-K2	kmGo	$< 10^{-11}$	$10^{-11}$	$10^{-12} - 10^{-10}$	$4,7 \cdot 10^{-12}$	0,5
149	L7-K3	kmGo	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-10} - 10^{-8}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	1,5
150	L8-K2	kmS	$5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	2,5
151	L8-K1	kmS	$10^{-11}$	$10^{-11}$	$10^{-12} - 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	0,5
152	L8-K3	kmS	$10^{-10} - 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-11} - 5 \cdot 10^{-9}$	$7,7 \cdot 10^{-10}$	3,0

(1) Kommentar zu den Bandbreiten siehe Kap. 4.2.5.5 und 4.3.3.1

	$> 10^{-7}$ m/s	Grundwasserleiter
	$> 10^{-9}$ bis $\leq 10^{-7}$ m/s	Grundwasserhemmer
	$\leq 10^{-9}$ m/s	Grundwassergeringleiter

Tabelle 4 Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Lappwaldmulde

K-Klasse	Modell-einheit	Strati-graphie ([12], Tab. 5.14)	Werte BGR ([12], Tab. 5.14)	Kalibrierung R42			Effektive Porosität
				Anfangswert	Bandbreite (1)	Kalibr. $k_f$ -Wert	
			[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
210	A1-A4	q	A1: $5 \cdot 10^{-4}$ A2: $10^{-6}$ A3: $10^{-4}$ A4: $5 \cdot 10^{-8}$ Im Modell nicht differenziert	Horizontal: $10^{-5}$ Vertikal: $10^{-7}$	Horizontal: $10^{-6} - 10^{-4}$ Vertikal: $5 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$	Horizontal: $3,2 \cdot 10^{-6}$ Vertikal: $2,1 \cdot 10^{-7}$	12,5
211		t		$10^{-6}$	$10^{-7} - 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-7}$	10
221	A5	krWA	$10^{-4}$	$10^{-4}$	$10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	12,5
222	A6	krALo	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	10
223	A7	krALu	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	5
233	A8-K1	j	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-10} - 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-10}$	3
234	A8-K2	j	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	3
235	A8-K3	j z>60 mNN	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-8} - 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	5
245	A9-K1	kmSM,ko(1)	$10^{-10} - 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-11} - 5 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	1,5
246	A9-K2	kmSM,ko(1)	$10^{-8} - 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	3
247	A10	kmGo	A10-K1: $10^{-11} - 10^{-10}$ A10-K2: $10^{-10} - 10^{-9}$ Im Modell nicht differenziert	$5 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-12} - 5 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	1,5
248	A11	kmS	$10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-10} - 10^{-8}$	$6,9 \cdot 10^{-9}$	3
249	A12	mu-kmGu	A12-K1: $10^{-9}$ A12-K2: $10^{-11} - 10^{-10}$ Im Modell nicht differenziert	$8 \cdot 10^{-12}$	$10^{-12} - 10^{-10}$	$5,2 \cdot 10^{-12}$	1,5
271, 272	A13-K1	cr (z2-4)	$10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	(nicht kalibriert)	$5,0 \cdot 10^{-11}$	0,25
273	A13-K2	cr (DA/GT/LK)	$10^{-11} - 10^{-8}$	$10^{-9}$	(nicht kalibriert)	$1 \cdot 10^{-9}$	25

(1) Kommentar zu den Bandbreiten siehe Kap. 4.3.3.1

	$> 10^{-7}$ m/s	Grundwasserleiter
	$> 10^{-9}$ bis $\leq 10^{-7}$ m/s	Grundwasserhemmer
	$\leq 10^{-9}$ m/s	Grundwassergeringleiter

Tabelle 5 Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Allertalzone



K-Klasse	Modell-einheit	Strati-graphie ([12], Tab. 5.14)	Werte BGR ([12], Tab. 5.14)	Kalibrierung R42			Effektive Porosität [%]
			[m/s]	Anfangswert [m/s]	Bandbreite (1) [m/s]	Kalibr. $k_f$ -Wert [m/s]	
310	T1-K1	q + t	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$10^{-7} - 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	10
351	T1-K2	mu	$10^{-8} - 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8} - 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	5
361	T2-K1	so	$10^{-8} - 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$10^{-8} - 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	2,5
362	T2-K2	so Gipskarst	$10^{-7} - 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	3
363	T3	smS	$10^{-6} - 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$10^{-6} - 10^{-4}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	7,5
364	T4	smV	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-11} - 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-11}$	2,5
365	T5	smVS	$\leq 10^{-9}$	$10^{-9}$	$10^{-10} - 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	7,5
381	T7	NE-Rand-störung	T7-K1: $10^{-9} - 10^{-7}$ T7-K2: $10^{-11} - 10^{-9}$ Im Modell nicht differenziert	$10^{-8}$	$10^{-9} - 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	5

(1) Kommentar zu den Bandbreiten siehe Kap. 4.3.3.1

	$> 10^{-7}$ m/s	Grundwasserleiter
	$> 10^{-9}$ bis $\leq 10^{-7}$ m/s	Grundwasserhemmer
	$\leq 10^{-9}$ m/s	Grundwassergeringleiter

Tabelle 6 Parameter der hydrostratigraphischen Einheiten der Weferlinger Triasplatte

	Süd, q1	Mitte, q2	Nord, q3
Bandbreite	0 – 4 l/s	0 – 5 l/s	0 – 1 l/s
Startwert	3 l/s	4 l/s	0,5 l/s
Verteilung auf L3/142 und L5-K2/144	1 : 1	1 : 1	1 : 1
Änderung Zufluß während Iterationen	Logarithmisch7		
Kalibrierter Wert R42 (1022 Iterationen)			
L3/142	1,56 l/s	2,50 l/s	0,20 l/s
L5-K2/144	1,56 l/s	2,50 l/s	0,20 l/s
Pro Teilgebiet	3,12 l/s	5,00 l/s	0,40 l/s
Gesamtzufluß	8,52 l/s		

Tabelle 7 Kalibrierungsrechnungen R42. Randzuflüsse im Lappwald

	Triasplatte/Allertal	Lappwald	
		Unterer Hangbereich gegen Allertal	Westlicher Teil
K-Klasse	700	701	702
Bandbreite	$10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$10^{-6} - 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Anfangswert	$3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Kalibrierter Wert R42 (1022 Iterationen)	$2,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	$3,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Tabelle 8 Kalibrierungsrechnungen R42. Transmissivität der 2D Verteilschicht

Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
1	DpMors10/88T2	4438124	5788993	135,2	kmS (36,0) kf 1E-7	150-152	1,015		130		120	130	10,2	147	130	130	(10)
2	DpMors10z/89	4438125	5789011	134,65	kmSM (9-13, 16-22)	146	[1,0]		126,6		9	22	119,15	146	126,6	126,6	
3	DpMors11/90T1	4438838	5789225	109,9	q,cr (4,1 41,5) Schlotte bis 80,2 kf 2E-7	271, 272	1,002		119		53,2	98,8	33,9	271	119	119	
4	DpMors12/90T1	4437200	5790293	148	ko (25,7) kf 1E-4	144	1		132		45	70,7	90,15	145	132	132	
5	DpMors12/90T2	4437200	5790293	148	kmSM (32,0) kf 1E-7	146	1,012		130		103	135	29	146	130	130	
6	DpMors12/90T3	4437200	5790293	148	kmSM,kmGo (15,4 15,7), kf 1E-12	147-149	1,1			143	253,9	285	-121,45	147	0	143	
7	DpMors12z/90	4437353	5790307	135,33	ko(1)5	144, 145	0,9989		117,9		52	58	80,33	145	117,9	117,9	
8	DpMors14/89T1	4438266	5790694	113,7	kmSM (26,0) kf 1E-8	246	1,1		114		124	150	-23,3	246	114	114	
9	DpMors3/89T2	4438257	5786721	159,9	ko (25,0)	144-145	0,999		147		171	196	-23,6	144	0	147	(3)
10	DpMors3/89T3	4438257	5786721	159,9	kmSM,kmGo (52,3 8,5) kf 1E-7	146	1,031		138		305,7	366,5	-176,2	146	137	139	
11	DpMors34A/95	4437761	5790044	133,6	ju-ko	233-26	0,9987		118,5		32,4	44,4	95,2	146	118,5	118,5	
12	DpMors34A/95T2	4437761	5790044	133,6	kmS (50,0) kf 1E-10	150-152	1,02			130	169	219,2	-60,5	150	0	130	
13	DpMors35A/95	4436772	5789760	139,04	ko(1)	143-144	0,9987		121,9		65,6	75,6	68,44	144	121,9	121,9	
14	DpMors36A/95	4437991	5789968	124,54	krWa	221	0,9986		114,9		53,6	57,6	68,94	221	114,9	114,9	
15	DpMors36B/95	4437987	5789967	124,78	q	210, 211	0,9992		116,5		8,5	10,5	115,28	210	116,5	116,5	
16	DpMors37A/95	4438026	5789360	132,37	kmSM	146	0,9996		127,4		76,6	79,6	54,27	146	127,4	127,4	(4)
17	DpMors37A/95T2	4438026	5789360	132,37	kmSM (40,0) < 2E-10	146	1,012	125	127	129	137	177	-24,63	146	125	129	
18	DpMors37A/95T3	4438026	5789360	132,37	kmSM (40,0) < 2E-7	146	1,025	126	127	128	66,5	106,5	45,87	146	126	128	
19	DpMors37A/95T4	4438026	5789360	132,37	cr (20,0) < 1E-11	271, 272	1,03			150	252	272	-129,63	271	0	150	
20	DpMors37B/95	4438025	5789365	132,33	kmSM	146	0,9989		125,1		29,3	36,3	99,53	146	125,1	125,1	(4)
21	DpMors38A/94	4438288	5789449	120,4	krALo	222	1,0290		115,7		181,5	181,5	-61,1	233	115,7	115,7	dichtekorr. (11)
22	DpMors38B/95	4438297	5789453	120,14	krALo	222	1,0164		115,5		112,7	117,7	4,94	222	115,5	115,5	dichtekorr.
23	DpMors38C/95	4438291	5789452	120,24	krWa	221	1,0050		114,5		42,4	47,4	75,34	221	114,5	114,5	dichtekorr.
24	DpMors38D/95	4438293	5789448	120,27	q	210, 211	0,9988		114,6		11,4	13,4	107,87	210	114,6	114,6	
25	DpMors4/89T1	4438286	5787905	158,72	kmSM (22,0) kf 2E-7	146	1,013		131		103	125	44,72	146	131	131	
26	DpMors4/89T2	4438286	5787905	158,72	kmSM (25,6) kf 3E-7	146	1,026		132		174,4	200	-28,48	146	132	132	

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale

Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
27	DpMors4/89T3	4438286	5787905	158,72	kmSM (30,2) kf 1E-9	146	1,034		134		244,8	275,0	-101,18	146	134	134	
28	DpMors40A/95T1	4438421	5788474	138,29	j, cr (41,0 7,2) kf 4E-10	233	1,03	120		140	215,8	264	-101,61	233	120	140	
29	DpMors40A/95T2	4438421	5788474	138,29	j, cr (149,0 7,2) kf 1E-9	233	1,03			152	107,8	264	-47,61	233	0	152	
30	DpMors40A/95T4	4438421	5788474	138,29	j (14,5) kf 3E-7	233	1,1	132	137	142	92	106,5	39,04	233	132	142	
31	DpMors40B1/95	4438414	5788469	138,76	ko(1)8-(2b)	142, 143	0,9986		125,6		52,8	63,8	80,46	141	125,6	125,6	
32	DpMors40C/95	4438417	5788471	138,62	ko(2b)	142	0,9990		125,5		37,3	42,3	98,82	141	125,5	125,5	
33	DpMors42A1/95	4439089	5788602	111,57	cr	271, 272	1,0074		110,4		42,6	46,6	66,97	271	110,4	110,4	dichtekorr.
34	DpMors42A1/95T1	4439089	5788602	111,57	cr (20,0) kf 3E-5	271, 272	1,0057	110	111	112	28	48	73,57	271	110	112	
35	DpMors42A1/95T2	4439089	5788602	111,57	cr (18,1) kf >5E-6	271, 272	1,0073	110	111	112	52	70,1	50,52	271	110	112	
36	DpMors42A1/95T3	4439089	5788602	111,57	cr (5,1) kf <1E-11	271, 272	1,2	112			245	250,1	-135,98	272	112	1000	
37	DpMors42A1/95T4	4439089	5788602	111,57	cr (5,1) kf 3E-9	271, 272	1,2			126	233,5	238,6	-124,48	272	0	126	
38	DpMors42A1/95T5	4439089	5788602	111,57	cr (55,5) kf <3E-11	271, 272	1,2			112	70	125,5	13,82	271	0	112	
39	DpMors42B/95	4439088	5788604	111,52	q	210, 211	1,0020		110		4,4	6,4	106,12	210	110	110	
40	DpMors43A/95	4438967	5787842	122,96	kmSM.TZ	146	1,0173		118,4		86,3	96,3	31,66	146	118,4	118,4	dichtekorr.
41	DpMors43A/95T1	4438967	5787842	122,96	kmGo-cr (36,5 23,5) kf 7E-11	246, 271, 272	1,05	118		123	200	260	-107,04	271	118	123	
42	DpMors43A/95T2	4438967	5787842	122,96	kmSM (40,0) kf 8E-10	146	1,04			135	148	188	-45,04	146	0	135	
43	DpMors43A/95T3	4438967	5787842	122,96	kmSM (40,0) kf 3E-8	146	1,0235			133	105	145	-2,04	146	0	133	
44	DpMors43A/95T4	4438967	5787842	122,96	ko, kmSM (7,4 32,6) kf 8E-7	146	1,01	116	118	120	62	102	40,96	146	116	120	
45	DpMors43B/95	4438968	5787836	123,07	q	210, 211	0,9990		118		28,4	30,4	93,67	210	118	118	
46	DpMors44A/94T1	4439569	5788103	110,8	cr (10,0) kf 3E-9 .. 1E-7	271, 272	1,002	109	110	111	45	55	60,8	272	109	111	
47	DpMors44A/94T2	4439569	5788103	110,8	cr (8,0) kf >1E-4	271, 272	1,0012	109	110	111	36,5	44,6	70,25	272	109	111	
48	DpMors44A1/94	4439572	5788111	110,91	j+cr.	271, 272	1,0020		109,3		40,5	45,5	67,91	272	109,3	109,3	
49	DpMors44B/94	4439573	5788116	110,91	q	210, 211	1,0000		109,4		8,2	10,2	101,71	210	109,4	109,4	
50	DpMors45A/94T1	4440124	5788549	130,3	kmSM (10,1) kf 2E-8	246	1	125	126	127	75	85,1	50,25	246	125	127	
51	DpMors45A/94T2	4440124	5788549	130,3	kmSM (10,1) kf 2E-6	246	1	125	126	127	50	60,1	75,25	246	125	127	
52	DpMors45A/94T5	4440124	5788549	130,3	cr (12,1) kf <1E-10	271, 272	1,1	127		139	241	253,1	-116,75	272	127	139	
53	DpMors45A/94T6	4440124	5788549	130,3	cr (12,1) kf 2E-10	271, 272	1,05	126	128	130	204	216,1	-79,75	272	126	130	
54	DpMors45A/94T7	4440124	5788549	130,3	cr (12,1) kf 3E-6	271, 272	1,1943	126	127	128	250	262,1	-125,75	272	126	128	

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 2)

Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
55	DpMors45B/95	4440120	5788558	130,65	kmSM	246	0,9994		124,3		52,6	62,6	73,05	246	124,3	124,3	
56	DpMors46A/95	4438933	5789905	107,79	kmSM	246	1,0000		105		73,5	78,5	31,79	246	105	105	
57	DpMors46A/95T1	4438933	5789905	107,79	cr, z (7,8 2,7 (<1E-11))	271, 272	1,2	71			239,5	250	-136,96	272	71	1000	
58	DpMors46A/95T3	4438933	5789905	107,79	kmSM, kmGo (19,4 10,7) kf < 1E-11	245, 247	1,1	93		121	170,6	200,7	-77,86	247	93	121	
59	DpMors46A/95T4	4438933	5789905	107,79	kmSM (30,0) kf 3E-10	245	1,01	103	106	109	139,3	169,3	-46,51	245	103	109	
60	DpMors46A/95T6	4438933	5789905	107,79	kmSM (6,1) kf <7E-6	246	0,99963	102	105	108	90	96,1	14,74	246	102	108	
61	DpMors47A/95	4439440	5787214	131,48	ju	233-235	1,0057		119		112,8	117,8	16,18	233	119	119	
62	DpMors49A/95	4438879	5788208	119,99	krALo	222	0,9997		114,3		102,4	107,4	15,09	222	114,3	114,3	
63	DpMors49B/95	4438877	5788216	119,96	q	210, 211	0,9999		114		68,6	72,6	49,36	210	114	114	
64	DpMors4z/89	4438275	5787899	159,27	ko(1)4	144, 145	0,9989		126,9		42	48	114,27	145	126,9	126,9	
65	DpMors50B/95	4438787	5788181	124,69	ko(2,3)	132, 141-143	1,0321		119,3		15,3	20,3	106,89	210	119,3	119,3	dichtekorr.
66	DpMors51A/95T2	4438572	5788106	138,6	kmGo (29,9) kf <1E-11	147, 148	1,1			138	181,1	211	-57,45	147	0	138	
67	DpMors51A/95T3	4438572	5788106	138,6	kmGo (29,9) kf 2E-11	146	1,04			131	135	164,9	-11,35	147	0	131	
68	DpMors51A/95T4	4438572	5788106	138,6	kmSM (29,9) kf 3E-6	146	1,03	125	126	127	84,6	114,5	39,05	146	125	127	
69	DpMors51A/95T5	4438572	5788106	138,6	kmSM (29,9) kf 1E-6	146	1	125	126	127	38,9	68,8	84,75	146	125	127	
70	DpMors51B/95	4438572	5788099	138,65	kmSM	146	1,0340	126	127,7	129	109,6	124,6	21,55	146	126	129	dichtekorr. (5)
71	DpMors51C/95	4438568	5788108	138,3	kmSM	146	1,0270		124,7		48,6	63,6	82,2	146	124,7	124,7	
72	DpMors52A/95	4437897	5788454	160,63	ko(1)-kmSM	145-146	1,0246		125,5		114,6	124,6	41,03	146	125,5	125,5	
73	DpMors52A/95T1	4437897	5788454	160,63	ko(14,1), kf 3E-8	145	1			130	46	60,1	107,58	145	0	130	
74	DpMors52A/95T2	4437897	5788454	160,63	kmS (9,1) kf 6E-8	150	1,1836	129	131	133	370	379,1	-213,92	150	129	133	
75	DpMors52A/95T4	4437897	5788454	160,63	ko, kmSM (10,3 40,0) 1E-7	146	1,1	125	126	127	110	160,3	25,48	146	125	127	
76	DpMors52A/95T5	4437897	5788454	160,63	kmGo (16,2) <1E-11	147, 148	1,2	121			297	313,2	-144,47	147	121	1000	
77	DpMors54A/95	4436824	5788630	173,14	ko(2b)	142	0,9984		136,4		128,7	133,7	41,94	142	136,4	136,4	
78	DpMors55A/95	4437536	5789170	162,15	kmS	150-152	1,1832	136		142	401,7	411,7	-244,55	150	136	142	(6)

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 3)

Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
79	DpMors55A/95T1	4437536	5789170	162,15	kmS (17,1) kf 1E-7	150	1,1993	135	137	139	397	414,1	-243,4	150	135	139	
80	DpMors55A/95T2	4437536	5789170	162,15	kmSM (16,6) kf 7E-6	146	1,02424	121	124	127	250,5	267,1	-96,65	146	121	127	
81	DpMors55A/95T4	4437536	5789170	162,15	kmSM (53,1) kf 1E-6	146	1,00232	116	125	127	171,5	224,6	-35,9	146	116	127	
82	DpMors55B/95	4437546	5789164	162,18	ko(1)2-3	144, 145	0,9990		126,3		110,7	120,7	46,48	145	126,3	126,3	
83	DpMors55C/95	4437539	5789165	161,95	ko(1)7	144, 145	0,9988		125,6		49,5	59,5	107,45	145	125,6	125,6	
84	DpMors56A/94	4437308	5789715	155,47	ko(1)2-3	144, 145	0,9989		127,6		95,3	100,3	57,67	145	127,6	127,6	
85	DpMors56A/94T1	4437308	5789715	155,47	kmSM (20,1) 2E-8	146	0,9999	126	128	130	145	165,1	0,42	146	126	130	
86	DpMors56A/94T2	4437308	5789715	155,47	ko (20,0) kf 2E-7	145	1	127	129	131	50	70	95,47	145	127	131	
87	DpMors56A/94T3	4437308	5789715	155,47	ko (6,2) kf >3E-6	145	1	129	130	131	95	101,2	57,37	145	129	131	
88	DpMors56B/95	4437302	5789708	155,28	ko(1)8 = koM	143	1,0022		124,8		31,3	36,3	121,48	145	124,8	124,8	
89	DpMors57A/95	4438043	5789537	128,35	ko(2b)	142	0,9993		119,8		34,5	39,5	91,35	146	119,8	119,8	
90	DpMors59A/94	4437223	5790595	137,28	jm	235	0,9986		128		24,3	29,3	110,48	235	128	128	
91	DpMors5z1/90T1	4438697	5788303	120	j (26,3) kf 6E-8	233-235	1		117		50	76,3	56,85	233	117	117	
92	DpMors5z3/90	4438769	5788323	117,9	krALo	222	0,9992		114,6		132	132	-14,1	223	114,6	114,6	(12)
93	DpMors5z4/90	4438626	5788283	121,6	ko	141-145	1,0668		123		22	28	96,6	141	123	123	
94	DpMors5z5/90	4438753	5788318	118,1	q.kroWa	221	0,9985		114,6		54	54	64,1	222	114,6	114,6	(13)
95	DpMors6/90	4438897	5788372	115,1	krALo+cr	222	1,0033		111,7		112	118	0,1	222	111,7	111,7	
96	DpMors60A/95	4436511	5790296	169,61	ko(1)6-7	144, 145	0,9985		121,8		102,5	109,5	63,61	144	121,8	121,8	
97	DpMors60B/95	4436519	5790298	169,75	ko(1)8	143	0,9991		127,3		70,6	75,6	96,65	143	127,3	127,3	
98	DpMors61A/95	4436145	5791153	167,46	ko(1)5	144, 145	0,9986		120,8		132,2	137,2	32,76	144	120,8	120,8	
99	DpMors61A/95T1	4436145	5791153	167,46	ko (10,0) kf >1E-3	144	1	120	122	124	128	138	34,46	144	120	124	
100	DpMors61B/95	4436154	5791160	167,49	ko(1)8	143	0,9988		125,6		90,5	95,5	74,49	143	125,6	125,6	
101	DpMors61C/95	4436155	5791151	167,69	ko(2b)	142	0,9985		130,4		47,4	52,4	117,79	142	130,4	130,4	
102	DpMors62A1/94	4436672	5792108	132,68	krWA	221	0,9988		114		25,3	30,3	104,88	221	114	114	
103	DpMors63A/95	4437418	5792136	117,84	t	211	0,9989		112,9		6,4	8,4	110,44	210	112,9	112,9	
104	DpMors64A/95	4434691	5789462	178,51	ko(3a-b)	142	1,0003		132,8		82,8	92,8	90,71	142	132,8	132,8	
105	DpMors65A/95	4439800	5787277	113,24	krALo	222	0,9991		112		9,2	12,2	102,54	222	112	112	
106	DpMors65A/95T1	4439800	5787277	113,24	cr (18,2) kf 3E-9	271, 272	1,0756	107		115	198	216,2	-93,86	271	107	115	

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 4)

Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
107	DpMors66A/95	4439972	5787062	117,29	krWa	221	0,9993		113,2		16,4	18,4	99,89	221	113,2	113,2	
108	DpMors67A/95	4439161	5788016	113,99	krALo	222	0,9990		111,9		63,6	67,6	48,39	222	111,9	111,9	
109	DpMors67B/95	4439159	5788013	114,08	q	210, 211	0,9998		112,1		12,3	14,3	100,78	210	112,1	112,1	
110	DpMors68A/95	4439068	5788315	112,46	krALo	222	0,9987		111		59,5	63,5	50,96	222	111	111	
111	DpMors68B/95	4439070	5788315	112,44	q	210, 211	1,0033		111,4		4,4	6,4	107,04	210	111,4	111,4	
112	DpMors69A/95	4438790	5788534	119,26	krALo	222	0,9986		114,7		84,5	89,5	32,26	222	114,7	114,7	
113	DpMors69B/95	4438785	5788533	119,42	q	210, 211	0,9990		114,3		19,4	21,4	99,02	210	114,3	114,3	
114	DpMors7/90T2	4439385	5788672	109,3	kmS (35,8) kf 1E-9	248	1		116		114,2	150	-22,8	248	116	116	
115	DpMors71A/94	4438725	5788857	117,04	krALo	222	0,9985		114,3		26,6	30,6	88,44	222	114,3	114,3	
116	DpMors71B/94	4438725	5788862	116,87	q	210, 211	0,9992		113,6		9,4	11,4	106,47	210	113,6	113,6	
117	DpMors72A/95	4438957	5788929	112,12	q	210, 211	1,0000		110,4		27,6	29,6	83,52	210	110,4	110,4	
118	DpMors72A/95T2	4438957	5788929	112,12	cr (81,0) kf <1E-11	271, 272	1,2		135	169	250	-97,38	272	0	135		
119	DpMors72A/95T3	4438957	5788929	112,12	cr (35,0) kf <1E-11	271, 272	1,1	105	122	115	150	-20,38	271	105	122		
120	DpMors72A/95T4	4438957	5788929	112,12	cr (35,0) kf <1E-11	271, 272	1,02	97	124	80	115	14,62	271	97	124		
121	DpMors74A/94	4438629	5789207	114	krALo	222	0,9998		114,5		44,5	48,5	67,5	222	114,5	114,5	
122	DpMors74B/94	4438630	5789203	114,15	q	210, 211	0,9991		109,7		8,7	10,7	104,45	210	109,7	109,7	
123	DpMors8/89T1	4440684	5789445	118,2	so, sm (3,4 23,1) kf 6E-6	363	1,007		117		57,7	84,2	47,25	363	117	117	
124	DpMors8/89T3	4440684	5789445	118,2	sm, su (18,6 26,1) kf 2E-10	363-365	1,2		146	180,3	225	-84,45	365	0	146		
125	DpMors86A/95	4440132	5787649	136,5	krWA	221	0,9989		114,4		50,6	50,6	85,9	222	114,4	114,4	(14)
126	DpMors9/89	4441056	5789853	115,71	q-so	361, 362	1,0001		117,6		34	42	77,71	361	117,6	117,6	
127	DpMors93A/95	4438490	5792420	111,19	smSW	363	1,0009		120,1		67,8	75,8	39,39	363	120,1	120,1	
128	DpMors94A/95	4441136	5788240	147,95	smSW	363	1,0113		120,5		135,7	139,7	10,25	363	120,5	120,5	dichtekorr.
129	DpMors94A/95T1	4441136	5788240	147,95	sm (15,0) kf 7E-6	363-365	1,0097	118	120	122	145	145	2,95	363	118	122	(15)
130	DpMors94B/95	4441136	5788250	147,63	soAN3	361, 362	1,0002		119,3		46,6	56,6	96,03	361	119,3	119,3	
131	HyBeo(6)/78	4438541	5789357	115,3	q.kro	210, 221-223	1,0018		114,4		24	32	87,3	222	114,4	114,4	
132	HyBeo1/82	4438172	5789807	119	krWA	221	1,0003		114,5		22	22	97	222	114,5	114,5	(16)
133	HyBeo2/82	4438176	5789641	122,6	krWA	221	1,0002		114,4		22	22	100,6	222	114,4	114,4	(17)
134	HyBeo2b/82	4437582	5790019	144	ko?	141-145	1,0029		118		22	26	120	141	118	118	
135	HyBeo3b/82	4437362	5790028	123	ko1?	144,145	1,0013	116	117,4	119	42	57	73,5	145	116	119	(7)

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 5)

Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
136	HyBeo4/82	4438382	5789877	114,8	krWA	221	1,0007		114,1		23	23	91,8	222	114,1	114,1	(18)
137	HyHmt10/70	4435218	5790492	163,2	juhe	131, 132	0,9989		137		38	42	123,2	131	137	137	
138	HyHmt11/70	4437131	5789836	132,4	ko(1)5 (56-57m, 64-65m)	144-145	0,9987		123,1		56	65	71,9	145	123,1	123,1	
139	HyHmt28/79	4436913	5789474	174,2	ko(1)4-5 (125-129), ko(1)4 (131-135), ko(1)2 (145-149), ko(1)1 (162-166, 182-184)	144-145	0,9987		122,2		125	184	19,7	144	122,2	122,2	
140	HyHmt29/80	4437253	5788916	178,8	ko(1) (94-96, 98-104, 109-111, 113-117, 125-127, 130-132)	144-145	0,9987		121,9		94	132	65,8	144	121,9	121,9	
141	HyHmt30/79	4437250	5788919	178,9	ko2(b) (48-50, 52-54), ko(2a), ko(1)8,9 (62-64, 68-74, 79-83)	142-143	0,9984		138,5		48	83	113,4	143	135,5	141,5	(8)
142	HyHmt31/80	4436910	5789480	173,8	ko(2bu): 30-34, 36-38; ko(2b)u: 40-42; ko(2a): 45-47; 54-56; ko(2a), ko(1)9: 60-62; ko(1)8: 70-74; ko(2b)?: 96-100; ko(1)6: 107-111; ko(1)5: 116-120.	142-145	0,9985		137		30	74	121,8	143	134	140	(19)
143	HyHmtBu/-	4435973	5789423	147	ko(2-3), juhe	132, 142	0,9989	A = 120	R = 129	46	185	31,5	132	120	129		
144	HyHmtCl II/73	4436514	5789479	139,7	ko(2b), ko1(6)	142-145	0,9987	A = 118	R = 123	51	176	26,2	143	118	123		
145	HyHmtHa/-	4434824	5791084	165,6	juhe-o	131	0,9985	A = 137	R = 139	31	77	111,6	131	137	139		
146	HyHmtQuh/-	4435543	5789885	151	juhel	131	0,9987	A = 119	R = 124	76	116	55	132	119	124		
147	HyHmtWA II/73	4435738	5789268	145,6	juhel (54-58m juhel, 78-80 m juhel)	131	0,9991	A = 119	R = 122	54	80	78,6	131	119	122		
148	HyMors1/83	4440605	5788320	147,3	soP	361, 362	0,9991		123,7		72	76	73,3	381	123,7	123,7	
149	HyMors11/83	4438533	5790611	107,8	q-kmSM	245, 246	0,9986		106,1		14	18	91,8	246	106,1	106,1	
150	HyMors14/83	4438243	5791581	102,8	kmSM	245, 246	0,9988		101,7		7	11	93,8	246	101,7	101,7	
151	HyMors15/83	4437809	5792518	100,9	ko	245, 246	0,9985		100		19	23	79,9	246	100	100	
152	HyMors16/85	4439543	5789952	113,7	kmGo	361, 362	[1,0]		112,7		40	46	70,7	381	112,7	112,7	
153	HyMors17/85	4441644	5790863	134,8	q-so	361, 362	0,9987		124,6		28	34	103,8	361	124,6	124,6	
154	HyMors2/83	4439090	5789718	107,1	q	210, 211	0,9992		106,1		5	9	100,1	210	106,1	106,1	
155	HyMors3/83	4439361	5789175	108,5	q	210, 211	1,0002		107,9		14	18	92,5	210	107,9	107,9	
156	HyMors4/83	4437848	5791347	121,4	q	210, 211	0,9991		114,7		26	30	93,4	210	114,7	114,7	

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 6)



Nr.	Informationen über Bohrung							Meßwert			Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						
	Meßstelle	Koordinaten		Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	K-Klasse gemäß Stratigr.	GW-Dichte (1), g/cm <sup>3</sup>	FWH (Meßwert) (2), mNN			Tiefe Meßintervall, m		Höhe Zentr. Meßintervall mNN	K-Klasse	FWH (Meßwerte) z. Ber. Zielfunktion mNN		Bem.
		Rechts	Hoch					Min.	Bestw.	Max.	OK	UK			min	max.	
157	HyMors5/83	4438936	5790736	106,8	kmSM	245, 246	1,0016		109,5		44	48	60,8	246	109,5	109,5	
158	HyMors6/83	4440462	5787640	138,6	kmSM	245, 246	0,9988		122,5		21	25	115,6	246	122,5	122,5	
159	HyMors8/83	4439871	5789411	111,9	mu	351	(1,002)		109		44	44	67,9	381	109	109	(20)
160	HyMors9/83	4438770	5789817	108,6	q	210, 211	0,9994		106,6		38	38	70,6	210	106,6	106,6	(21)
161	37320001	4437982	5790487	112,8			[1,0]		111,2		1,6	1,6	111,2	210	111,2	111,2	
162	37320002	4437442	5790135	122,8			[1,0]		118,1		4,7	4,7	118,1	141	118,1	118,1	
163	WTP_z1	4441800	5792600	126	Stützstelle		[1,0]	127	130	133	0	0	126	364	127	133	
164	WTP_z2	4441300	5791350	121	Stützstelle		[1,0]	122	125	128	0	0	121	361	122	128	
165	WTP_z3	4440700	5791000	116	Stützstelle		[1,0]	117	120	123	0	0	116	361	117	123	
166	WTP_z4	4441850	5790150	121	Stützstelle		[1,0]	122	125	128	0	0	121	310	122	128	
167	WTP_z5	4442650	5790250	126	Stützstelle		[1,0]	127	130	133	0	0	126	361	127	133	
168	WTP_z6	4440850	5789000	121	Stützstelle		[1,0]	122	125	128	0	0	121	361	122	128	
169	WTP_z7	4442200	5789000	126	Stützstelle		[1,0]	127	130	133	0	0	126	361	127	133	
170	WTP_z8	4443400	5792300	134	Stützstelle		[1,0]	135	140	145	0	0	134	310	135	145	
171	WTP_z9	4443550	5791150	134	Stützstelle		[1,0]	135	140	145	0	0	134	310	135	145	
172	WTP_z10	4444450	5791650	144	Stützstelle		[1,0]	145	150	155	0	0	144	310	145	155	
173	WTP_z11	4443750	5790000	134	Stützstelle		[1,0]	135	140	145	0	0	134		135	145	
174	DpMors2/89	4439503	5787843	112,1	cr	271, 272	1,0021	110,4	110,6	110,7	43	47	67,1	223	110,4	110,7	
175	DpMors47A/95T1	4439440	5787214	131,48	cr (45,7) kf <3E-10	271, 272	>1,1			154	224,3	270	-115,67	271	0	154	
176	DpMors51A/95T1	4438572	5788106	138,6	kmGo,kmS,kmGu (9,3 43,4 7,3) kf 1E-8	147-152	1,0317		114		211	271	-102,4	152	114	1000	(9)
177	DpMors53A/94	4437116	5787982	185,94	ko(3c)	132	1,0011		169,1		51,3	56,3	132,14	132	0	169,1	(3)
178	DpMors54B/95	4436826	5788633	173,28	juhe-ko(3)	132, 142	0,9994		159,4		50,4	55,4	120,38	132	0	159,4	(3)
179	DpMors56A/94T4	4437308	5789715	155,47	ko (6,2) kf > 3E-8	141-145	0,9999			133	26	32,2	126,37	145	0	133	
180	HyHmt16/70	4435624	5790776	176,9	juhe (22-23, 75-76)	131, 132	0,9987		151,1		22	76	127,9	132	0	151,1	(3)

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 7)

## Bemerkungen

- (1) Grundwasserdichte gemäß [12], bzw. [8], Anlage 28. (...) abgeleitet aus Leitfähigkeit, [...] angenommener Wert
- (2) Werte für Packertests aus [12], Anlage 10. Werte für GWM aus [8], Anlage 24
- (3) Nr. 9 - DpMors3/89T2, Nr. 177 - DpMors53A/94, Nr. 178 - DpMors54B/95, Nr. 180 - HyHmt16/70: Meßwert liegt in [8] und [12] als Bestwert vor; in den Kalibrierungsrechnungen als Maximalwert angesetzt.
- (4) Nr. 16 - DpMors37A/95, Nr. 20 - DpMors37B/95: Werte gemäß [8], Anlage 24
- (5) Nr. 70 - DpMors51B/95: Bandbreite 126-129 mNN eingefügt wegen unsicherer Messungen (siehe [8], Anlage 24)
- (6) Nr. 78 - DpMors55A/95: Bandbreite 136-142 mNN eingefügt wegen unsicherer Messungen (siehe [8], Anlage 24)
- (7) Nr. 135 - HyBeo3b/82: Bandbreite 116-119 mNN eingefügt wegen unsicherer Messungen (siehe [8], Anlage 24)
- (8) Nr. 141 - HyHmt30/79: Zentrum Meßintervall 48-83m liegt in L4/143. Erweiterung des Meßwertes (Bestwert 138,5) durch eine Bandbreite  $\pm 3$ m (135,5-141,5 mNN)
- (9) Nr. 176 - DpMors51A/95T1: Potential im Schilfsandstein durch Nähe des Schachtes Bartensleben beeinflusst. Der Meßwert (Bestwert) stellt damit einen Minimalwert dar.

Beim Vergleich zwischen Meß- und Rechenwerten wird im Modell das Potential im Intervallzentrum abgegriffen. Erfasst das Meßintervall mehrere Einheiten oder bestehen zwischen dem Modell und der betreffenden Bohrung kleine Unterschiede, so kann der Vergleichspunkt in eine Einheit fallen, die nicht derjenigen entspricht, für die eine Potentialmessung vorliegt.

Durch eine entsprechende Verkürzung des Meßintervalls wird das Zentrum in die gewünschte Einheit verschoben. Anpassungen des Meßintervalls aus den angeführten Gründen sind für folgende Vergleichspunkte vorgenommen worden:

- (10) Nr. 1 - DpMors10/88T2: Meßintervall im Modell zu hoch. Meßintervall 94-130 m modifiziert in 120-130 m
- (11) Nr. 21 - DpMors38A/94: Grenze A6/222 zu A8-K1/233 höher. Meßintervall 181,5-186,5 m modifiziert in 181,5-181,5 m
- (12) Nr. 92 - DpMors5z3/90: Etwas zu tief. Meßintervall 132-138 m modifiziert in 132-132 m
- (13) Nr. 94 - DpMors5z5/90: Etwas zu tief. Meßintervall 54-60 m modifiziert in 54-54 m
- (14) Nr. 125 - DpMors86A/95: Etwas zu tief. Meßintervall 50,6-55,6 m modifiziert in 50,6-50,6 m
- (15) Nr. 129 - DpMors94A/95T1: Etwas zu tief. Meßintervall 145-160 m modifiziert in 145-145 m
- (16) Nr. 132 - HyBeo1/82: Etwas zu tief Meßintervall 22-26 m modifiziert in 22-22 m
- (17) Nr. 133 - HyBeo2/82: Etwas zu tief. Meßintervall 22-26 m modifiziert in 22-22 m
- (18) Nr. 136 - HyBeo4/82: Etwas zu hoch. Meßintervall 19-23 m modifiziert in 23-23 m
- (19) Nr. 142 - HyHmt31/80: Stratigraphie gemäß [12], Tab. 3.5: Meßintervall 30-120 m modifiziert in 30-74m. Zentrum Meßintervall in L4/143. Erweiterung des Meßwertes (Bestwert 137) durch eine Bandbreite  $\pm 3$ m (134-140 mNN)
- (20) Nr. 159 - HyMors8/83: Meßintervall im Modell zu tief (Störung statt mu). Meßintervall 44-48 m modifiziert in 44-44 m
- (21) Nr. 160 - HyMors9/83: Etwas zu tief (kmGo statt q). Meßintervall 38-42 m modifiziert in 38-38 m

Tabelle 9 Kalibrierungsrechnungen R42, Phase B. Vergleichspunkte Potentiale (Seite 8)

<b>Lappwaldmulde</b>	Anzahl Vergleichspunkte
L0/111	-
L1/131	3
L2/132	5
L3a/141	5
L3/142	3
L4/143	5
L5-K2/144	7
L5-K1/145	13
L6/146	25
L7-K1/147	5
L7-K2/148	-
L7-K3/149	-
L8-K2/150	4
L8-K1/151	-
L8-K3/152	1
<b>Insgesamt</b>	<b>76</b>
<b>Allertalzone</b>	Anzahl Vergleichspunkte
A1-A4/210	19
--/211	-
A5/221	4
A6/222	15
A7/223	2
A8-K1/233	6
A8-K2/234	-
A8-K3/235 z>60 mNN	1
A9-K1/245	1
A9-K2/246	11
A10/247	1
A11/248	1
A12/249	-
A13-K1/271	11
A13-K1/272	10
A13-K2/273	-
<b>Insgesamt</b>	<b>82</b>
<b>Weferlinger Triasplatte</b>	Anzahl Vergleichspunkte
T1-K1/310	4
T1-K2/351	-
T2-K1/361	9
T2-K2/362	-
T3/363	4
T4/364	1
T5/365	1
T7/381	3
<b>Insgesamt</b>	<b>22</b>

Tabelle 10 Überblick über die Vergleichspunkte

Nr. der Iteration	Zielfunkt., m <sup>2</sup>	Mittl. Abweichg. Meßwert-Rechenwert, m	Mittlere Abnahme pro Iteration		Bemerkung
			Zielfunktion, m <sup>2</sup>	Mittl. Abweichg. Meßwert - Rechenwert, m	
<b>R42, Phase A</b>					
44	um 4000	2,95			Anfangswerte der Durchlässigkeit
190	2200	2,46	Iterat. 44-190: 12,6	0,0034	Erhöhung T-Wert der 2D Verteilschicht Triasplatte-Allertal bis an obere Bandbreite 1·10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> Leichte Zunahme k <sub>r</sub> -Wert L1/131 Leichte Abnahme k <sub>r</sub> -Wert L2/132
380	1750	2,12	Iterat. 191-380: 2,4	0,0018	Erhöhung k <sub>r</sub> -Wert von T2-K1/361, T3/363, A11/248 und L1/131, weniger ausgeprägt von T1-K1/310 Wenig ausgeprägte Verringerung von L2/132, L7-K2/148 und A10/247
543	1550	2,04	Iterat. 381-543: 1,2	0,0006	k <sub>r</sub> -Werte von T2-K1, T3/363, L5-K1/145, A11/248 erhöht, jene von L4/143 und A6/222 verringert. Geringe Erhöhungen von T5/365, T1-K1/310, A11/248, L7-K3/149, L3a/141, L1/131 sowie Zufluß im Lappwald im Abschnitt „Mitte“, Geringe Abnahmen in A10/247, L7-K2/148, L7-K1/147, L2/132.
<b>R42, Phase B</b>					
587	rund 2400	2,33			Deutliche Abnahme T-Wert der 2D Verteilschicht Triasplatte/Allertal
670	1700	2,05	Iterat. 587-670: 8,3	0,0033	Geringe k <sub>r</sub> -Anpassung in L3a/141, L5-K1/145, L7-K2/148, A5/221 und A9-K1/245
709	1540	1,92	Iterat. 671-709: 4,4	0,0036	
753	1510	1,90			Veränderung der k <sub>r</sub> - bzw. T-Werte vor allem in L3/142, L5-K1/145, A1-A4/210, 2D Verteilschicht Triasplatte/Allertal
847	1334	1,86	Iterat. 753-847: 1,8	0,00043	
1022	1241	1,77	Iterat.848-1022: 0,9	0,00051	

Tabelle 11 Kalibrierungsrechnungen R42: Entwicklung der Zielfunktion und der mittleren Abweichungen Meßwert-Rechenwert

Modellrand Allertal	K-Klasse / Einheit	Querschnittsfläche	k <sub>r</sub> -Wert R43 / R44	Mittlerer hydraulischer Gradient	Darcyfluß m/s	Zu- bzw. Abfluß am Modellrand		
		m <sup>2</sup>	m/s			m <sup>3</sup> /a	l/s	
Süd	A1-A4/210	15'537	3,2·10 <sup>-6</sup>	2,122	6,78·10 <sup>-9</sup>	3'324	0,11	
	A6/222	59'410	2,8·10 <sup>-6</sup>			5,94·10 <sup>-9</sup>	11'121	0,35
	Insgesamt:	<b>74'947</b>				Insgesamt:	<b>14'445</b>	<b>0,46</b>
Nord	A1-A4/210	6'497	3,2·10 <sup>-6</sup>	2,778	8,90·10 <sup>-9</sup>	-1'823	-0,06	
	A5/221	36'031	4,5·10 <sup>-5</sup>			1,25·10 <sup>-7</sup>	-142'148	-4,50
	A6/222	26'543	2,8·10 <sup>-6</sup>			7,78·10 <sup>-9</sup>	-6'516	-0,21
	Insgesamt:	<b>69'071</b>				Insgesamt:	<b>-150'487</b>	<b>-4,77</b>

Tabelle 12 Rechenfälle R43, R44. Abschätzung des Grundwasserzu- bzw. -abstroms durch die Schnittflächen des Quartär (A1-A4) und der Oberkreide (A5, A6) mit den vertikalen Modellrändern im Allertal (Süd- und Nordrand)

Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion					R42 1022 Iterationen			
	Meßstelle	Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall			Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechenwert mNN	Zielfunktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert, gewichtet	
					Tiefe, m	Höhe mNN	K-Klasse	min	max.				
					OK	UK	Zentrum	Zentrum					
145	HyHmtHa/-	165,6	juhe-o	0,9985	31	77	111,6	131	137	139	140,034	1,07	1,03
137	HyHmt10/70	163,2	juhe	0,9989	38	42	123,2	131	137	137	136,535	0,22	0,47
147	HyHmtWA II/73	145,6	juhel (54-68m, 78-80m)	0,9991	54	80	78,6	131	119	122	122,199	0,04	0,20
146	HyHmtQuh/-	151	juhel	0,9987	76	116	55	132	119	124	125,989	3,96	1,99
143	HyHmtBu/-	147	ko(2-3), juhe	0,9989	46	185	31,5	132	120	129	125,443	0,00	0,00
177	DpMors53A/94	185,94	ko(3c)	1,0011	51,3	56,3	132,14	132	0	169,1	131,894	0,00	0,00
178	DpMors54B/95	173,28	juhe-ko(3)	0,9994	50,4	55,4	120,38	132	0	159,4	129,863	0,00	0,00
180	HyHmt16/70	176,9	juhe (22-23, 75-76)	0,9987	22	76	127,9	132	0	151,1	133,649	0,00	0,00
162	37320002	122,8		[1,0]	4,7	4,7	118,1	141	118,1	118,1	122,551	19,81	4,45
31	DpMors40B1/95	138,76	ko(1)8-(2b)	0,9986	52,8	63,8	80,46	141	125,6	125,6	123,175	5,88	2,42
32	DpMors40C/95	138,62	ko(2b)	0,9990	37,3	42,3	98,82	141	125,5	125,6	123,107	5,72	2,39
93	DpMors5z4/90	121,6	ko	1,0668	22	28	96,6	141	123	123	120,518	4,10	2,03
134	HyBeo2b/82	144	ko?	1,0029	22	26	120	141	118	118	117,308	0,00	0,00
77	DpMors54A/95	173,14	ko(2b)	0,9984	128,7	133,7	41,94	142	136,4	136,4	128,599	60,85	7,80
104	DpMors64A/95	178,51	ko(3a-b)	1,0003	82,8	92,8	90,71	142	132,8	132,8	128,163	21,47	4,63
101	DpMors61C/95	167,69	ko(2b)	0,9985	47,4	52,4	117,79	142	130,4	130,4	130,776	0,14	0,38
142	HyHmt31/80	173,8	ko(2bu): 30-34, 36-38; ko(2b)u: 40-42; ko(2a): 45-47; 54-56; ko(2a), ko (1)9: 60-62; ko(1)8: 70-74; ko(2b)? : 96-100; ko(1)6: 107-111; ko(1)5: 116-120.	0,9985	30	42	137,8	143 (2)	137	1000	126,062	63,02	7,94
141	HyHmt30/79	178,9	ko2(b) (48-50, 52-54), ko(2a), ko(1)8,9 (62-64, 68-74, 79-83)	0,9984	48	54	127,9	143	138,5	1000	127,956	56,91	7,54
100	DpMors61B/95	167,49	ko(1)8	0,9988	90,5	95,5	74,49	143	125,6	125,6	127,981	5,67	2,38
144	HyHmtCI II/73	139,7	ko(2b), ko(1)6)	0,9987	51	176	26,2	143	118	123	123,658	0,43	0,66
97	DpMors60B/95	169,75	ko(1)8	0,9991	70,6	75,6	96,65	143	127,3	127,3	127,014	0,08	0,29
140	HyHmt29/80	178,8	ko(1) (94-96, 98-104, 109-111, 113-117, 125-127, 130-132 )	0,9987	94	132	65,8	144	121,9	121,9	126,805	24,06	4,91
98	DpMors61A/95	167,46	ko(1)5	0,9986	132,2	137,2	32,76	144	120,8	120,8	125,591	22,95	4,79
13	DpMors35A/95	139,04	ko(1)	0,9987	65,6	75,6	68,44	144	121,9	121,9	126,119	17,80	4,22
96	DpMors60A/95	169,61	ko(1)6-7	0,9985	102,5	109,5	63,61	144	121,8	121,8	125,949	17,22	4,15
139	HyHmt28/79	174,2	ko(1)4-5 (125-129), ko(1)4 (131-135), ko(1)2 (145-149), ko(1)1 (162-166, 182-184)	0,9987	125	184	19,7	144	122,2	122,2	126,287	16,70	4,09

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion

Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						R42 1022 Iterationen		
	Meßstelle	Bohran-satz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall			K-Klasse	Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechen-Wert mNN	Ziel-funktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert, gewichtet
					Tiefe, m	Höhe mNN	Zentrum		min	max.			
99	DpMors61A/95T1	167,46	ko (10,0) kf >1E-3	1	128	138	34,46	144	120	124	125,591	2,53	1,59
9	DpMors3/89T2	159,9	ko (25,0)	0,999	171	196	-23,6	144	0	147	127,748	0,00	0,00
7	DpMors12z/90	135,33	ko(1)5	0,9989	52	58	80,33	145	117,9	117,9	124,833	48,07	6,93
4	DpMors12/90T1	148	ko (25,7) kf 1E-4	1	45	70,7	90,15	145	132	132	126,664	28,48	5,34
135	HyBeo3b/82	123	ko1?	1,0013	42	57	73,5	145	116	119	123,829	23,16	4,81
138	HyHmt1 1/70	132,4	ko(1)5 (56-57m, 64-65m)	0,9987	56	65	71,9	145	123,1	123,1	126,552	11,92	3,45
83	DpMors55C/95	161,95	ko(1)7	0,9988	49,5	59,5	107,45	145	125,6	125,6	129,001	11,57	3,40
87	DpMors56A/94T3	155,47	ko (6,2) kf >3E-6	1	95	101,2	57,37	145	129	131	125,925	9,46	3,08
82	DpMors55B/95	162,18	ko(1)2-3	0,9990	110,7	120,7	46,48	145	126,3	126,3	128,459	4,66	2,16
88	DpMors56B/95	155,28	ko(1)8 = koM	1,0022	31,3	36,3	121,48	145	124,8	124,8	126,658	3,41	1,85
84	DpMors56A/94	155,47	ko(1)2-3	0,9989	95,3	100,3	57,67	145	127,6	127,6	125,927	2,80	1,67
64	DpMors4z/89	159,27	ko(1)4	0,9989	42	48	114,27	145	126,9	126,9	128,242	1,80	1,34
86	DpMors56A/94T2	155,47	ko (20,0) kf 2E-7	1	50	70	95,47	145	127	131	126,249	0,56	0,75
73	DpMors52A/95T1	160,63	ko(14,1), kf 3E-8	1	46	60,1	107,58	145	0	130	130,514	0,26	0,51
179	DpMors56A/94T4	155,47	ko (6,2) kf > 3E-8	0,9999	26	32,2	126,37	145	0	133	126,584	0,00	0,00
10	DpMors3/89T3	159,9	kmSM, kmGo (52,3 8,5) kf 1E-7	1,031	305,7	366,5	-176,2	146	137	139	127,743	72,41	8,51
27	DpMors4/89T3	158,72	kmSM (30,2) kf 1E-9	1,034	244,8	275,0	-101,18	146	134	134	127,763	32,29	5,68
72	DpMors52A/95	160,63	ko(1)-kmSM	1,0246	114,6	124,6	41,03	146	125,5	125,5	129,997	17,73	4,21
26	DpMors4/89T2	158,72	kmSM (25,6) kf 3E-7	1,026	174,4	200	-28,48	146	132	132	127,790	15,42	3,93
5	DpMors12/90T2	148	kmSM (32,0) kf 1E-7	1,012	103	135	29	146	130	130	126,374	12,36	3,52
89	DpMors57A/95	128,35	ko(2b)	0,9993	34,5	39,5	91,35	146	119,8	119,8	123,267	12,02	3,47
25	DpMors4/89T1	158,72	kmSM (22,0) kf 2E-7	1,013	103	125	44,72	146	131	131	127,949	8,70	2,95
11	DpMors34A/95	133,6	ju-ko	0,9987	32,4	44,4	95,2	146	118,5	118,5	115,623	8,28	2,88
75	DpMors52A/95T4	160,63	ko, kmSM (10,3 40,0) 1E-7	1,1	110	160,3	25,48	146	125	127	129,899	4,20	2,05
70	DpMors51B/95	138,65	kmSM	1,0340	109,6	124,6	21,55	146	126	129	124,131	2,90	1,70
16	DpMors37A/95	132,37	kmSM	0,9996	76,6	79,6	54,27	146	127,4	127,4	126,211	1,41	1,19
20	DpMors37B/95	132,33	kmSM	0,9989	29,3	36,3	99,53	146	125,1	125,1	126,260	1,35	1,16
69	DpMors51A/95T5	138,6	kmSM (29,9) kf 1E-6	1	38,9	68,8	84,75	146	125	127	124,032	0,94	0,97
81	DpMors55A/95T4	162,15	kmSM (53,1) kf 1E-6	1,00232	171,5	224,6	-35,9	146	116	127	127,959	0,91	0,95

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion (Seite 2)

Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion					R42 1022 Iterationen			
	Meßstelle	Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall			Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechenwert mNN	Zielfunktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert, gewichtet	
					Tiefe, m	Höhe mNN	K-Klasse	min	max.				
40	DpMors43A/95	122,96	kmSM.TZ	1,0173	86,3	96,3	31,66	146	118,4	118,4	119,326	0,78	0,88
68	DpMors51A/95T4	138,6	kmSM (29,9) kf 3E-6	1,03	84,6	114,5	39,05	146	125	127	124,048	0,77	0,88
80	DpMors55A/95T2	162,15	kmSM (16,6) kf 7E-6	1,02424	250,5	267,1	-96,65	146	121	127	127,813	0,58	0,76
71	DpMors51C/95	138,3	kmSM	1,0270	48,6	63,6	82,2	146	124,7	124,7	124,095	0,32	0,56
2	DpMors10z/89	134,65	kmSM (9-13, 16-22)	[1,0]	9	22	119,15	146	126,6	126,6	127,085	0,24	0,49
85	DpMors56A/94T1	155,47	kmSM (20,1) 2E-8	0,9999	145	165,1	0,42	146	126	130	125,623	0,14	0,38
17	DpMors37A/95T2	132,37	kmSM (40,0) < 2E-10	1,012	137	177	-24,63	146	125	129	126,119	0,00	0,00
18	DpMors37A/95T3	132,37	kmSM (40,0) < 2E-7	1,025	66,5	106,5	45,87	146	126	128	126,197	0,00	0,00
42	DpMors43A/95T2	122,96	kmSM (40,0) kf 8E-10	1,04	148	188	-45,04	146	0	135	120,151	0,00	0,00
43	DpMors43A/95T3	122,96	kmSM (40,0) kf 3E-8	1,0235	105	145	-2,04	146	0	133	119,858	0,00	0,00
44	DpMors43A/95T4	122,96	ko, kmSM (7,4 32,6) kf 8E-7	1,01	62	102	40,96	146	116	120	119,130	0,00	0,00
1	DpMors10/88T2	135,2	kmS (36,0) kf 1E-7	1,015	120	130	10,2	147	130	130	126,000	14,80	3,85
6	DpMors12/90T3	148	kmSM,kmGo (15,4 15,7), kf 1E-12	1,1	253,9	285	-121,45	147	0	143	125,982	0,00	0,00
66	DpMors51A/95T2	138,6	kmGo (29,9) kf <1E-11	1,1	181,1	211	-57,45	147	0	138	122,447	0,00	0,00
67	DpMors51A/95T3	138,6	kmGo (29,9) kf 2E-11	1,04	135	164,9	-11,35	147	0	131	123,608	0,00	0,00
76	DpMors52A/95T5	160,63	kmGo (16,2) <1E-11	1,2	297	313,2	-144,47	147	121	1000	127,217	0,00	0,00
78	DpMors55A/95	162,15	kmS	1,1832	401,7	411,7	-244,55	150	136	142	122,687	14,89	3,86
74	DpMors52A/95T2	160,63	kmS (9,1) kf 6E-8	1,1836	370	379,1	-213,92	150	129	133	123,226	2,73	1,65
79	DpMors55A/95T1	162,15	kmS (17,1) kf 1E-7	1,1993	397	414,1	-243,4	150	135	139	122,687	0,53	0,73
12	DpMors34A/95T2	133,6	kmS (50,0) kf 1E-10	1,02	169	219,2	-60,5	150	0	130	118,289	0,00	0,00
176	DpMors51A/95T1	138,6	kmGo,kmS,kmGu (9,3 43,4 7,3) kf 1E-8	1,0317	211	271	-102,4	152	0	114	121,420	0,00	0,00
122	DpMors74B/94	114,15	q	0,9991	8,7	10,7	104,45	210	119,7	119,7	113,913	17,75	4,21
160	HyMors9/83	108,6	q	0,9994	38	38	70,6	210	106,6	106,6	109,850	10,56	3,25
161	37320001	112,8		[1,0]	1,6	1,6	111,2	210	111,2	111,2	114,111	8,47	2,91
154	HyMors2/83	107,1	q	0,9992	5	9	100,1	210	106,1	106,1	108,629	6,40	2,53
156	HyMors4/83	121,4	q	0,9991	26	30	93,4	210	114,7	114,7	112,180	6,35	2,52
65	DpMors50B/95	124,69	ko(2,3)	1,0321	15,3	20,3	106,89	210	119,3	119,3	116,597	6,13	2,48

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion (Seite 3)

Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion					R42 1022 Iterationen			
	Meßstelle	Bohran-satz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall			Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechen-Wert mNN	Ziel-funktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert, gewichtet	
					Tiefe, m	Höhe mNN	K-Klasse	min	max.				
109	DpMors67B/95	114,08	q	0,9998	12,3	14,3	100,78	210	112,1	112,1	114,467	5,60	2,37
39	DpMors42B/95	111,52	q	1,0020	4,4	6,4	106,12	210	110	110	112,019	4,04	2,01
111	DpMors68B/95	112,44	q	1,0033	4,4	6,4	107,04	210	111,4	111,4	113,383	3,87	1,97
117	DpMors72A/95	112,12	q	1,0000	27,6	29,6	83,52	210	110,4	110,4	112,079	2,82	1,68
49	DpMors44B/94	110,91	q	1,0000	8,2	10,2	101,71	210	109,4	109,4	110,787	1,92	1,39
103	DpMors63A/95	117,84	t	0,9989	6,4	8,4	110,44	210	112,9	112,9	114,134	1,52	1,23
116	DpMors71B/94	116,87	q	0,9992	9,4	11,4	106,47	210	113,6	113,6	114,646	1,09	1,05
113	DpMors69B/95	119,42	q	0,9990	19,4	21,4	99,02	210	114,3	114,3	115,270	0,94	0,97
63	DpMors49B/95	119,96	q	0,9999	68,6	72,6	49,36	210	114	114	114,865	0,75	0,86
155	HyMors3/83	108,5	q	1,0002	14	18	92,5	210	107,9	107,9	108,657	0,57	0,76
15	DpMors36B/95	124,78	q	0,9992	8,5	10,5	115,28	210	116,5	116,5	115,890	0,37	0,61
45	DpMors43B/95	123,07	q	0,9990	28,4	30,4	93,67	210	118	118	117,435	0,32	0,57
24	DpMors38D/95	120,27	q	0,9988	11,4	13,4	107,87	210	114,6	114,6	115,013	0,17	0,41
107	DpMors66A/95	117,29	krWa	0,9993	16,4	18,4	99,89	221	113,2	113,2	116,384	10,14	3,18
102	DpMors62A1/94	132,68	krWA	0,9988	25,3	30,3	104,88	221	114	114	117,075	9,45	3,07
14	DpMors36A/95	124,54	krWa	0,9986	53,6	57,6	68,94	221	114,9	114,9	115,644	0,55	0,74
23	DpMors38C/95	120,24	krWa	1,0050	42,4	47,4	75,34	221	114,5	114,5	114,950	0,20	0,44
95	DpMors6/90	115,1	krALo+cr	1,0033	112	118	0,1	222	111,7	111,7	114,824	9,60	3,10
110	DpMors68A/95	112,46	krALo	0,9987	59,5	63,5	50,96	222	111	111	114,033	9,20	3,03
105	DpMors65A/95	113,24	krALo	0,9991	9,2	12,2	102,54	222	112	112	114,969	8,81	2,97
108	DpMors67A/95	113,99	krALo	0,9990	63,6	67,6	48,39	222	111,9	111,9	114,325	5,88	2,42
125	DpMors86A/95	136,5	krWA	0,9989	50,6	50,6	85,9	222	114,4	114,4	116,612	4,89	2,21
133	HyBeo2/82	122,6	krWA	1,0002	22	22	100,6	222	114,4	114,4	115,567	1,36	1,17
132	HyBeo1/82	119	krWA	1,0003	22	22	97	222	114,5	114,5	115,467	0,93	0,97
94	DpMors5z5/90	118,1	q,kroWa	0,9985	54	54	64,1	222	114,6	114,6	115,402	0,64	0,80
22	DpMors38B/95	120,14	krALo	1,0164	112,7	117,7	4,94	222	115,5	115,5	114,927	0,30	0,55
62	DpMors49A/95	119,99	krALo	0,9997	102,4	107,4	15,09	222	114,3	114,3	114,814	0,26	0,51
112	DpMors69A/95	119,26	krALo	0,9986	84,5	89,5	32,26	222	114,7	114,7	115,083	0,15	0,38
115	DpMors71A/94	117,04	krALo	0,9985	26,6	30,6	88,44	222	114,3	114,3	114,608	0,09	0,31

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion (Seite 4)



Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion					R42 1022 Iterationen			
	Meßstelle	Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall			Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechenwert mNN	Zielfunktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert	
					Tiefe, m	Höhe mNN	K-Klasse	min	max.				
					OK	UK	Zentrum	Zentrum					
121	DpMors74A/94	114	krALo	0,9998	44,5	48,5	67,5	222	114,5	114,5	114,224	0,08	0,28
136	HyBeo4/82	114,8	krWA	1,0007	23	23	91,8	222	114,1	114,1	114,317	0,05	0,22
131	HyBeo(6)/78	115,3	q.kro	1,0018	24	32	87,3	222	114,4	114,4	114,513	0,01	0,11
174	DpMors2/89	112,1	cr	1,0021	43	47	67,1	223	110,3	110,3	113,770	9,33	3,05
92	DpMors5z3/90	117,9	krALo	0,9992	132	132	-14,1	223	114,6	114,6	115,071	0,22	0,47
30	DpMors40A/95T4	138,29	j (14,5) kf 3E-7	1,1	92	106,5	39,04	233	132	142	122,783	42,48	6,52
61	DpMors47A/95	131,48	ju	1,0057	112,8	117,8	16,18	233	119	119	120,145	1,27	1,13
21	DpMors38A/94	120,4	krALo	1,0290	181,5	181,5	-61,1	233	115,7	115,7	115,026	0,39	0,62
91	DpMors5z1/90T1	120	j (26,3) kf 6E-8	1	50	76,3	56,85	233	117	117	117,370	0,14	0,37
28	DpMors40A/95T1	138,29	j, cr (41,0 7,2) kf 4E-10	1,03	215,8	264	-101,61	233	120	140	122,536	0,00	0,00
29	DpMors40A/95T2	138,29	j, cr (149,0 7,2) kf 1E-9	1,03	107,8	264	-47,61	233	0	152	122,676	0,00	0,00
90	DpMors59A/94	137,28	jm	0,9986	24,3	29,3	110,48	235	128	128	127,382	0,38	0,62
59	DpMors46A/95T4	107,79	kmSM (30,0) kf 3E-10	1,01	139,3	169,3	-46,51	245	103	109	108,734	0,00	0,00
56	DpMors46A/95	107,79	kmSM	1,0000	73,5	78,5	31,79	246	105	105	108,695	13,65	3,69
150	HyMors14/83	102,8	kmSM	0,9988	7	11	93,8	246	101,7	101,7	104,906	10,28	3,21
151	HyMors15/83	100,9	ko	0,9985	19	23	79,9	246	100	100	102,400	5,76	2,40
149	HyMors11/83	107,8	q-kmSM	0,9986	14	18	91,8	246	106,1	106,1	108,240	4,58	2,14
50	DpMors45A/94T1	130,3	kmSM (10,1) kf 2E-8	1	75	85,1	50,25	246	125	127	122,959	4,17	2,04
8	DpMors14/89T1	113,7	kmSM (26,0) kf 1E-8	1,1	124	150	-23,3	246	114	114	111,173	4,00	2,00
51	DpMors45A/94T2	130,3	kmSM (10,1) kf 2E-6	1	50	60,1	75,25	246	125	127	123,099	3,61	1,90
157	HyMors5/83	106,8	kmSM	1,0016	44	48	60,8	246	109,5	109,5	108,138	1,84	1,36
55	DpMors45B/95	130,65	kmSM	0,9994	52,6	62,6	73,05	246	124,3	124,3	123,063	1,53	1,24
158	HyMors6/83	138,6	kmSM	0,9988	21	25	115,6	246	122,5	122,5	121,634	0,75	0,87
60	DpMors46A/95T6	107,79	kmSM (6,1) kf <7E-6	0,99963	90	96,1	14,74	246	102	108	108,700	0,49	0,70
58	DpMors46A/95T3	107,79	kmSM, kmGo (19,4 10,7) kf < 1E-11	1,1	170,6	200,7	-77,86	247	93	121	108,812	0,00	0,00
114	DpMors7/90T2	109,3	kmS (35,8) kf 1E-9	1	114,2	150	-22,8	248	116	116	115,653	0,12	0,35
3	DpMors11/90T1	109,9	q,cr (4,1 41,5) Schlotte bis 80,2 kf 2E-7	1,002	53,2	98,8	33,9	271	119	119	111,846	50,67	7,12
33	DpMors42A1/95	111,57	cr	1,0074	42,6	46,6	66,97	271	110,4	110,4	112,222	3,20	1,79

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion (Seite 5)

Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						R42 1022 Iterationen		
	Meßstelle	Bohransatz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall			Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechenwert mNN	Zielfunktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert, gewichtet	
					Tiefe, m	Höhe mNN	K-Klasse	min	max.				
35	DpMors42A1/95T2	111,57	cr (18,1) kf >5E-6	1,0073	52	70,1	50,52	271	110	112	112,465	0,21	0,46
106	DpMors65A/95T1	113,24	cr (18,2) kf 3E-9	1,0756	198	216,2	-93,86	271	107	115	115,505	0,16	0,40
34	DpMors42A1/95T1	111,57	cr (20,0) kf 3E-5	1,0057	28	48	73,57	271	110	112	112,120	0,01	0,12
19	DpMors37A/95T4	132,37	cr (20,0) < 1E-11	1,03	252	272	-129,63	271	0	150	123,623	0,00	0,00
38	DpMors42A1/95T5	111,57	cr (55,5) kf <3E-11	1,2	70	125,5	13,82	271	0	112	112,953	0,00	0,00
41	DpMors43A/95T1	122,96	kmGo-cr (36,5 23,5) kf 7E-11	1,05	200	260	-107,04	271	118	123	119,790	0,00	0,00
119	DpMors72A/95T3	112,12	cr (35,0) kf <1E-11	1,1	115	150	-20,38	271	105	122	112,585	0,00	0,00
120	DpMors72A/95T4	112,12	cr (35,0) kf <1E-11	1,02	80	115	14,62	271	97	124	112,364	0,00	0,00
175	DpMors47A/95T1	131,48	cr (45,7) kf <3E-10	[>1,1]	224,3	270	-115,67	271	0	154	121,665	0,00	0,00
52	DpMors45A/94T5	130,3	cr (12,1) kf <1E-10	1,1	241	253,1	-116,75	272	127	139	123,109	7,57	2,75
53	DpMors45A/94T6	130,3	cr (12,1) kf 2E-10	1,05	204	216,1	-79,75	272	126	130	123,234	5,74	2,40
48	DpMors44A1/94	110,91	j+cr.	1,0020	40,5	45,5	67,91	272	109,3	109,3	110,962	2,73	1,65
54	DpMors45A/94T7	130,3	cr (12,1) kf 3E-6	1,1943	250	262,1	-125,75	272	126	128	123,092	0,24	0,49
46	DpMors44A/94T1	110,8	cr (10,0) kf 3E-9 .. 1E-7	1,002	45	55	60,8	272	109	111	111,200	0,04	0,20
36	DpMors42A1/95T3	111,57	cr (5,1) kf <1E-11	1,2	245	250,1	-135,98	272	112	1000	113,801	0,00	0,00
37	DpMors42A1/95T4	111,57	cr (5,1) kf 3E-9	1,2	233,5	238,6	-124,48	272	0	126	113,793	0,00	0,00
47	DpMors44A/94T2	110,8	cr (8,0) kf >1E-4	1,0012	36,5	44,6	70,25	272	109	111	111,059	0,00	0,06
57	DpMors46A/95T1	107,79	cr, z (7,8 2,7 (<1E-11))	1,2	239,5	250	-136,96	272	71	1000	109,390	0,00	0,00
118	DpMors72A/95T2	112,12	cr (81,0) kf <1E-11	1,2	169	250	-97,38	272	0	135	112,872	0,00	0,00
166	WTP_z4	121	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	121	310	122	128	125,462	0,00	0,00
170	WTP_z8	134	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	134	310	135	145	144,893	0,00	0,00
171	WTP_z9	134	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	134	310	135	145	139,413	0,00	0,00
172	WTP_z10	144	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	144	310	145	155	154,772	0,00	0,00
173	WTP_z11	134	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	134	361 (2)	135	145	128,929	36,85	6,07
130	DpMors94B/95	147,63	soAN3	1,0002	46,6	56,6	96,03	361	119,3	119,3	125,270	35,60	5,97
126	DpMors9/89	115,71	q-so	1,0001	34	42	77,71	361	117,6	117,6	120,642	9,25	3,04
153	HyMors17/85	134,8	q-so	0,9987	28	34	103,8	361	124,6	124,6	123,882	0,52	0,72
169	WTP_z7	126	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	126	361	127	133	126,724	0,08	0,28
164	WTP_z2	121	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	121	361	122	128	122,618	0,00	0,00
165	WTP_z3	116	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	116	361	117	123	121,425	0,00	0,00
167	WTP_z5	126	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	126	361	127	133	128,000	0,00	0,00

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion (Seite 6)

Nr.	Informationen über Bohrung				Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						R42 1022 Iterationen		
	Meßstelle	Bohran-satz, mNN	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	GW-Dichte g/cm <sup>3</sup> (1)	Meßintervall				Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechen-Wert mNN	Ziel-funktion m <sup>2</sup>	Δh Meßwert-Rechenwert, gewichtet
					Tiefe, m	Höhe mNN	K-Klasse		min	max.			
					OK	UK	Zentrum	Zentrum					
168	WTP_z6	121	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	121	361	122	128	123,694	0,00	0,00
127	DpMors93A/95	111,19	smSW	1,0009	67,8	75,8	39,39	363	120,1	120,1	114,106	35,77	5,98
123	DpMors8/89T1	118,2	so, sm (3,4 23,1) kf 6E-6	1,007	57,7	84,2	47,25	363	117	117	121,777	22,02	4,69
128	DpMors94A/95	147,95	smSW	1,0113	135,7	139,7	10,25	363	120,5		124,997	19,08	4,37
129	DpMors94A/95T1	147,95	sm (15,0) kf 7E-6	1,0097	145	145	2,95	363	118	122	124,997	8,55	2,92
163	WTP_z1	126	Stützstelle Triasplatte	[1,0]	0	0	126	364	127	133	132,676	0,00	0,00
124	DpMors8/89T3	118,2	sm, su (18,6 26,1) kf 2E-10	1,2	180,3	225	-84,45	365	0	146	121,870	0,00	0,00
159	HyMors8/83	111,9	mu	(1,002)	44	44	67,9	381	109	109	113,290	18,41	4,29
148	HyMors1/83	147,3	soP	0,9991	72	76	73,3	381	123,7	123,7	126,221	6,36	2,52
152	HyMors16/85	113,7	kmGo	[1,0]	40	46	70,7	381	112,7	112,7	115,091	5,72	2,39

## Bemerkung

(1) Grundwasserdichte gemäß [12], Anlage 7.2.1 bzw. [8], Anlage 28. (...) abgeleitet aus Leitfähigkeit, [...] angenommener Wert

(2) Abgreifpunkt oberhalb der berechneten Grundwasseroberfläche

Tabelle 13 Kalibrierungsrechnungen R42. Rechenwert, Zielfunktion, Abweichung Meßwert-Rechenwert aller Vergleichspunkte, geordnet nach hydrogeologischen Einheiten (K-Klassen) und Zielfunktion (Seite 7)

	I	II	III	IV	V	
Zielfunktion, m <sup>2</sup>	>25	>9 bis 25 m <sup>2</sup>	>4 bis 9 m <sup>2</sup>	>0 bis 4 m <sup>2</sup>	0 m <sup>2</sup>	
Abweichung Δh, m	>5 m	>3 bis 5 m	>2 bis 3 m	>0 bis 2 m	0 m	
Vorzeichen	+, 0 oder -					
<b>Lappwaldmulde</b>						
L1/131				3 / 1 / - / 2		3 / 1 / - / 2
L2/132				1 / - / - / 1	4 / - / 4 / -	5 / - / 4 / 1
L3a/141		1 / - / - / 1	3 / 3 / - / -		1 / - / 1 / -	5 / 3 / 1 / 1
L3/142	1 / 1 / - / -	1 / 1 / - / -		1 / - / - / 1		3 / 2 / - / 1
L4/143	2 / 2 / - / -			3 / 1 / - / 2		5 / 3 / - / 2
L5-K2/144		5 / - / - / 5		1 / - / - / 1	1 / - / 1 / -	7 / - / 1 / 6
L5-K1/145	2 / 1 / - / 1	4 / 1 / - / 3	1 / - / - / 1	5 / 2 / - / 3	1 / - / 1 / -	13 / 4 / 1 / 8
L6/146	2 / 2 / - / -	4 / 2 / - / 2	3 / 2 / - / 1	11 / 6 / - / 5	5 / - / 5 / -	25 / 12 / 5 / 8
L7-K1/147		1 / 1 / - / -			4 / - / 4 / -	5 / 1 / 4 / -
L8-K2/150		1 / 1 / - / -		2 / 2 / - / -	1 / - / 1 / -	4 / 3 / 1 / -
L8-K3/152					1 / - / 1 / -	1 / - / 1 / -
<b>Insgesamt</b>	<b>6 / 5 / - / 1</b>	<b>17 / 6 / - / 11</b>	<b>7 / 5 / - / 2</b>	<b>27 / 12 / - / 15</b>	<b>18 / - / 18 / -</b>	<b>75 / 28 / 18 / 29</b>
%	8	23	9	36	24	100
<b>Allertalzone</b>						
A1-A4/210		2 / 1 / - / 1	6 / 2 / - / 4	11 / 2 / - / 9		19 / 5 / - / 14
A5/221		2 / - / - / 2		2 / - / - / 2		4 / - / - / 4
A6/222		2 / - / - / 2	3 / - / - / 3	10 / - / - / 10		15 / - / - / 15
A7/223		1 / - / - / 1		1 / - / - / 1		2 / - / - / 2
A8-K1/233	1 / 1 / - / -	3 / 1 / - / 2		3 / 1 / - / 2	2 / - / 2 / -	6 / 2 / 2 / 2
A8-K3/235				1 / 1 / - / -		1 / 1 / - / -
A9-K1/245					1 / - / - / 1	1 / - / - / 1
A9-K2/246		2 / - / - / 2	3 / 1 / - / 2	6 / 5 / - / 1		11 / 6 / - / 5
A10/247					1 / - / 1 / -	1 / - / 1 / -
A11/248				1 / 1 / - / -		1 / 1 / - / -
A13-K1/271-272	1 / 1 / - / -		2 / 2 / - / -	7 / 1 / - / 6	11 / - / 11 / -	21 / 4 / 11 / 6
<b>Insgesamt</b>	<b>2 / 2 / - / -</b>	<b>9 / 1 / - / 8</b>	<b>14 / 5 / - / 9</b>	<b>42 / 11 / - / 31</b>	<b>15 / - / 15 / -</b>	<b>82 / 19 / 15 / 48</b>
%	3	11	17	51	18	100
<b>Weferlinger Triasplatte</b>						
T1-K1/310				1 / - / - / 1	4 / - / 4 / -	5 / - / 4 / -1
T2-K1/361	2 / 1 / - / 1	1 / - / - / 1		1 / 1 / - / -	4 / - / 4 / -	8 / 2 / 4 / 2
T3/363	1 / 1 / - / -	3 / - / - / 3				4 / 1 / - / 3
T4/364					1 / - / 1 / -	1 / - / 1 / -
T5/365					1 / - / 1 / -	1 / - / 1 / -
T7/381		1 / - / - / 1	2 / - / - / 2			3 / - / - / 3
<b>Insgesamt</b>	<b>2 / 1 / - / 1</b>	<b>5 / - / - / 5</b>	<b>2 / - / - / 2</b>	<b>2 / 1 / - / 1</b>	<b>10 / - / 10 / -</b>	<b>21 / 2 / 10 / 9</b>
%	10	23	10	10	47	100

1 / - / - / 1: Gesamtzahl / positive Werte / Wert 0 / negative Werte

Tabelle 14 Kalibrierungsrechnungen R42. Verteilung der Abweichungen Meßwert-Rechenwert auf die Einheiten Lappwald, Allertal und Triasplatte

Nr.	Informationen über Bohrung		Werte für Kalibrierung und Berechnung der Zielfunktion						R42 (1022 Iterationen)			
	Meßstelle	Kurzbezeichnung Stratigraphie [12] Tab. 3.5 und Anl. 10	Meßintervall			Meßwerte zur Berechnung der Zielfunktion, mNN		Rechenwert mNN	Zielfunktion m <sup>2</sup>	h diff Meßwert-Rechenwert, gewichtet		
			Tiefe, m		Höhe mNN	K-Klasse						
			OK	UK	Zentrum	Zentrum	min					max.
162	37320002		4,7	4,7	118,1	<b>141</b>	118,1	118,1	122,551	<b>19,81</b>	<b>4,45</b>	-
77	DpMors54A/95	ko(2b)	128,7	133,7	41,94	<b>142</b>	136,4	136,4	128,599	<b>60,85</b>	<b>7,80</b>	+
104	DpMors64A/95	ko(3a-b)	82,8	92,8	90,71	<b>142</b>	132,8	132,8	128,163	<b>21,47</b>	<b>4,63</b>	+
142	HyHmt31/80	ko(2bu): 30-34, 36-38; ko(2b)u: 40-42; ko(2a): 45-47; 54-56; ko(2a), ko(1)9: 60-62; ko(1)8: 70-74; ko(2b)?: 96-100; ko(1)6: 107-111; ko(1)5: 116-120.	30	42	137,8	<b>143 (1)</b>	137	1000	126,062	<b>63,02</b>	<b>7,94</b>	+
141	HyHmt30/79	ko2(b) (48-50, 52-54), ko(2a), ko(1)8,9 (62-64, 68-74, 79-83)	48	54	127,9	<b>143</b>	138,5	1000	127,956	<b>56,91</b>	<b>7,54</b>	+
140	HyHmt29/80	ko(1) (94-96, 98-104, 109-111, 113-117, 125-127, 130-132)	94	132	65,8	<b>144</b>	121,9	121,9	126,805	<b>24,06</b>	<b>4,91</b>	-
98	DpMors61A/95	ko(1)5	132,2	137,2	32,76	<b>144</b>	120,8	120,8	125,591	<b>22,95</b>	<b>4,79</b>	-
13	DpMors35A/95	ko(1)	65,6	75,6	68,44	<b>144</b>	121,9	121,9	126,119	<b>17,80</b>	<b>4,22</b>	-
96	DpMors60A/95	ko(1)6-7	102,5	109,5	63,61	<b>144</b>	121,8	121,8	125,949	<b>17,22</b>	<b>4,15</b>	-
139	HyHmt28/79	ko(1)4-5 (125-129), ko(1)4 (131-135), ko(1)2 (145-149), ko(1)1 (162-166, 182-184)	125	184	19,7	<b>144</b>	122,2	122,2	126,287	<b>16,70</b>	<b>4,09</b>	+
7	DpMors12z/90	ko(1)5	52	58	80,33	<b>145</b>	117,9	117,9	124,833	<b>48,07</b>	<b>6,93</b>	-
4	DpMors12/90T1	ko (25,7) kf 1E-4	45	70,7	90,15	<b>145</b>	132	132	126,664	<b>28,48</b>	<b>5,34</b>	+
135	HyBeo3b/82	ko1?	42	57	73,5	<b>145</b>	116	119	123,829	<b>23,16</b>	<b>4,81</b>	-
10	DpMors3/89T3	kmSM,kmGo (52,3 8,5) kf 1E-7	305,7	366,5	-176,2	<b>146</b>	137	139	127,743	<b>72,41</b>	<b>8,51</b>	+
27	DpMors4/89T3	kmSM (30,2) kf 1E-9	244,8	275,0	-101,18	<b>146</b>	134	134	127,763	<b>32,29</b>	<b>5,68</b>	+
72	DpMors52A/95	ko(1)-kmSM	114,6	124,6	41,03	<b>146</b>	125,5	125,5	129,997	<b>17,73</b>	<b>4,21</b>	-
122	DpMors74B/94	q	8,7	10,7	104,45	<b>210</b>	119,7	119,7	113,913	<b>17,75</b>	<b>4,21</b>	+
30	DpMors40A/95T4	j (14,5) kf 3E-7	92	106,5	39,04	<b>233</b>	132	142	122,783	<b>42,48</b>	<b>6,52</b>	+
3	DpMors11/90T1	q,cr (4,1 41,5) Schlotte bis 80,2 kf 2E-7	53,2	98,8	33,9	<b>271</b>	119	119	111,846	<b>50,67</b>	<b>7,12</b>	+
173	WTP_z11	Stützstelle Triasplatte	0	0	134	<b>361 (1)</b>	135	145	128,929	<b>36,85</b>	<b>6,07</b>	+
130	DpMors94B/95	soAN3	46,6	56,6	96,03	<b>361</b>	119,3	119,3	125,270	<b>35,60</b>	<b>5,97</b>	-
127	DpMors93A/95	smSW	67,8	75,8	39,39	<b>363</b>	120,1	120,1	114,106	<b>35,77</b>	<b>5,98</b>	+
123	DpMors8/89T1	so, sm (3,4 23,1) kf 6E-6	57,7	84,2	47,25	<b>363</b>	117	117	121,777	<b>22,02</b>	<b>4,69</b>	-
128	DpMors94A/95	smSW	135,7	139,7	10,25	<b>363</b>	120,5		124,997	<b>19,08</b>	<b>4,37</b>	-
159	HyMors8/83	mu	44	44	67,9	<b>381</b>	109	109	113,290	<b>18,41</b>	<b>4,29</b>	-

(1) Abgreifpunkt oberhalb der berechneten Grundwasseroberfläche

Tabelle 15 R42 (1022 Iterationen). Vergleichspunkte mit Beiträgen zur Zielfunktion  $\geq 16 \text{ m}^2$  bzw. Abweichung | Meßwert-Rechenwert |  $\geq 4,0 \text{ m}$

	R43, mit Grundwasserentnahme		R44, ohne Grundwasserentnahme	
	Grundwasseroberfläche	Potential in den Knoten der Entnahmebrunnen (Tabelle 17) bzw. im oberflächennahen Grundwasser am Ort der Bohrung	Grundwasseroberfläche	Potential in den Knoten der Entnahmebrunnen bzw. im oberflächennahen Grundwasser am Ort der Bohrung
	mNN	mNN	mNN	mNN
<b>Grundwasseroberfläche</b> (R43: Abbildung 50, R44: Abbildung 64)				
Weferlinger Triasplatte	E-Ecke des Modells = 159		E-Ecke des Modells = 159	
Allertal	Modell-Südrand 113 Modell- Nordrand 94,8		Modell-Südrand 113 Modell- Nordrand 94,8	
Lappwald	N-Ecke = 151, Zentrum = 132, S-Ecke = 137		N-Ecke = 163, Zentrum = 135, S-Ecke = 138	
Verbreitungsgebiet L2/132 (L3/142, L4/143 (entlang Modellgrenze)	151 – 123	Adam & Eva (Ort der Bohrung) = 123	162 – 134	Adam & Eva (Ort Bohrung) = 150
Verbreitungsgebiet L1/131	147 – 122	Halbmeilenberg = 140,16 Quellenhof = 122,08-123,85 Waldfrieden Br. II = 120,13 –122,65 Adam & Eva = 120,39-121,28 Burgberg (Ort Bohrung) = 124,5	158 – 144	Halbmeilenberg = 156,41 Quellenhof = 149,93-151,40 Waldfrieden Br. II = 149,48-149,72 Adam & Eva = 149,87 Burgberg (Ort Bohrung) = 150
Verbreitungsgebiet L2/132	144 – 124	Clarabad Br. II (Ort der Bohrung) = 124	154 – 132	Clarabad Br. II (Ort Bohrung) = 135
Verbreitungsgebiet L3/142	133 – 124	Clarabad Br. II (Ort der Bohrung) = 124	138 – 129	Clarabad Br. II (Ort Bohrung) = 135
Verbreitungsgebiet L4/143 bis Talsohle Allertal	132 bis ca. 105	Brunnen 8 (L3a/141) = 97,29-101,04	138 bis ca. 105	Brunnen 8 = 125,47-128,32
<b>Basis von Modelleinheiten</b> (R43: Abbildung 54 bis Abbildung 56, R44: Abbildung 72 bis Abbildung 74)				
Basis L3/142, Mittelrhät- Sandstein	133 – 124 Brunntental 124, W Morsleben 128	Burgberg = 123,51 Clarabad Br. II = 121,67	140 – 130 Brunntental 132, W Morsleben 130	Burgberg = 131,23 Clarabad Br. II = 133,55
Basis L5/144-145 Unterrhät	L5-K2/144: 127-125 L5-K1/145: 131-117	Clarabad Br. II = 125,56	L5-K2/144: 131 – 127 L5-K1/145: 134 – 119	Clarabad Br. II = 129,92
Basis L8/150-151-152	127 – 119		130 – 122	

Tabelle 16 Rechenfälle R43 und R44. Grundwasserhöhen im oberflächennahen Grundwasser und in Aquiferen des Lappwaldes

Entnahme- knoten	K-Klasse, hydrostratigraphische Einheit	Rechenwert Potential		Differenz R44 - R43
		R43	R44	
		mNN	mNN	m
<b>Bu – Burgberg</b>				
322309	L3/142, L4/143 (1)	123,51	131,23	7,72
<b>Quh – Quellenhof</b>				
305525	L1/131	122,80	150,67	27,87
305527	L1/131	124,93	151,26	26,33
305528	L1/131	123,79	150,96	27,17
305529	L1/131	122,08	150,55	28,47
305530	L1/131	122,58	150,71	28,13
305531	L1/131	123,25	150,77	27,52
305722	L1/131	122,55	150,62	28,07
305756	L1/131	126,13	151,40	25,27
305757	L1/131	124,53	150,96	26,43
305804	L1/131	122,95	150,35	27,40
305836	L1/131	123,85	149,93	26,08
305837	L1/131	123,17	150,01	26,84
306093	L1/131	122,51	150,48	27,97
306154	L1/131	122,30	150,62	28,32
<b>WA II – Waldfrieden Br. II</b>				
320627	L1/131	122,65	149,66	27,01
320629	L1/131	121,48	149,68	28,20
320652	L1/131, L2/132 (1)	122,05	149,77	27,72
320659	L1/131	122,05	149,75	27,7
320666	L1/131	120,79	149,63	28,84
320668	L1/131	120,13	149,62	29,49
320669	L1/131	121,38	149,70	28,32
320671	L1/131	121,24	149,57	28,33
320672	L1/131	120,92	149,58	28,66
320779	L1/131	121,81	149,70	27,89
320781	L1/131	121,01	149,65	28,64
328531	L1/131	121,66	149,48	27,82
328633	L1/131	120,76	149,57	28,81
<b>A+E – Adam &amp; Eva</b>				
328654	L1/131, L2/132 (1)	120,39	149,87	29,48
328658	L1/131, L2/132 (1)	121,28	149,87	28,59
<b>CI II – Clarabad Br. II</b>				
329646	L3/142	121,67	133,55	11,88
330512	L5-K2/144, L4/143 (1)	125,56	129,92	4,36
<b>Ha – Halbmeilenberg</b>				
305497	L1/131	140,16	156,41	16,25
<b>Hy Beo 1b – Brunnen 8</b>				
327282	L3a/141, L5-K1/145, L6/146 (1)	97,29	128,32	31,03
335333	L3a/141, L6/146 (1)	100,25	127,82	27,57
326928	L3a/141, L6/146 (1)	100,27	127,27	27,00
327799	L3a/141, L6/146 (1)	101,04	126,35	25,31
335001	L3a/141, L6/146 (1)	99,03	126,93	27,90
325966	L3a/141, L6/146 (1)	98,66	125,47	26,81

(1) Knoten befindet sich an Grenzfläche zwischen 2 oder 3 K-Klassen

Tabelle 17 Rechenfälle R43 und R44. Potential in den Entnahmeknoten der Brunnen

<b>A. Grundwasserneubildung ermittelt mit verschiedenen Methoden</b>				
Methode	Fläche	Mittlere GWN	Flüsse	
	km <sup>2</sup>	mm/a	m <sup>3</sup> /a	l/s
A1. MoMNQ zwischen Alleringersleben und Walbeck, 1972-1995, mit Korrektur Brunnenentnahme	58,0	126		
A2. NASIM zwischen Alleringersleben und Walbeck, 1988-1995, Einleitung und Entnahmen korrigiert	58,6	117		
A3. Bodenwasserhaushalt Alleringersleben bis südlich Schwanefeld, 492 Beobachtungseinheiten	50,08	rund 80		
A4. GWD, Modell GWD_4, Alleringersleben bis Walbeck, Raster 250x250 m (rund 950 Rasterflächen)	58,0	87		
<b>B. Vorgabe der Grundwasserneubildung für das Modell mit freier Oberfläche</b>				
B1. Vorgabe GWD	58,62	87,8	5 146 836	163,2
B2. Nach dem Kriging und Klassierung. Vorgabe im Modell mit freier Oberfläche, <b>Rechenfall R44</b>	58,62	85,2	4 994 424	158,4
B2 <sup>bis</sup> . Vorgabe im Modell mit freier Oberfläche, <b>Rechenfall R43</b> , inkl. Erhöhung der Infiltration im Brunntal von 55 mm/a auf 95 mm/a (2,81 km <sup>2</sup> , 112500 m <sup>3</sup> /a, 3,6 l/s	58,62	87,1	5 106 924	161,9
<b>C. Vorgabe für die Grundwasserentnahme Brunntal (Rechenfall R43)</b>				
Gesamtentnahme in den Brunnen Burgberg, Quellenhof, Waldfrieden Br. II, Clarabad Br. II, Halbmeilenberg, Brunnen 8			986 664	31,287
<b>D. Randlicher Zu- und Abfluß in Quartär und Oberkreide des Allertals (Rechenfälle R43, R44)</b>				
D1. Randlicher Zufluß Allertal Süd in Quartär und Oberkreide			14 445	0,46
D2. Randlicher Abfluß Allertal Nord aus Quartär und Oberkreide			-150 487	-4,77
<b>E. Randzufluß Lappwald (Rechenfall R43)</b>				
Randzufluß Lappwald, kalibrierter Wert R42, 1022 Iterationen			268 687	8,52
<b>F. Berechnete Zu- und Abflüsse (nodale Flüsse)</b>				
	R43		R44	
	m <sup>3</sup> /a	l/s	m <sup>3</sup> /a	l/s
<i>F1 Zuflüsse, Infiltrationen</i>				
F1.1 Aus Fixpotentialen (Aller)	249	0,008	7'873	0,25
F1.2 Zuflüsse durch Elemente mit frei berechnetem Grundwasserpotential: Zuflüsse an Modelloberfläche (ohne seitlichen Zufluß Lappwald und Allertal)	4 952 779	157,05	4'837'386	153,39
F1.3 Randlicher Zufluß Allertal Süd in Quartär und Oberkreide	14 445	0,46	14'445	0,46
F1.4 Randzufluß Lappwald	268 687	8,52	0	0
<b>F1.1 bis F1.4 Gesamte Infiltration</b>	<b>5'236'160</b>	<b>166,04</b>	<b>4'859'704</b>	<b>154,10</b>
<i>F2 Abflüsse, Exfiltrationen</i>				
F2.1 An Fixpotentialen (Aller)	-866'477	-27,48	-738 923	- 23,43
F2.2 Exfiltration an Geländeoberfläche	-3'096'144	-98,18	-3 920 419	-124,32
F2.3 Brunnenentnahme (Entnahmeknoten)	-1'039'579	-32,96	0	0
F2.4 Randlicher Abfluß Allertal Nord aus Quartär und Oberkreide	-150'487	- 4,77	-150 487	-4,77
<b>F2.1 bis F2.4 Gesamte Exfiltration</b>	<b>-5'152'687</b>	<b>-163,39</b>	<b>-4'809'829</b>	<b>-152,52</b>
<i>F3 Bilanz</i>				
F3.1 Mittelwert Infiltration und Exfiltration	5'194'424	164,72	4'834'767	153,31
F3.2 Differenz zwischen Infiltration und Exfiltration	83'473	2,65	49'875	1,58
F3.3 Fehlermaß, %	1,61	1,61	1,03	1,03

Konvention: + Infiltration, - Exfiltration

Tabelle 18 Bilanzierung des Wasserflusses im 3D Süßwassermodell. Vorgaben und Resultate der Rechenfälle R43 und R44



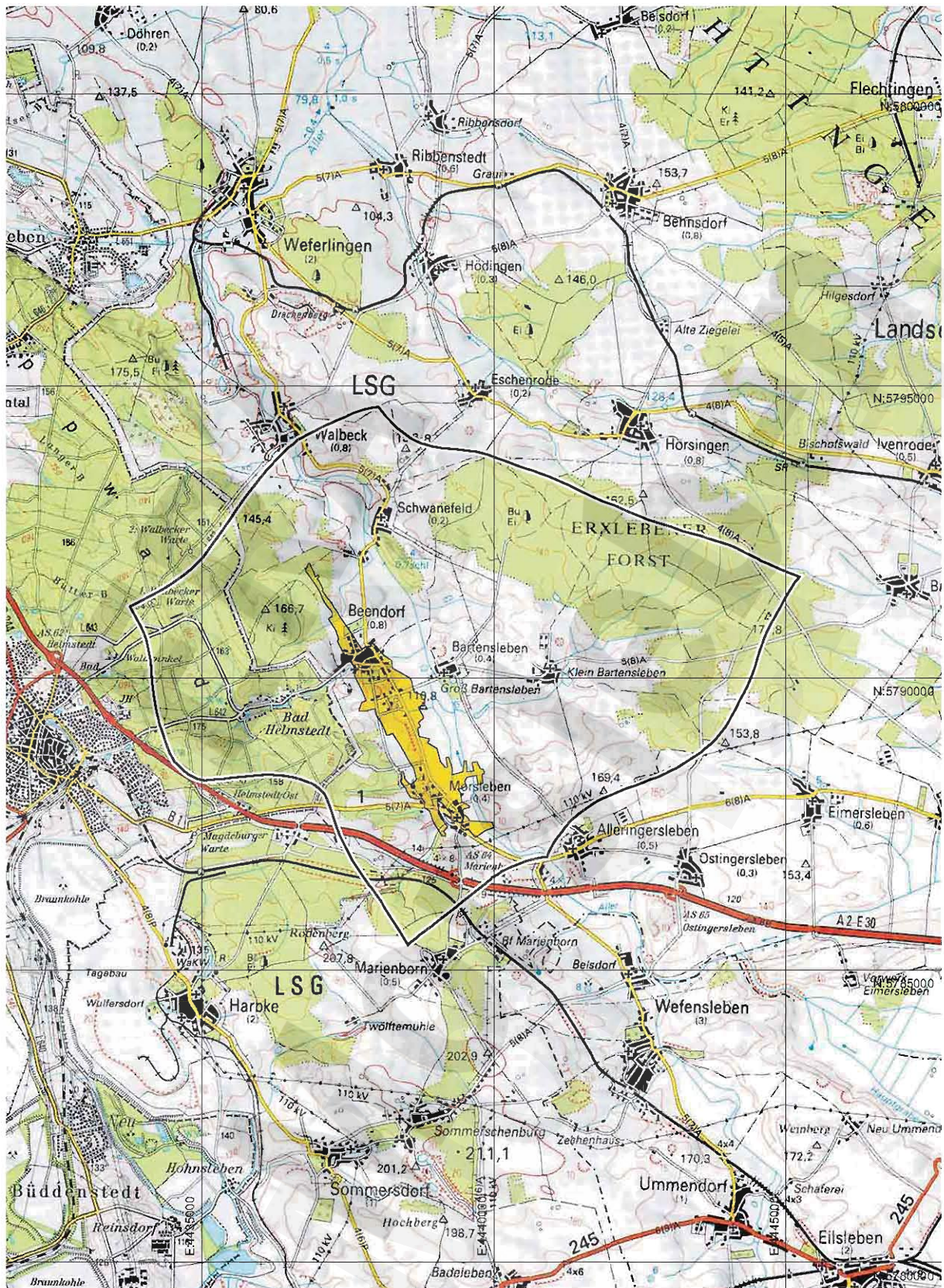
	R43		R44	
	m <sup>3</sup> /a	l/s	m <sup>3</sup> /a	l/s
<b>Infiltration</b>				
Infiltration aus der 2D Verteilschicht in das 3D Modell	2 318 211	73,51	2 374 976	75,31
Zufluß Lappwald	268 687	8,52	0	0
Zufluß Allertal Süd (Quartär und Oberkreide)	14 445	0,46	14 445	0,46
Gesamtinfiltration in das 3D Modell unterhalb der 2D Verteilschicht	2'601'343	82,49	2'389'421	75,77
<b>Exfiltration</b>				
Exfiltration	-1'846'433	-58,55	-2'053'624	-65,12
Brunnenentnahme	-1'039'579	-32,96	0	0
Abfluß Allertal Nord (Quartär und Oberkreide)	-150'487	-4,77	-150 487	-4,77
Gesamtexfiltration aus dem 3D Modell unterhalb der 2D Verteilschicht	-3'036'499	-96,28	-2'204'111	-69,89
<b>Fehlermaß</b>				
Differenz Zu- und Abfluß	435'156	13,79	185'310	5,88
Fehlermaß	15,44%		8,07%	
<b>Verhältnis Tiefensickerung / Gesamtumsatz</b>				
Tiefensickerung, Mittelwert Zu- bzw. Abfluß	2'818'921	89,38	2'296'766	72,83
Gesamtumsatz, Mittelwert In- bzw. Exfiltration	5'194'424	164,72	4'834'767	153,31
<b>Anteil der Tiefensickerung am Gesamtumsatz (Mittelwerte)</b>	54,26%		47,51%	

Zahlen aus FED und Tabelle 18  
Konvention: + Infiltration, - Exfiltration

Tabelle 19      Rechenfälle R43 und R44. Mit FED berechnete Bilanz der Modellflüsse durch den 3D Modelluntergrund („Tiefensickerung“)

**10      Abbildungen**

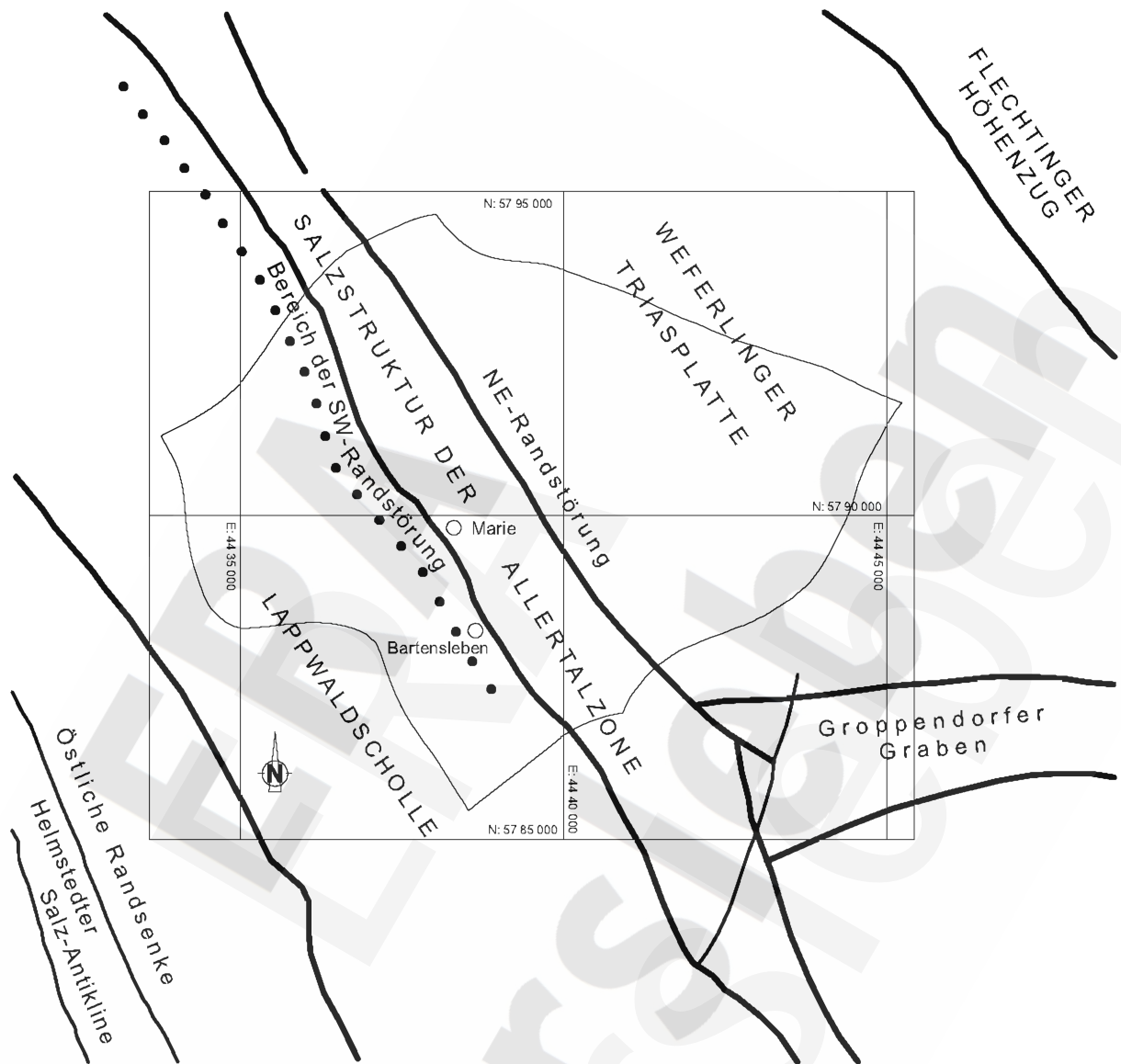
ERA  
ERA  
Morsleben



4305/033/neugrid2.eps/shu/20.04.01

Kartengrundlage: Topographische Karte 1:100 000, C3939. Vervielfältigt mit Erlaubnis des Herausgebers:  
Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN) 52-64/99

Abbildung 1 Geographischer Überblick über das Modellgebiet, Lage des 3D Finite-Elemente-Modells und des Grubengebäudes ERAM (g)



4305/33/strukturgeologie.eps/shu/17.11.00

Abbildung 2      Strukturgeologische Übersichtskarte mit Modellgebiet ERAM (aus [12])

a) Lappwaldscholle

Stratigraphie		Mächtigkeit, m	Einheiten	Modellflächen
Jura	Sinemur	50	L1	OF ju he (u)
	Hettlang	40		
Keuper	Rhät	100	L2	BS ko (3c)
				BS ko (Gl)
				BS ko (2b)
	Mittel	47	L4	BS ko M
	Unter	85	L5	BS ko (1)
Steinmergelkeuper		160	L6	BS km SM
Oberer Gipskeuper		90	L7	BS km GO
Schilfsandstein		45	L8	BS km S

b) Allertalzone

Stratigraphie		Mächtigkeit, m	Einheiten	Modellflächen
Quartär		bis 100	A1-A4	Quartärbasis
Obere Kreide		bis 80	A5	BS kro WA
		bis 130	A6	OF kro Alo
		bis 15	A7	Kreidebasis
Jura		bis 150	A8	BS j-Schollen
Keuper	Rhät	bis 100	A9	BS km SM
	Steinmergelkeuper	bis 180		
	Oberer Gipskeuper	90	A10	BS km Go
	Schilfsandstein	45	A11	BS km S
	Unterer Gipskeuper	bis >80	A12	OF Salzstruktur
	Unterer Keuper			
Muschelkalk				
Hutgestein		bis >200	A13	OF z3AN Westf. der Hauptmulde
			A14	BS Hutgestein const. bei -140 m NN

c) Weferlinger Triasplatte

Stratigraphie		Mächtigkeit, m	Einheiten	Modellflächen
Quartar und Tertiär Muschelkalk		30	T1	BS Deckschichten ab GOK
Buntsandstein	Pelitröt	120	T2	BS Rät
	Salinaröt			
	Sollingfolge	50	T3	BS smS
	Volpriehausen-Folge	80	T4	OF smV
		20	T5	BS smVS
NE-Randstörzone			T7	NE-St. 2
				NE-St. 1

- BS Basisfläche
- OF Oberfläche
- NE-St Nordostrandstörung
- GOK Geländeoberkante
- Tiefenlinienpläne BGR
- abzuleitende Flächen
- ↑↓ Parallel Verschiebung der Fläche um Schichtmächtigkeit

4305/033/hydrstfad2.eps/shu/14.05.01

Nach [12], modifiziert

Abbildung 3 Überblick über die hydrostratigraphischen Einheiten im Modellgebiet und die geometrischen Flächen für das hydrogeologische Modell

Stratigraphie		Mächtigkeit m	Hydrostratigraphische Zusammenfassung	lfd. Nr.	K-Klasse	
Quartär		q		L0	111	
Jura	Sinemur	ju si	50	Ton-bis Schluffstein und Feinsandstein	L1	131
		ju he (o)	20			
	ju he l	20				
Hettlang	ju he (u)	50	Tonstein	L2	132	
	ko (3c)	20	Versurz- und Glensedimente	L3a	141	
Ober-	ko (3b) bis ko(2c)	50		Ton-, Schluff- u. Feinsandstein	L3	142
	Mittel-	ko (2b)	50	Sandstein	L4	143
ko (2a)		17	Tonstein, Dolomitmergelstein			
Unter-	ko (1) 8-9 = koM	30		Ton- u. Schluffstein, Dolomitmergelstein, Feinsandstein	L5	L5-K1 : 145 L5-K2 : 144
	ko (1) 1-7	85				
Steinmergel- keuper	km SM (3)	25	Tonstein bis Schluffstein (klüftig)	L6	146	
	km SM (2)	90				
	km SM (1)	45				
Oberer Gipskeuper	km Go	90	Tonstein mit Gips	L7	L7-K1 : 147 L7-K2 : 148 L7-K3 : 149	
Schilfsand- stein	km S	45	Schluffstein, Feinsandstein	L8	L8-K1: 151; L8-K2: 150; L8-K3: 152	
Unterer Gipskeuper	km Gu	125	Tonstein mit Gips	L9	Modellbasis	
Unterer Keuper	ku	55	Schluff-bis Tonstein, Kalkstein, Dolomitmergelstein, Anhydrit	L10		
Muschel- kalk	mo	65				
	mm	50				
		15	Steinsalz			

4305/hydro\_Japp\_1.tif/shu/08.04.01

Nach [12], Abb. 5.12, modifiziert

Abbildung 4 Hydrostratigraphische Gliederung der Lappwaldscholle

Stratigraphie		Mächtigkeit m	Hydrostratigraphische Zusammenfassung	lfd. Nr.	K-Klasse	
Quartär	qe/ll	5	Sande (Niederterrasse)	A1	A1 - A4: 210	
	qe(2)-qn	bis 100 m	Schluffe (Mischquartär)	A2		
	qe(1-2)gf		Sande (Elster-Zwischensande)	A3		
	qe/llgm		Geschiebemergel (Elster-Grundmoräne)	A4		
Tertiär		t			211	
Obere Kreide	Walbecker Schichten	kro WA	bis 80	Sande + / - schluffig	A5	221
	Alleringersl ebener Schichten	kro Alb	bis 130	Feinsand, schluffig	A6	222
		kro Alu	bis 15	stark schluffig	A7	223
Jura		j	bis 150?	Schluff-u. Tonstein, selten Feinsandstein	A8	A8-K1: 233; A8-K2: 234 A8-K3 z > 60 mNN: 235
Keuper	ko	bis 100?	Ton-, Schluff- u. Feinsandstein	A9	A9-K1 : 245 A9-K2 : 246	
	kmSM	bis 180?	Ton- u. Schluffstein, z.T. klotzig			
	kmGo	90	Tonstein mit Gips	A10	247	
	kmS	45	Schluffstein, z.T. Feinsandstein	A11	248	
	kmGu	bis > 80	Tonstein, Mergelstein	A12	249	
	ku					
mu						
Hutgstein	cr(z3/4NA)	bis > 200	Anhydrit und Gips, selten Ton (Residuen von Aller- und Leine-Steinsalz)	A13	A13-K1 : 271, 272	
	cr(z3AN)		Anhydrit mit Gips (ehem. Hauptanhydrit)			
	cr(z/ 3DA+GT+CA)		(Deckanhydrit, Grauer Salzton, Leinekarbonat)		A13-K2 (DGL) : 273	
	cr(z2NA)		Anhydrit mit Gips (Residuen des Stäbfurt-Steinsalzes)		A13-K1 : 271, 272	
Zechstein			Salinare Abfolge	A14	Modellbasis	

4305/hydro\_lapp\_2.tif/shu/08.04.01

Nach [12], Abb. 5.13, modifiziert

Abbildung 5 Hydrostratigraphische Gliederung der Allertalzone

Stratigraphie			Mächtigkeit m	Hydrostratigraphische Zusammenfassung		lfd. Nr.	K-Klasse
Quartär und Tertiär			30	Sand, Schluffe u. Tone		T1	T1-K1 : 310
Muschelkalk				Kalkstein			T1-K2 : 351
Buntsandstein	Röt	Paltröt	soMy soP	90	Schluffstein bis Tonstein	T2	T2-K1 : 361 T2-K2 : 362
		Sallnarröt	soS	30	Ton-, bis Schluffstein mit Gips		
	Mittlerer Buntsandstein	Solling-Folge	smSW	50	Ton-, Schluff-, Fein- u. Mittelsandstein	T3	363
			smSS				
		Volpriehausen-Folge	smV	80	Ton- u. Schluffstein, selten Feinsandstein	T4	364
			smVS	20	Sandstein	T5	365
	Unterer Buntsandstein	NE-Randstörzone				T7	381
		Bernburg-Folge	suB	100	Schluff- u. Tonstein, selten Feinsandstein	T6	Modellbasis
		Calvörde-Folge	suC	190	Schluff- u. Tonstein, sehr selten Feinsandstein		
	Nordhausen-Folge		zB		"Bröckelschiefer"		
Zechstein		Z		Residuen			

4305/hydro\_lapp\_3.tif/shw/08.04 01

Nach [12], Abb. 5.14, modifiziert

Abbildung 6 Hydrostratigraphische Gliederung der Triasplatte



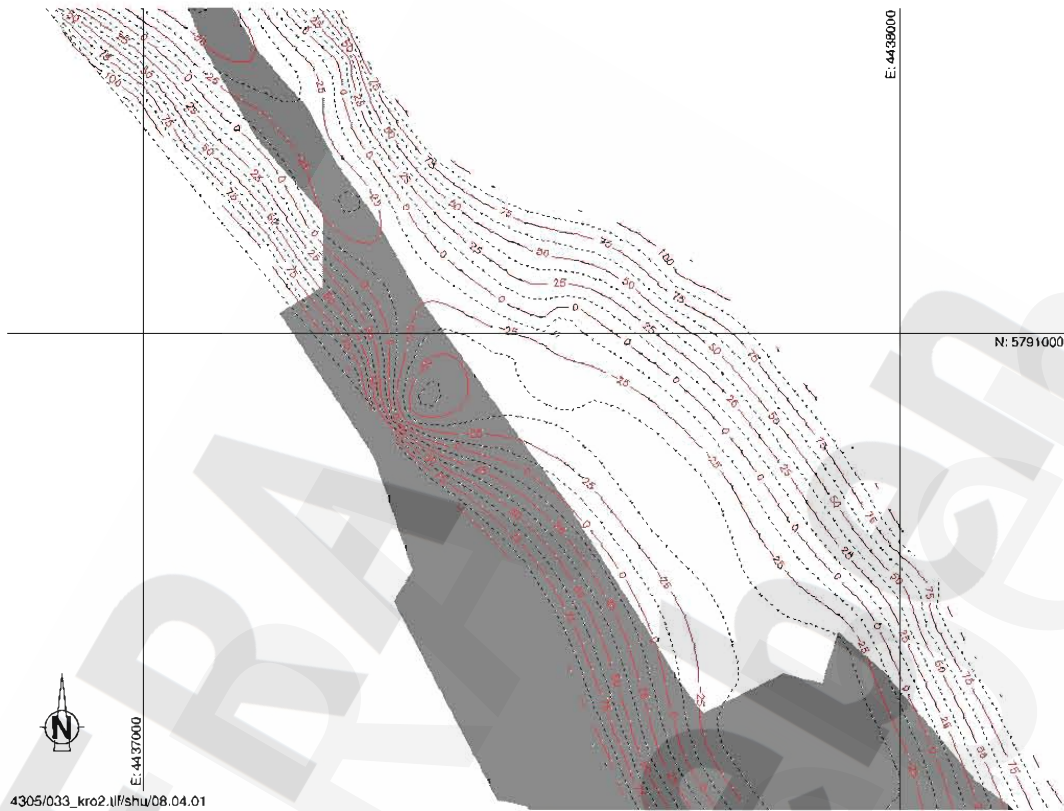


Abbildung 7 Tiefenlinienplan der Basis Oberkreide (Ausschnitt) gemäß der Datengrundlage BGR und Umriß Grubengebäude ERAM (grau)

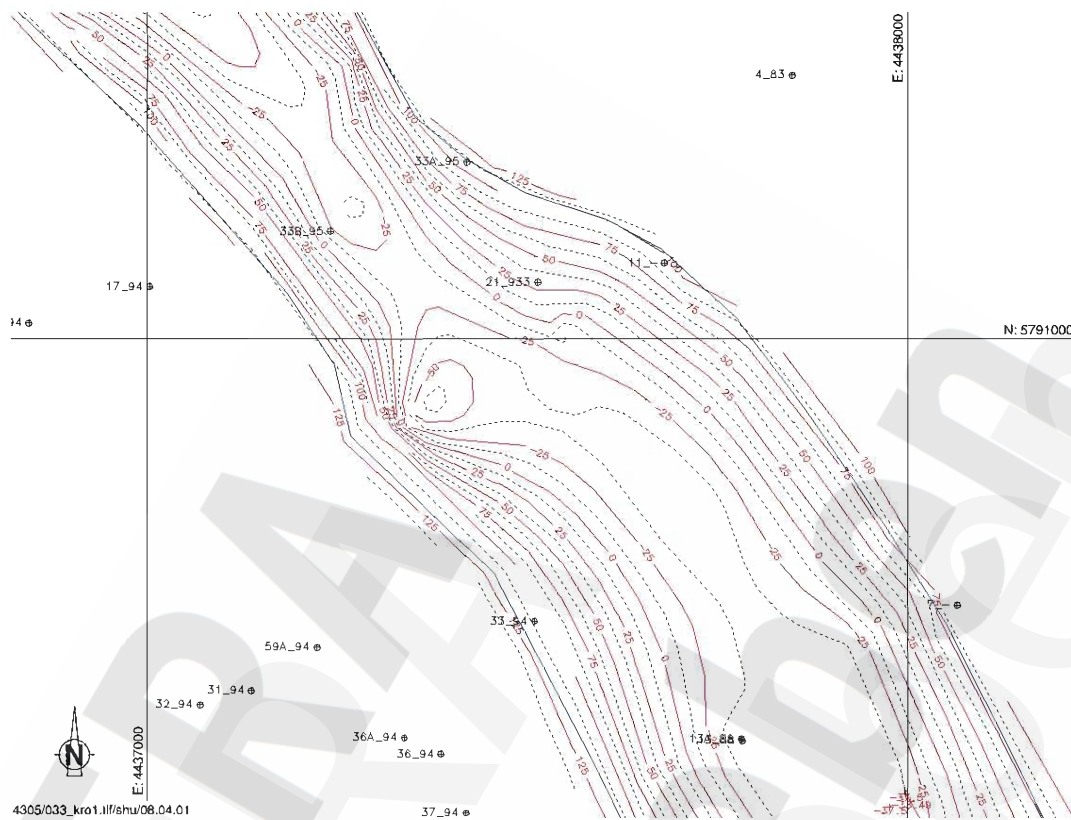


Abbildung 8 Auf der Grundlage von Abbildung 7 extrapoliertes Tiefenlinienplan der Basis Oberkreide und Bohransatzpunkte (Ausschnitt). Der Kontakt zur Quartärbasis bzw. Modelloberfläche entspricht dem Verlauf der blauen Linie

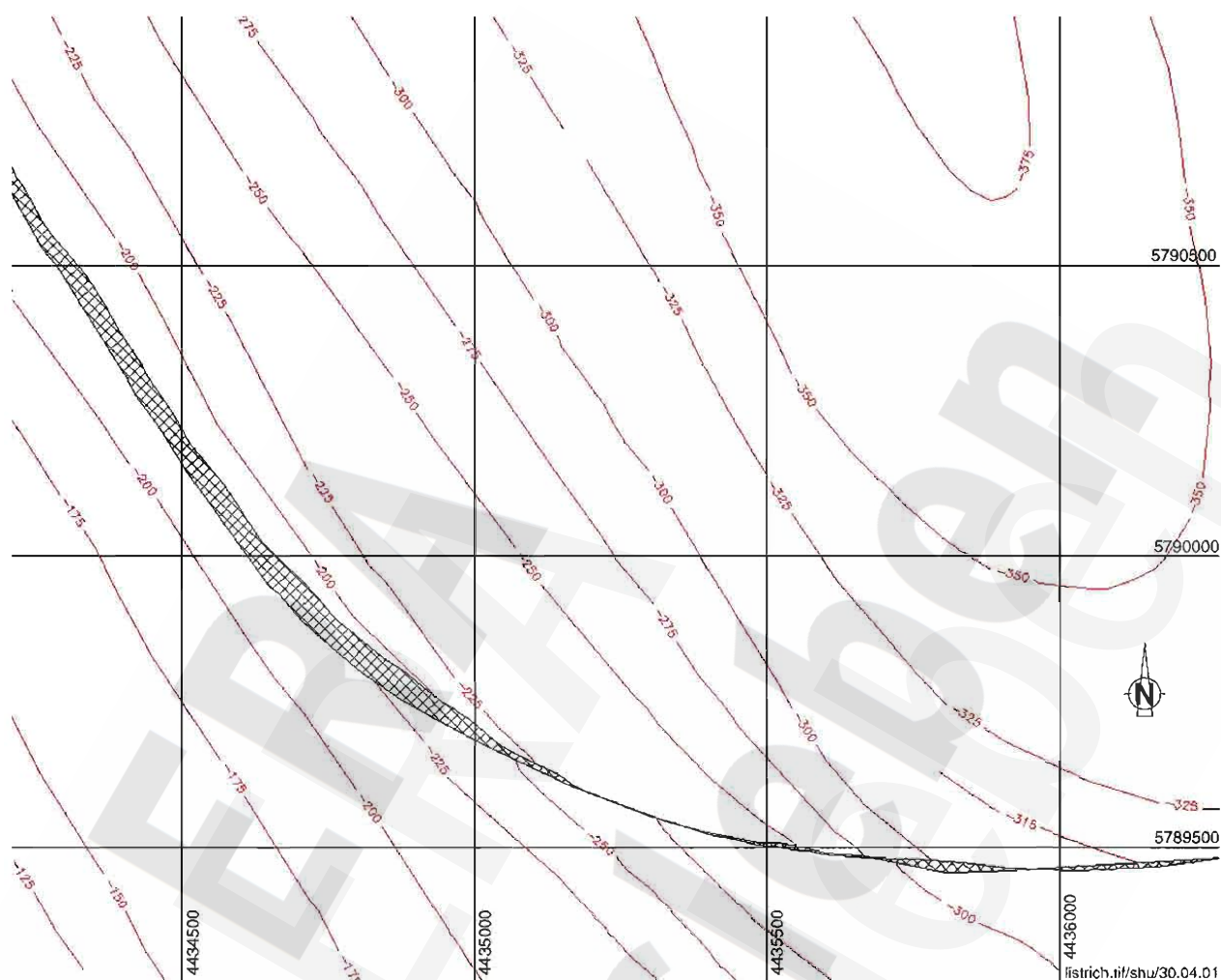


Abbildung 9 Durchtrennungsfläche (schraffiert) des Schilfsandstein durch die listrische Störung des Brunmentals (nördlicher Ast) und Tiefenlinien der Basisfläche des Schilfsandstein (braun)

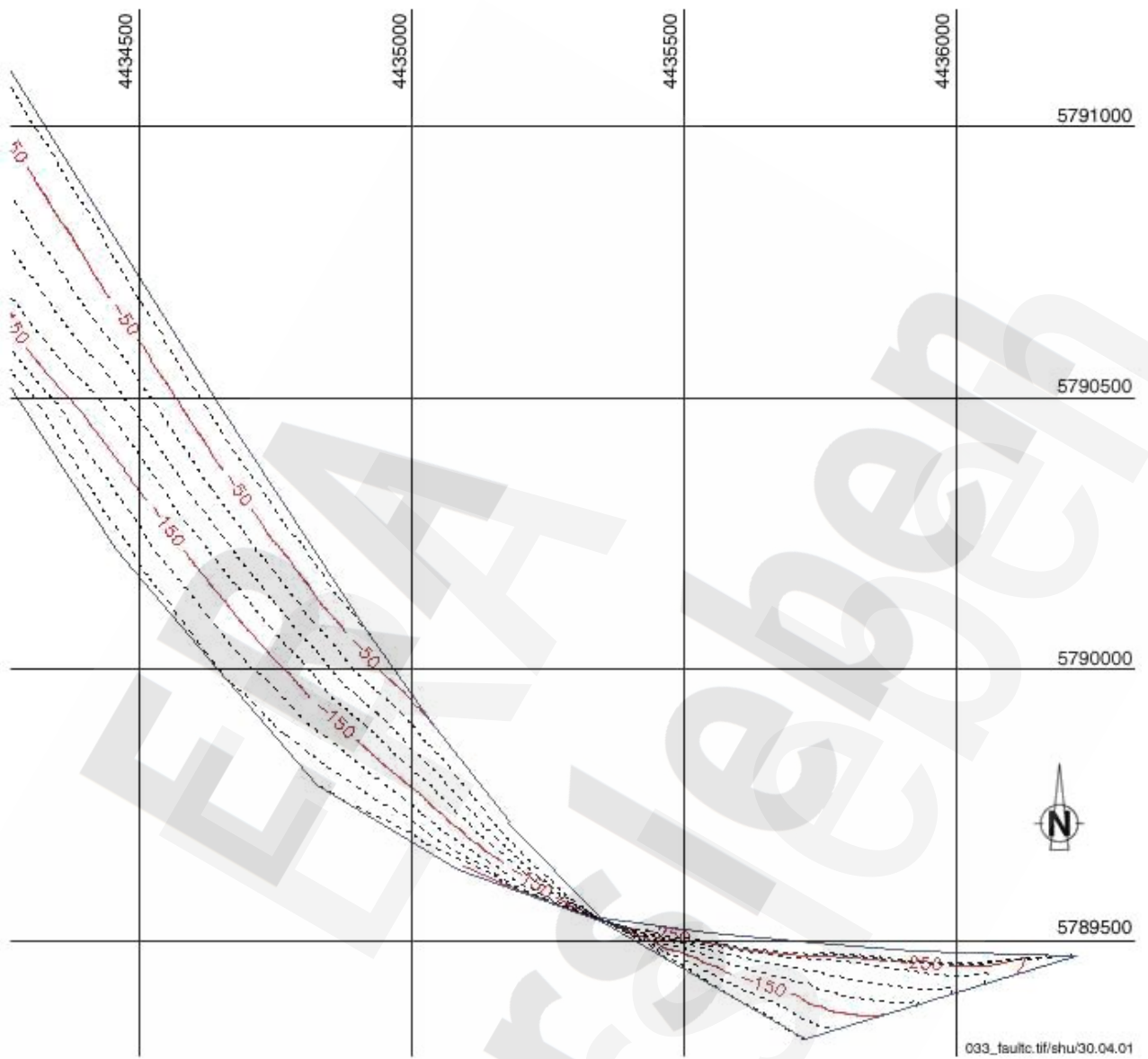
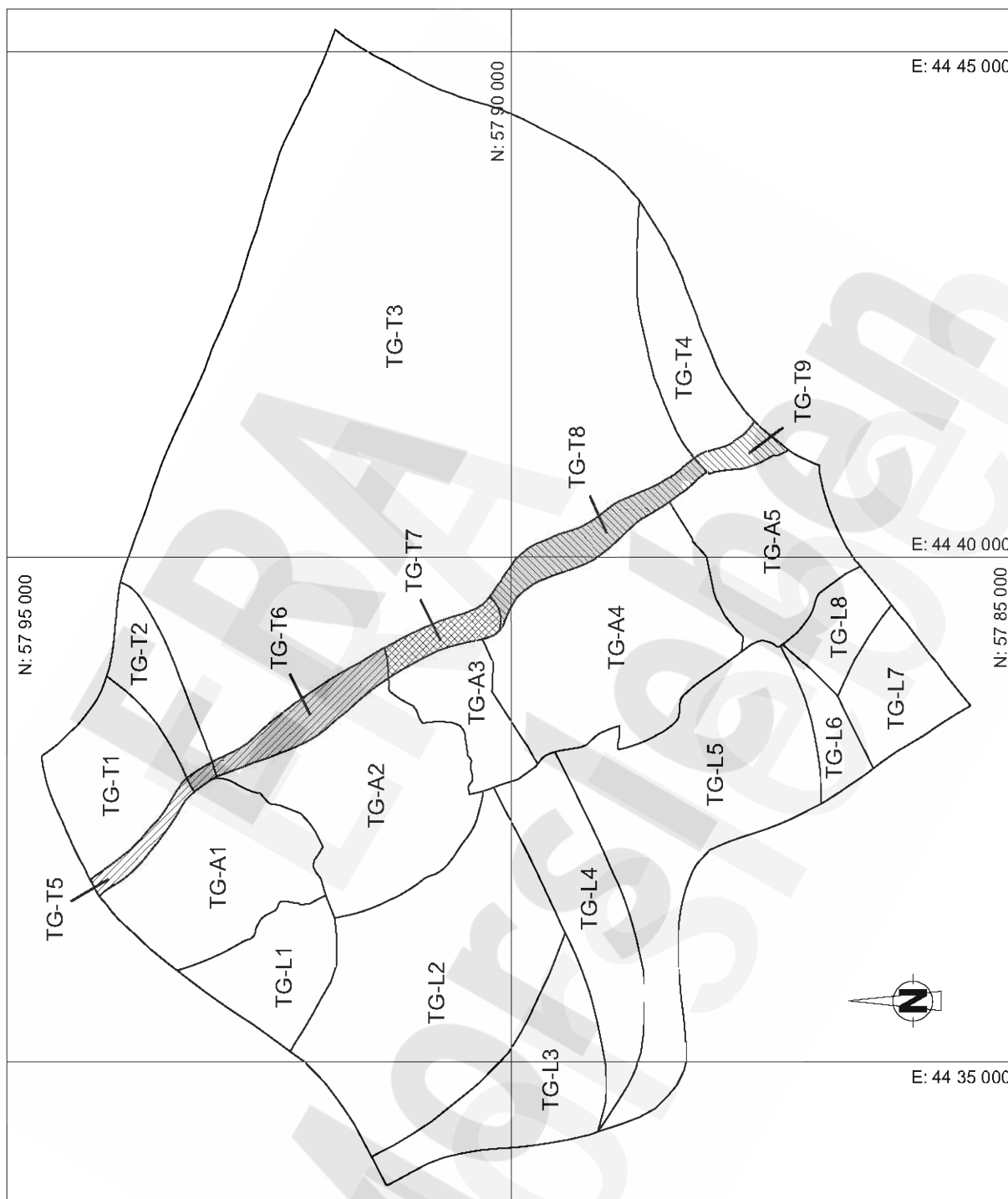


Abbildung 10 Tiefenlinienplan des nördlichen Astes der Brunntalstörung

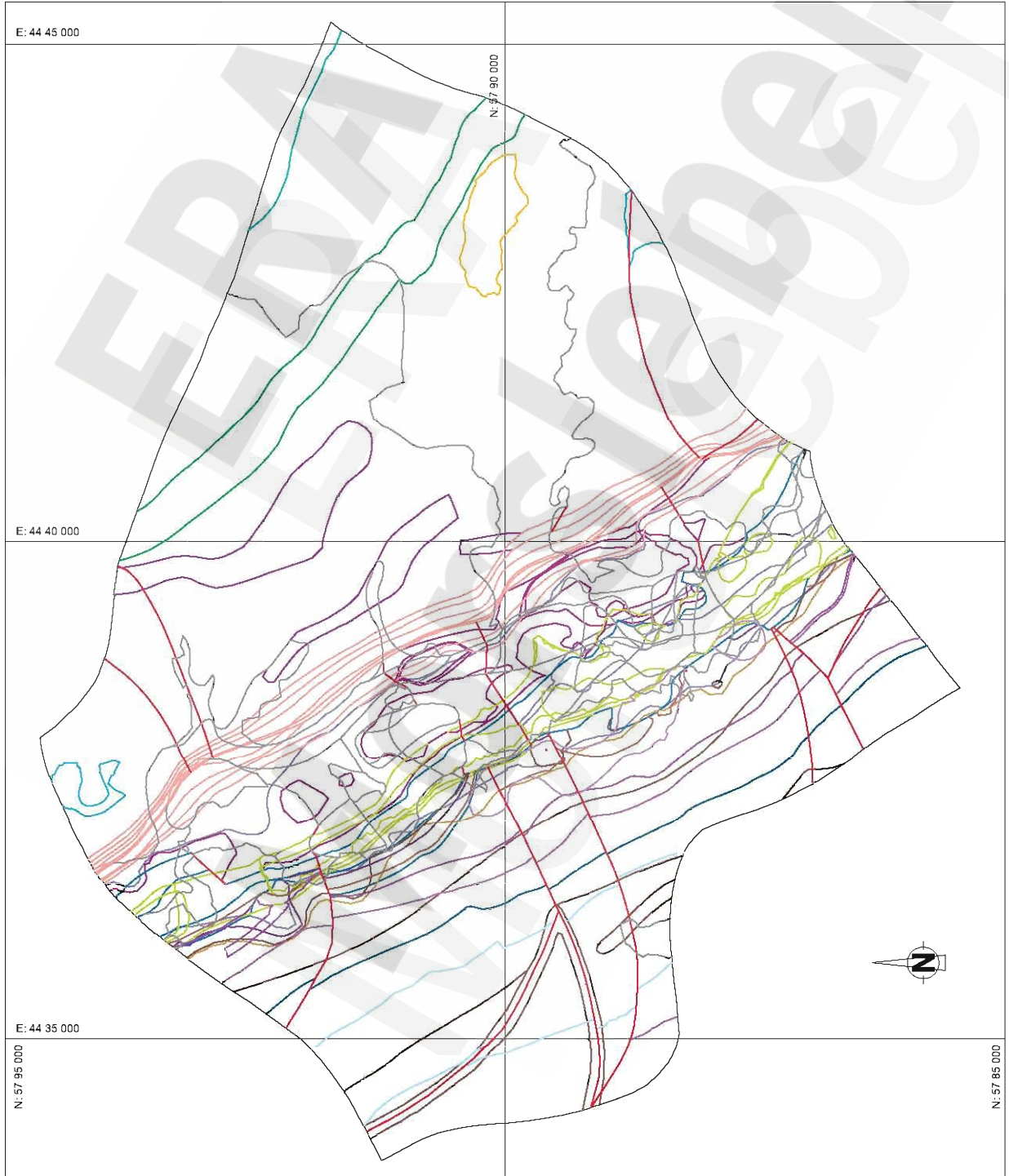


4305/033/blocks.eps/shu/06.11.00

Abbildung 11 Einteilung des Modellgebiets in Teilgebiete



Abbildung 12 Schematische Darstellung zum Aufbau des dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells



- Legende**
- Quartär Störungen**  
A1-A4, L0, T1-K1
  - Störungen**  
NE Randsstörzone T7
  - Lappwald**  
L1  
L2  
L3  
L3a  
L4  
L5  
L6  
L7  
L8
  - Allertal**  
A5, A6, A7  
A8  
A9, A10, A11, A12  
A13
  - Triasplatte**  
T1-K2  
T2-K1  
T2-K2  
T3  
T4

Abbildung 13  
Verbreitungsgrenzen bzw. Körperkanten  
der hydrostratigraphischen Modelleinheiten  
im Modellgebiet

4305033AK3-eps/06\_07\_01

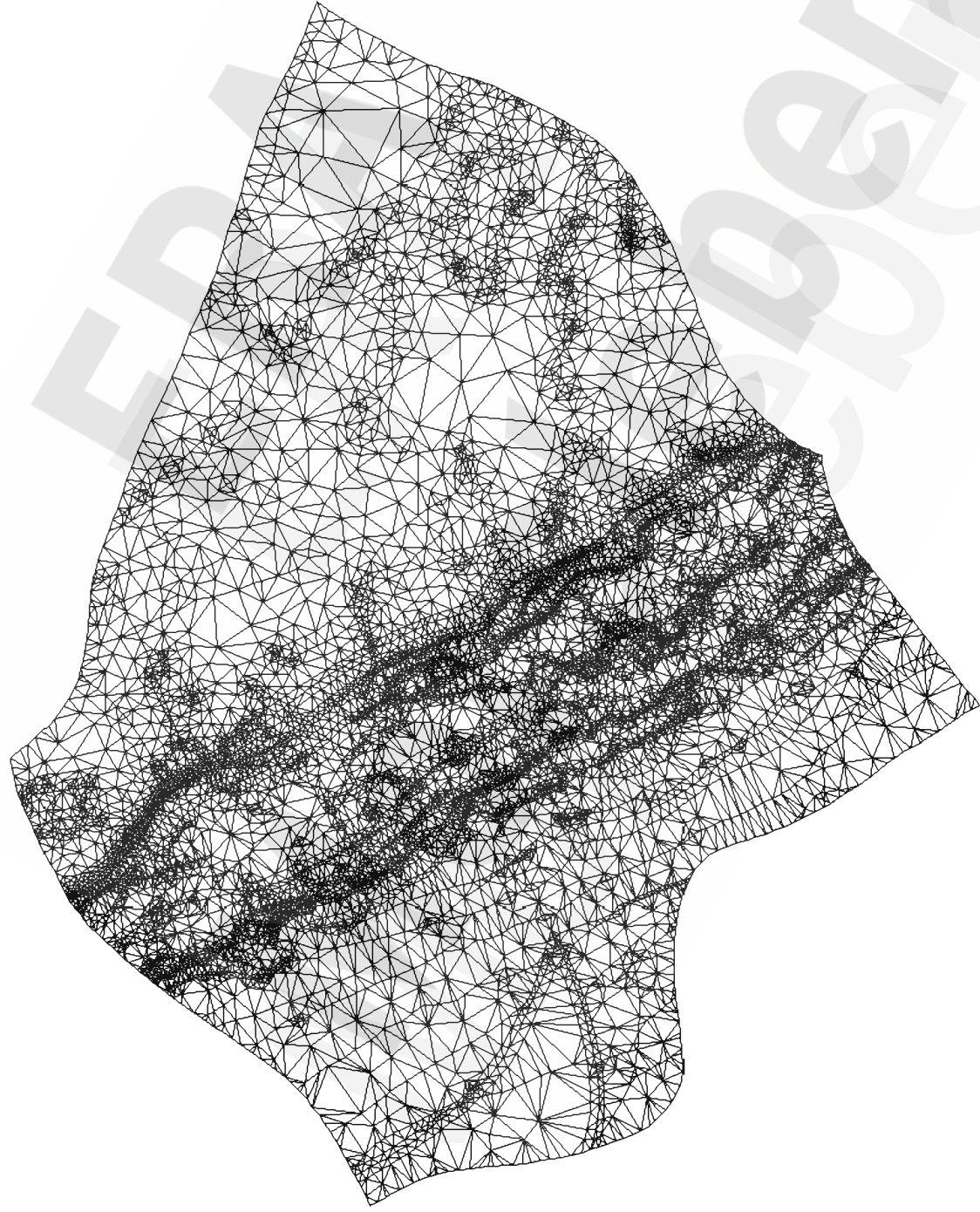


Abbildung 14  
Primäre 2D Triangulation als Grundlage  
zum Modelllaufbau (Oberflächenelement-  
netz)



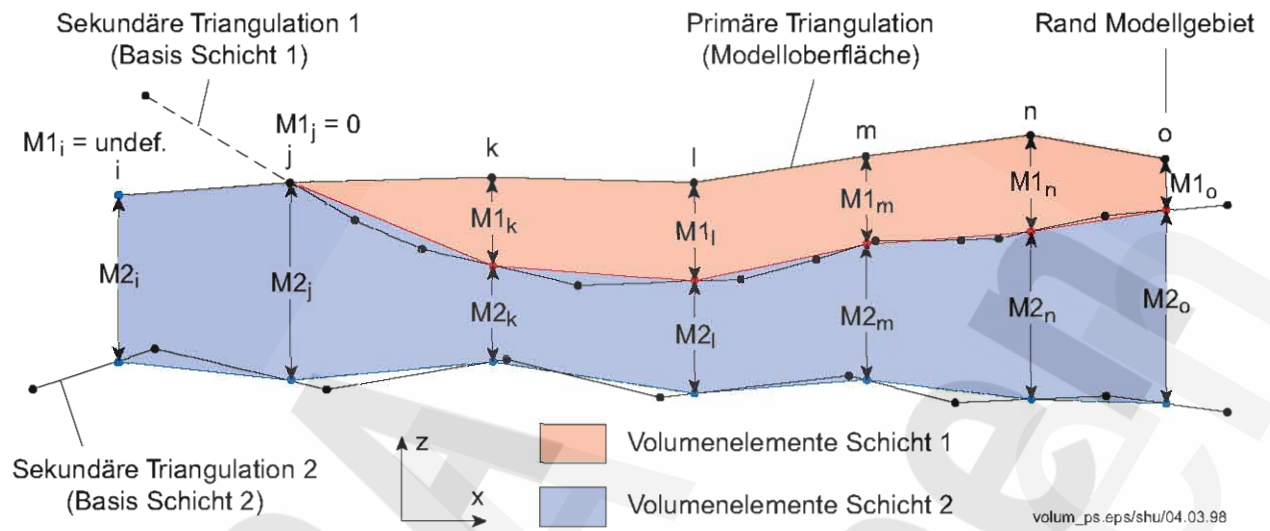
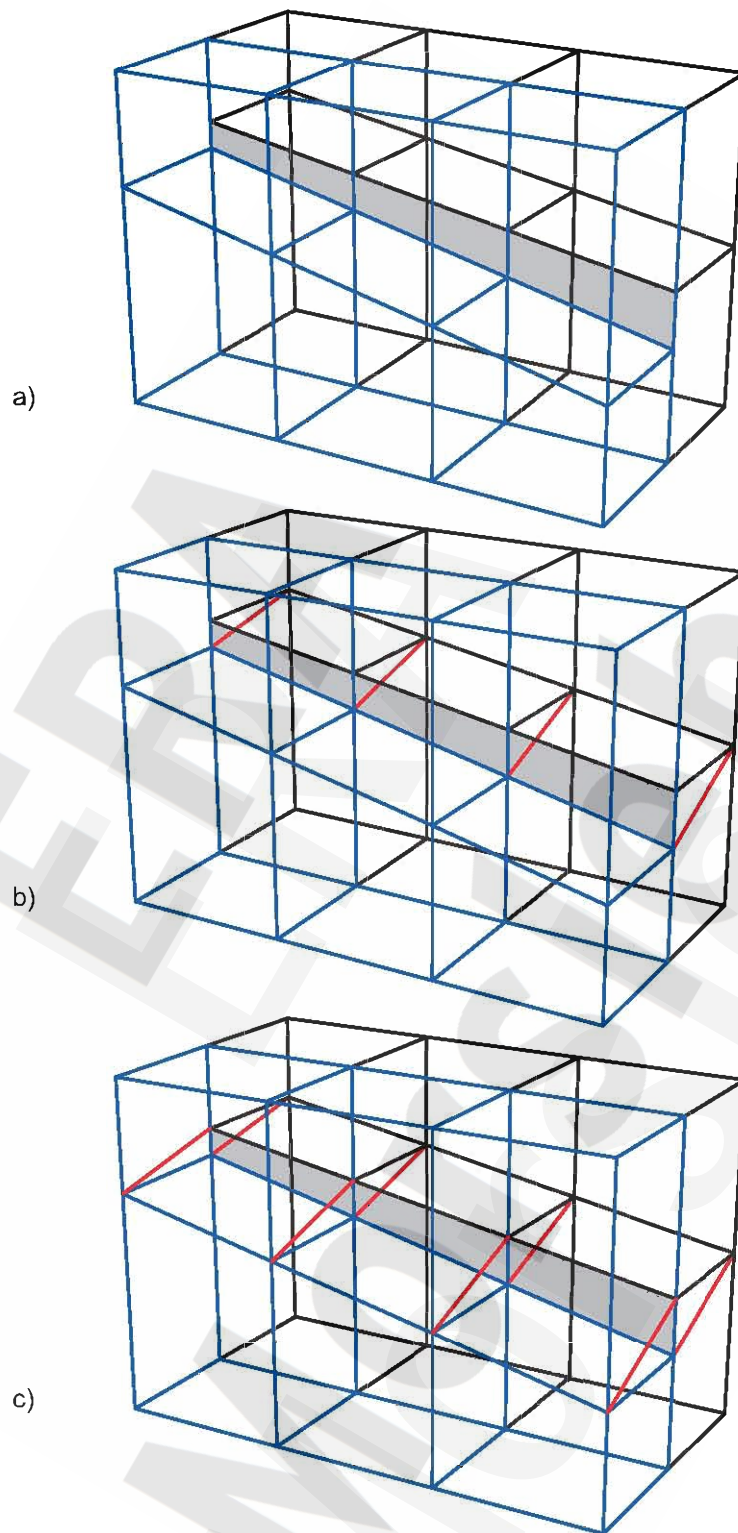


Abbildung 15 Schematische Darstellung zur Methode der Konstruktion von Volumenelementen mit „Surface Handling“ auf der Grundlage einer primären und mehrerer sekundärer Triangulationen geologischer Strukturflächen (Vertikalprofil)



ly\_mo\_01.eps/shu/27.05.98

Abbildung 16 Modellaufbau an Störungsversätzen. Schematische perspektivische Darstellung zur Funktion der Programme *join\_block* und *split* - Vereinigung der FE-Diskretisierung der blauen (vorne) und schwarzen (hinten) Teilgebiete ohne Kantenkreuzung. a) Darstellung der modifizierten Versatzfläche zwischen den Teilgebieten. b) Spaltung der Elemente im schwarzen Teilgebiet. c) Spaltung der Elemente im blauen Teilgebiet

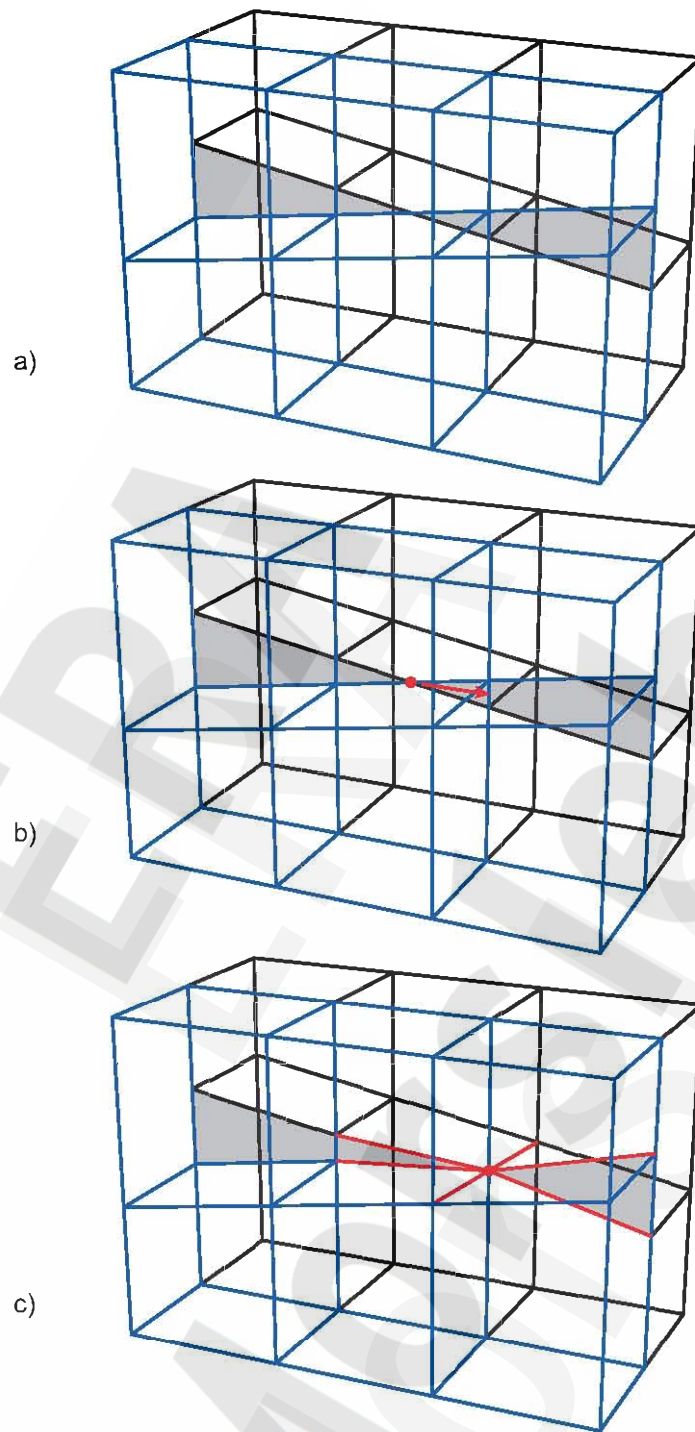
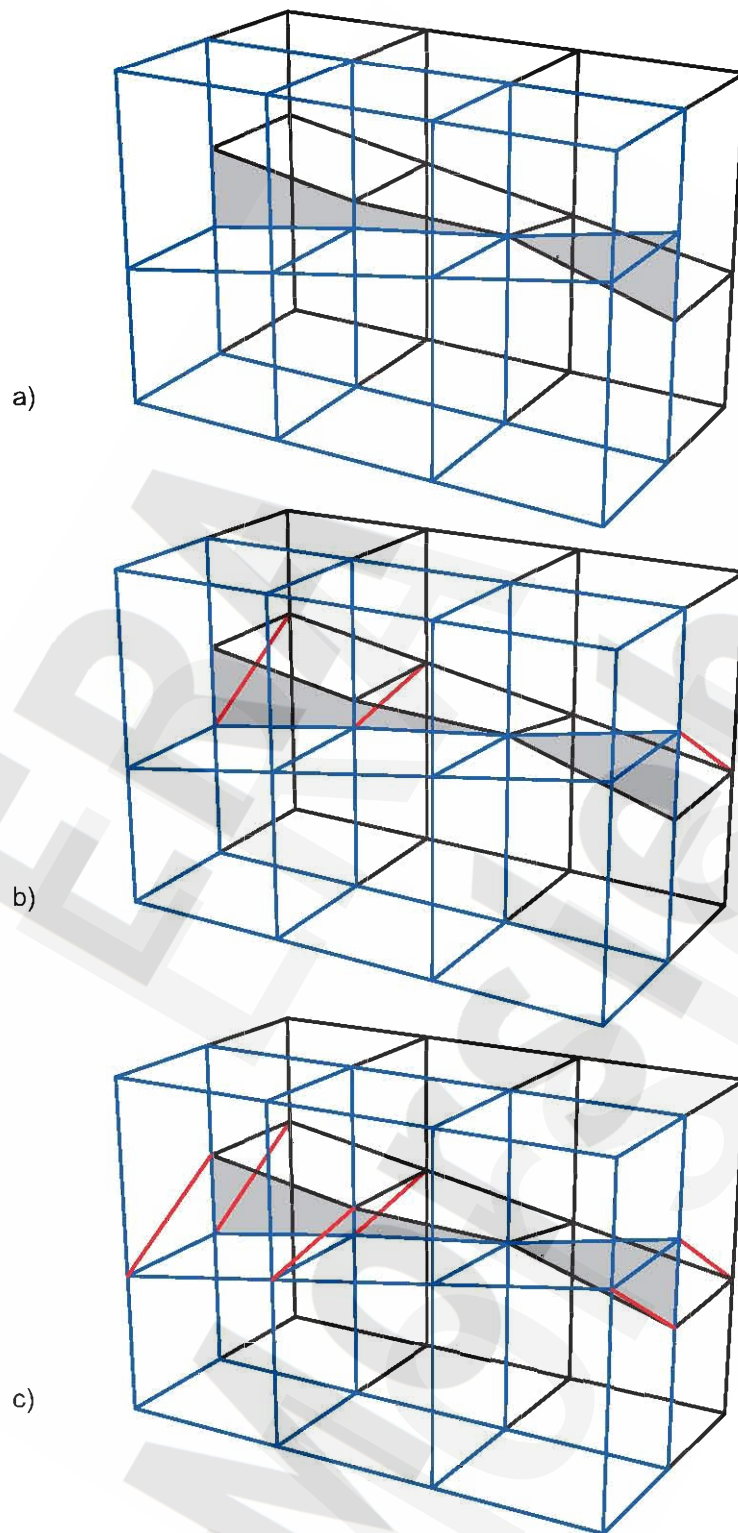


Abbildung 17 Modellaufbau an Störungsversätzen. Schematische perspektivische Darstellung zur Funktion der Programme *join\_block* und *split* - Vereinigung der FE-Diskretisierung der blauen (vorne) und schwarzen (hinten) Teilgebiete mit Kantenkreuzung. a) Darstellung der Versatzfläche zwischen den Teilgebieten. b, c) Verschiebung der Kantenkreuzung in eine bereits existierende Knotenkolonne



ly\_mo\_02.eps/shu/27.05.98

Abbildung 18 Modellaufbau an Störungsversätzen. Schematische perspektivische Darstellung zur Funktion der Programme *join\_block* und *split* - Vereinigung der FE-Diskretisierung der blauen (vorne) und schwarzen (hinten) Teilgebiete mit Kantenkreuzung. a) Darstellung der modifizierten Versatzfläche zwischen den Teilgebieten. b) Spaltung der Elemente im schwarzen Teilgebiet. c) Spaltung der Elemente im blauen Teilgebiet

Lappwald				
111	L0	q		Quartär
131	L1	jusi juhe		Sinemurium (Ton- bis Schluffstein) Hettangium (Schluff-, Feinsand-, Tonstein)
132	L2	juhe ko3c		Hettangium (Schluff-, Feinsand-, Tonstein) Oberer Tonstein
141	L3a	koGl		Versturz und Gleitsedimente aus Oberkeupermaterialien
142	L3	ko2b		Mittlerer Sandstein
143	L4	koM		Mergelhorizont des Unteren
144	L5-K2	ko1		Untere
145	L5-K1	ko1		
146	L6	kmSM		Steinmergelkeuper
147	L7-K1	kmGo		Oberer Gipskeuper
148	L7-K2	kmGo		
149	L7-K3	kmGo		
150	L8-K2	kmS		Schilfsandstein
151	L8-K1	kmS		
152	L8-K3	kmS		
Allertal				
210	A1-A4	q		Quartär
211	T1-K1	q + t		
221	A5	kroWAu		Oberkreide, untere Walbeckerschichten
222	A6	kroALo		Oberkreide, obere Alleringerslebener Schichten
223	A7	kroALu		Oberkreide, untere Alleringerslebener Schichten
233	A8-K1	j		Jura
234	A8-K2	j		
235	A8-K3 z>60 mNN	j		
245	A9-K1	kmSM + ko1		Steinmergelkeuper + Untere
246	A9-K2	kmSM + ko1		
247	A10	kmGo		Oberer Gipskeuper
248	A11	kmS		Schilfsandstein
249	A12	kmGu ñ mu		Unterer Gipskeuper, Unterer Muschelkalk
271	A13-K1	cr (z2-z4)		Nintates Hutgestein
272	A13-K1	cr (z2-z4)		
273	A13-K2	cr (z2-z4)		Hutgestein, Schichtenfolge DGL
Weferlinger Triasplatte				
310	T1-K1	q + t		Quartär + Tertiar
311	A1-A4	q		Quartär
351	T1-K2	mu		Deckschichten
361	T2-K1	so		Oberer Buntsandstein
362	T2-K2	so Gipskarst		Oberer Buntsandstein, Gipskarst
363	T3	smS		Sollingfolge
364	T4	smV		Volpriehausen-Folge
365	T5	smVS		Volpriehausen-Sandstein
381	T7			NE-Randströme

4305/033/Legende-anhang1.eps/28.06.01

Abbildung 19 Farblegende zu Abbildung 20 und Abbildung 21

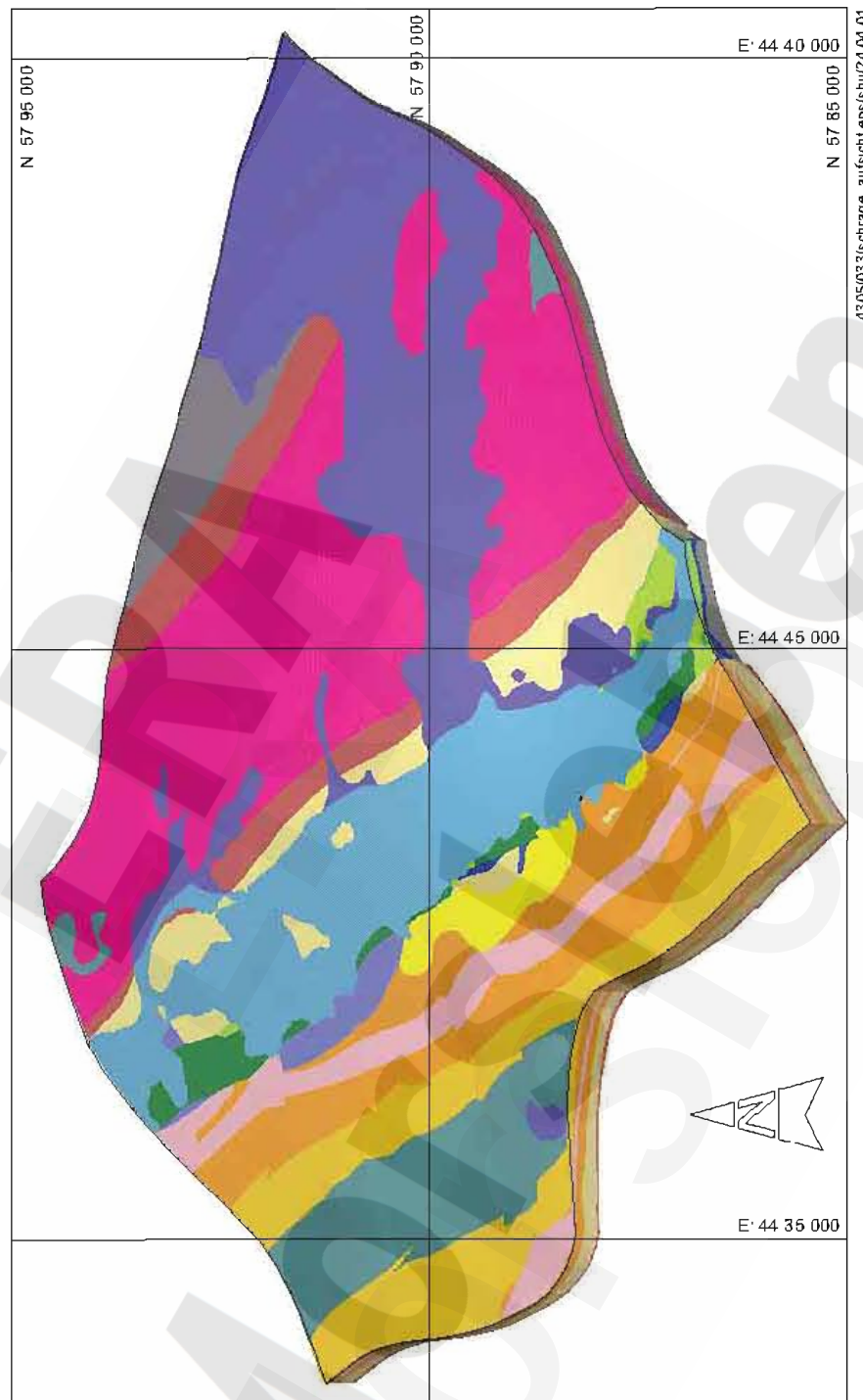
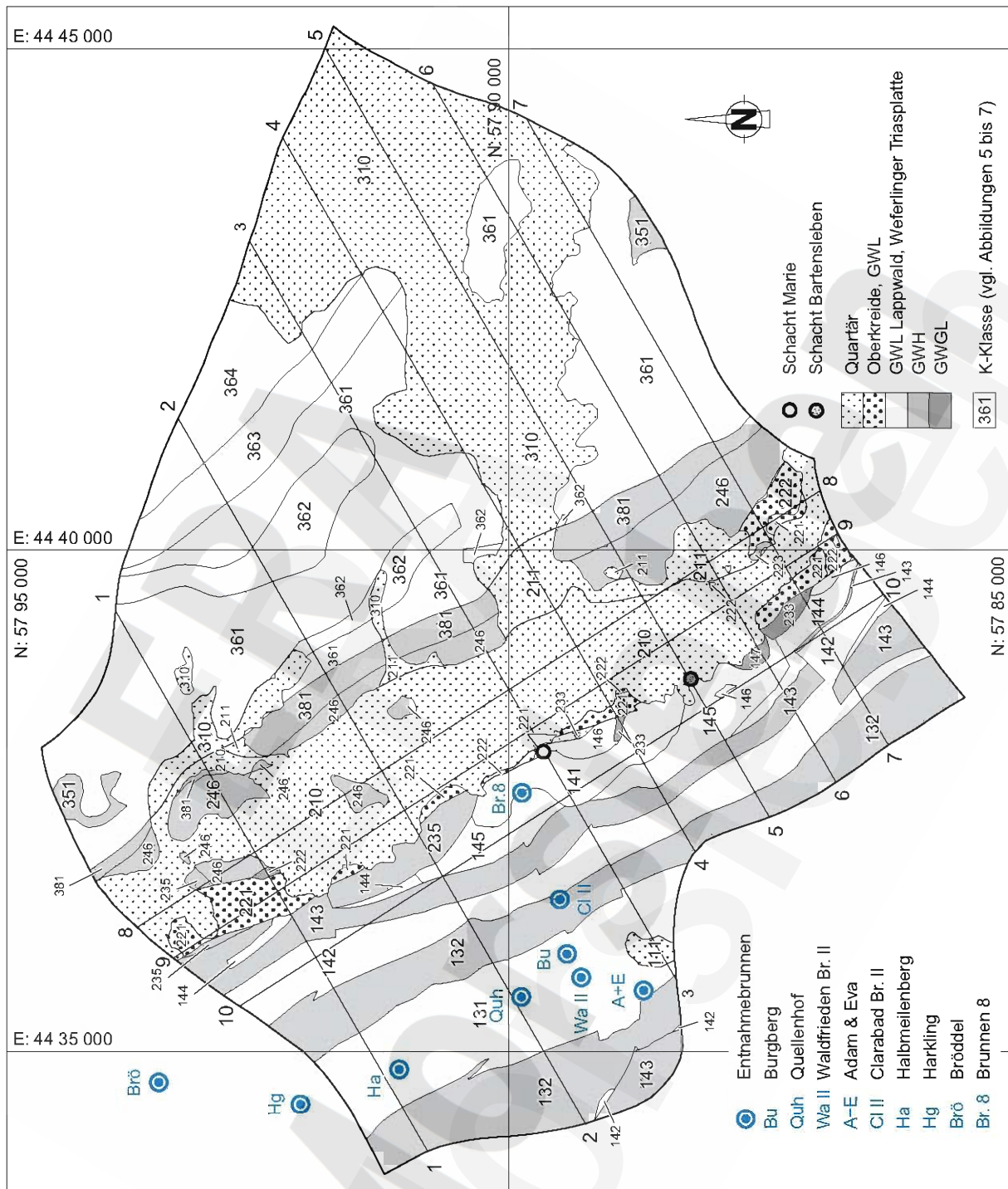


Abbildung 20 3D Süßwassermodell ERAM. Schräge Aufsicht auf das 3D Modell ERAM - alle hydrostratigraphische Modelleinheiten (Farblegende siehe Abbildung 19)



Abbildung 21 3D Süßwassermodell ERAM. Perspektivische schräge Aufsicht aus SE auf 9 Serienschritte (Abstand der Gitterlinien 1 km, Streichrichtung der Serienschritte SW-NE (Farblegende siehe Abbildung 19))



4305/033/topsurf3 eps/shu/23.04.01

Abbildung 22 3D Süßwassermodell ERAM. Hydrogeologischer Aufbau der Modelloberfläche mit Angabe der K-Klassen und Lage der Schnitte 1 bis 10 sowie der Entnahmebrunnen



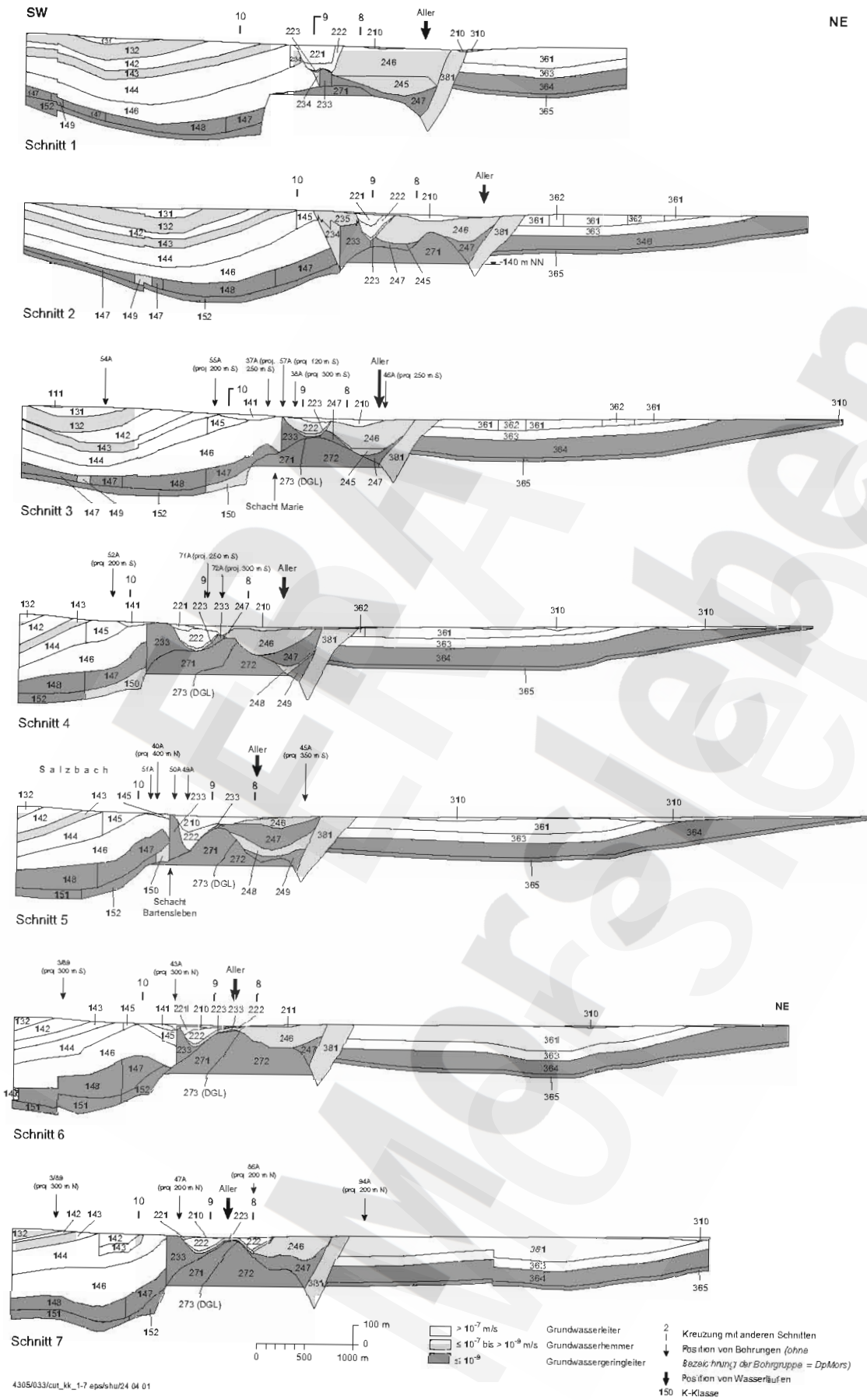


Abbildung 23 3D Süßwassermodell ERAM. Vertikale Modellschnitte 1 bis 7 quer zum Allertal



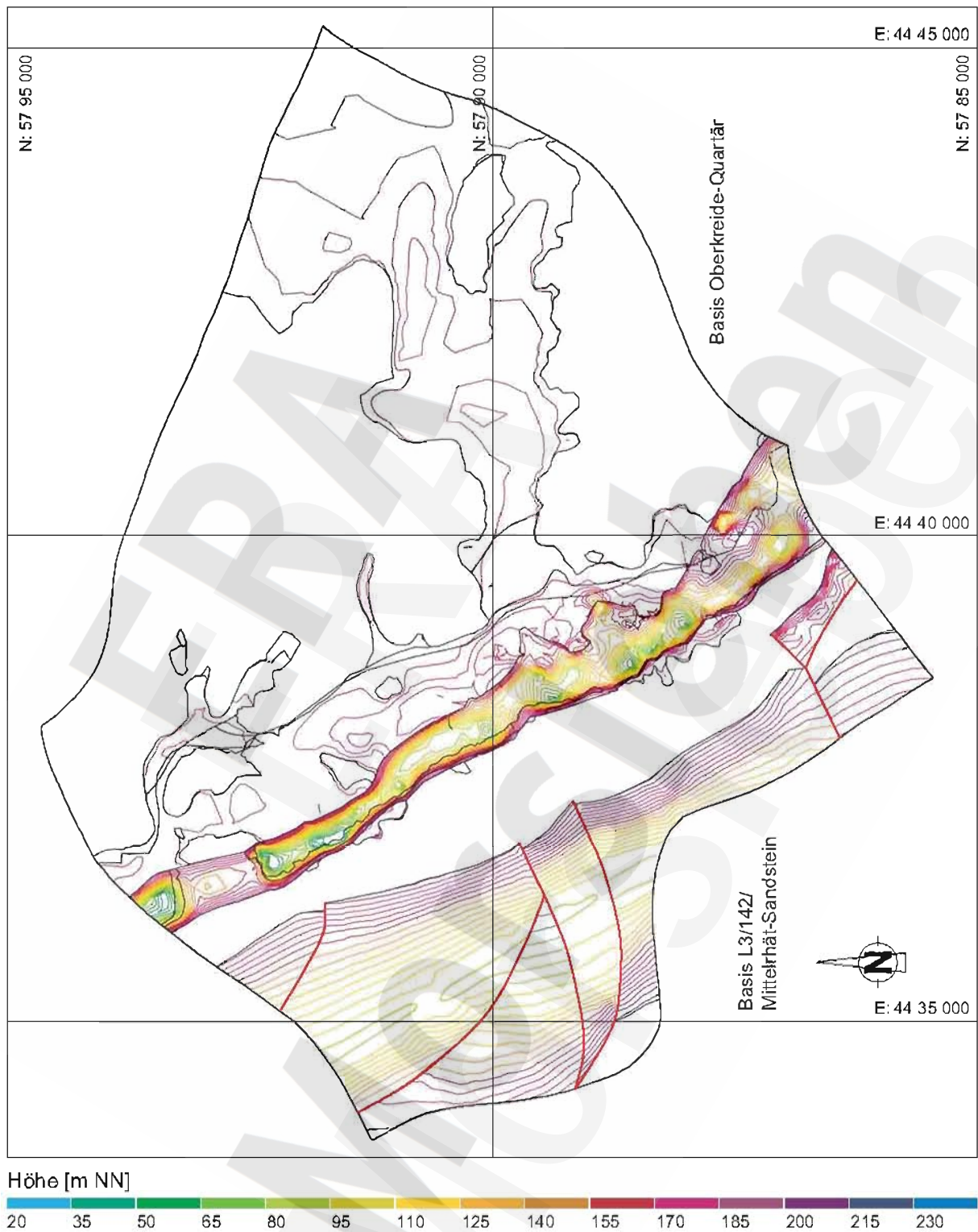
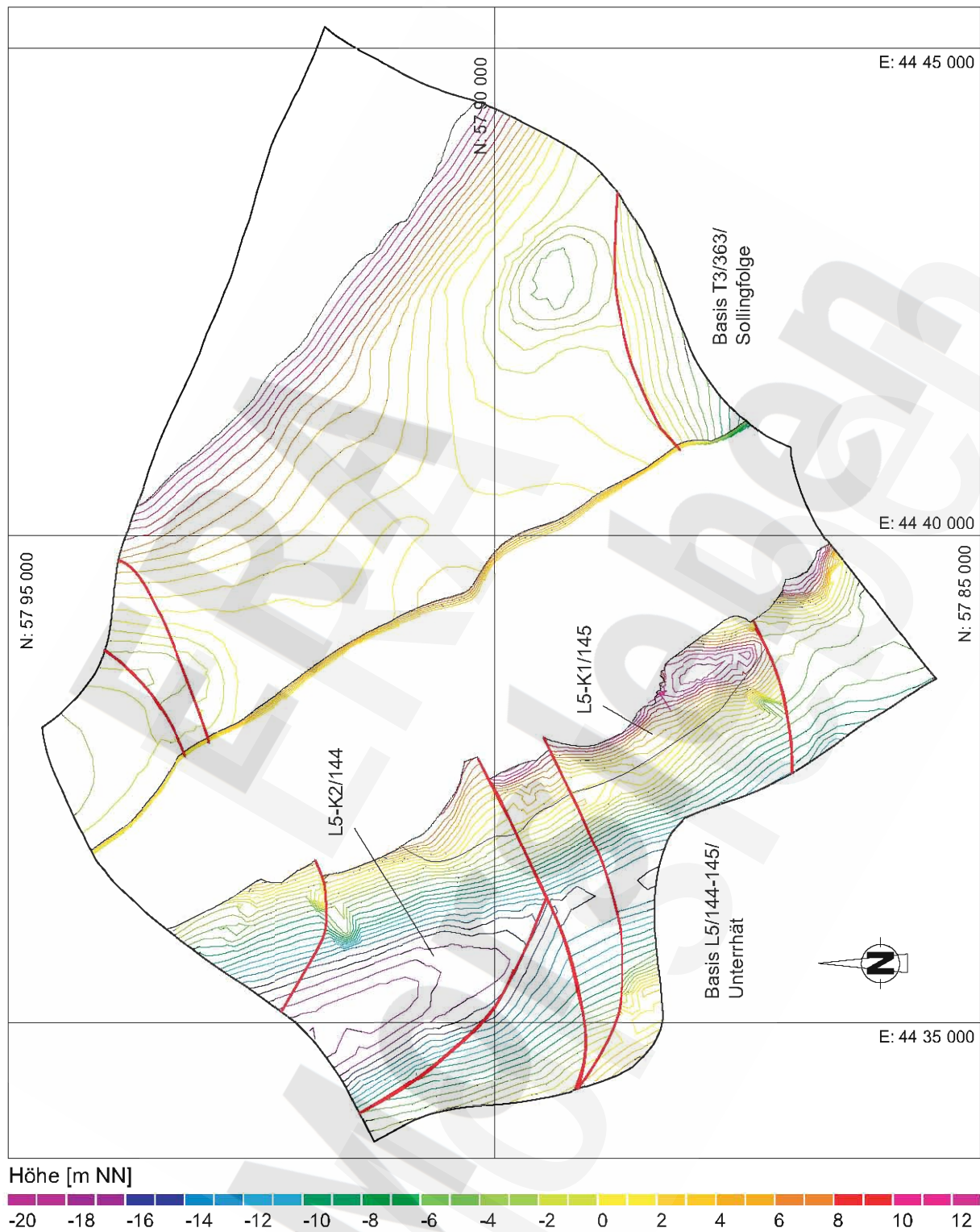
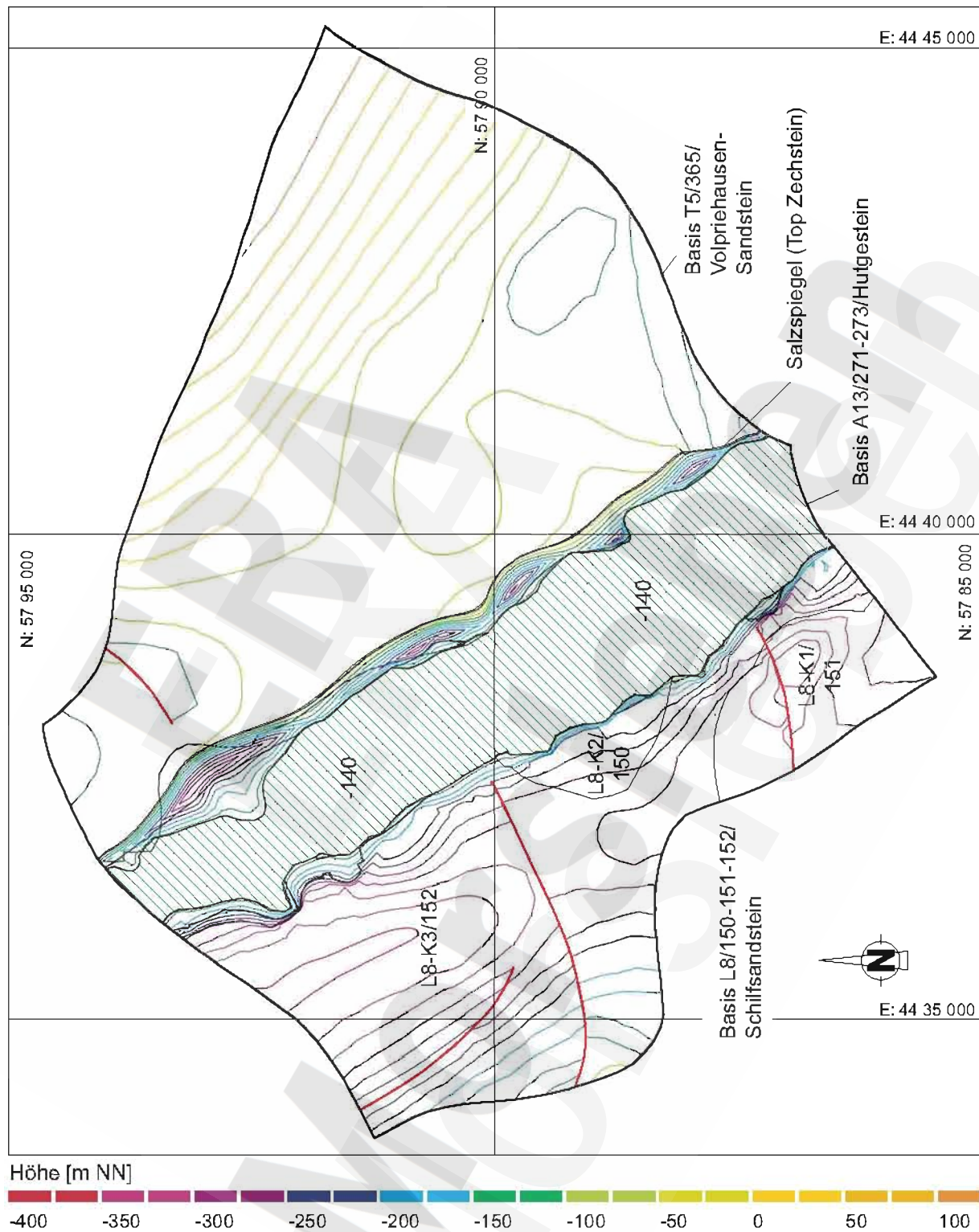


Abbildung 25 3D Süßwassermodell ERAM. Verbreitung der Einheiten L3/142/Mittelrät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte) mit Höhenlinien der jeweiligen Basisfläche



4305/03/basis\_144-145\_363.eps/shu/26.04.01

Abbildung 26 3D Süßwassermodell ERAM. Verbreitung der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte) mit Höhenlinien der Basisfläche



4305/basis\_kmS\_hud\_volpre epsishu/09 06 01

Abbildung 27 3D Süßwassermmodell ERAM. Verbreitung der Einheiten L8/150-151-152/ Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte) mit Höhenlinien der Basisfläche

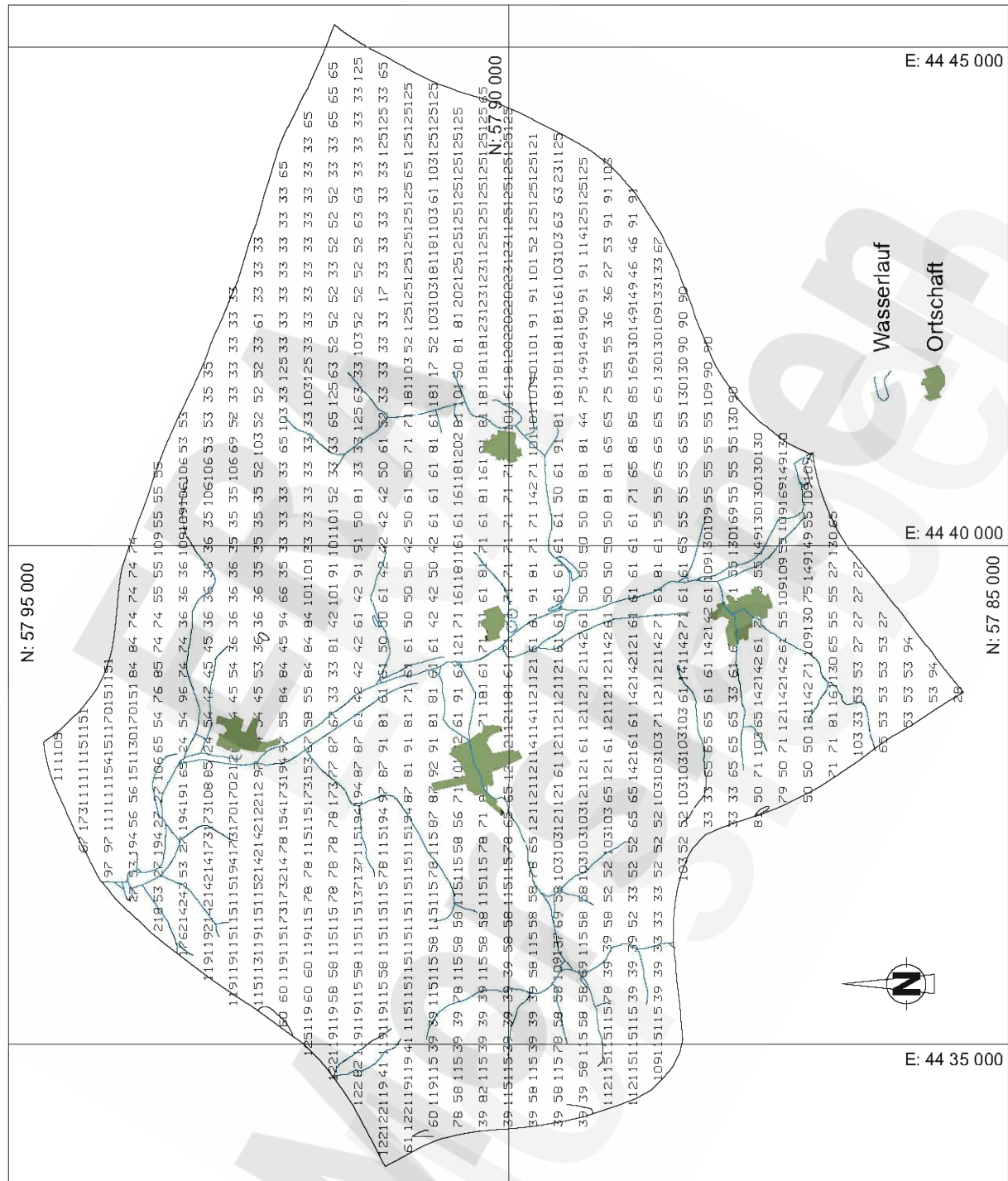
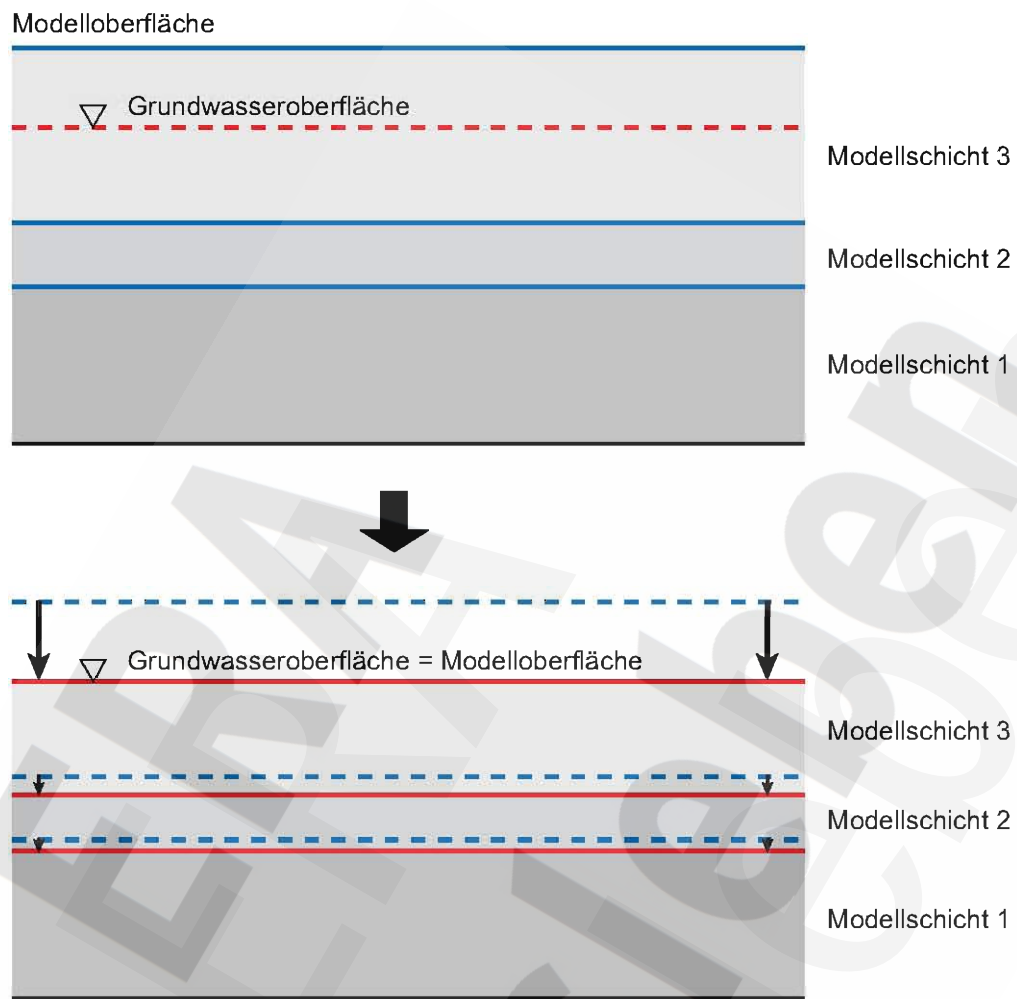
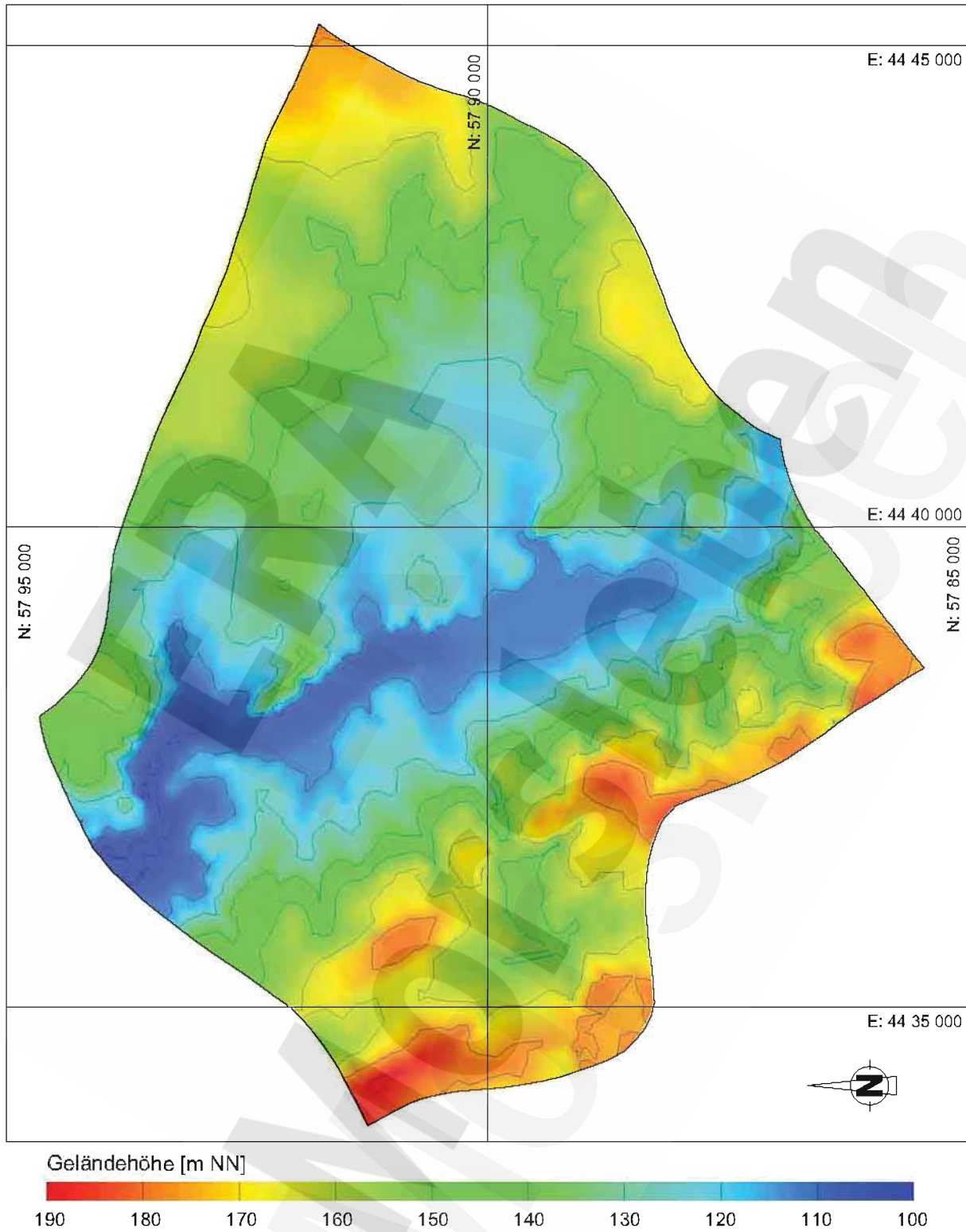


Abbildung 28 Flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildung (mm/a) im Modellgebiet ERAM, berechnet mit GWD ([12], Abbildung 4.14)



4305\_023\_abb02a.eps/shu/09.05.01

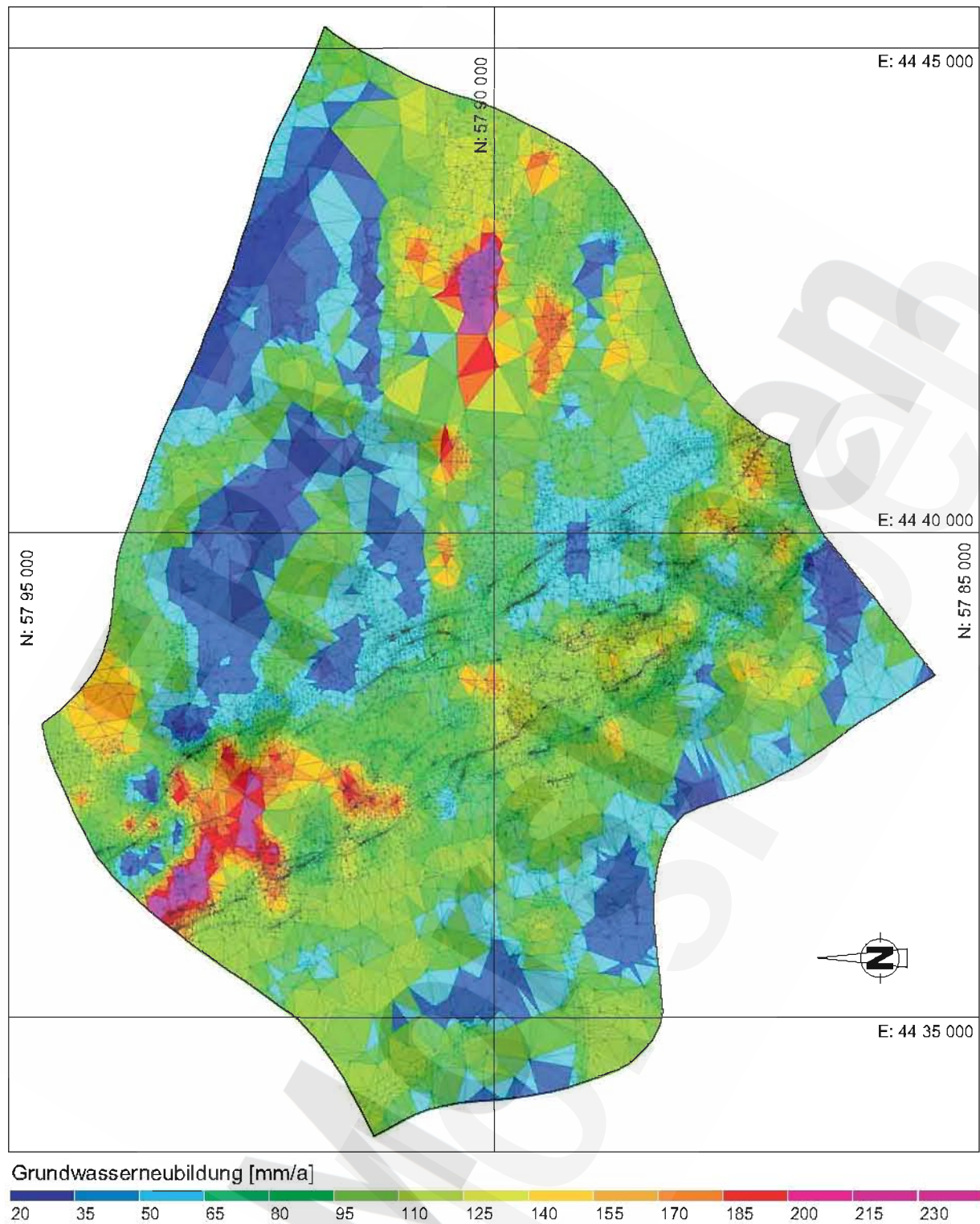
Abbildung 29 Schematische Darstellung zur Anpassung der Modellgeometrie an die Grundwasseroberfläche



4305/033/031\_dtm eps/08 04 01

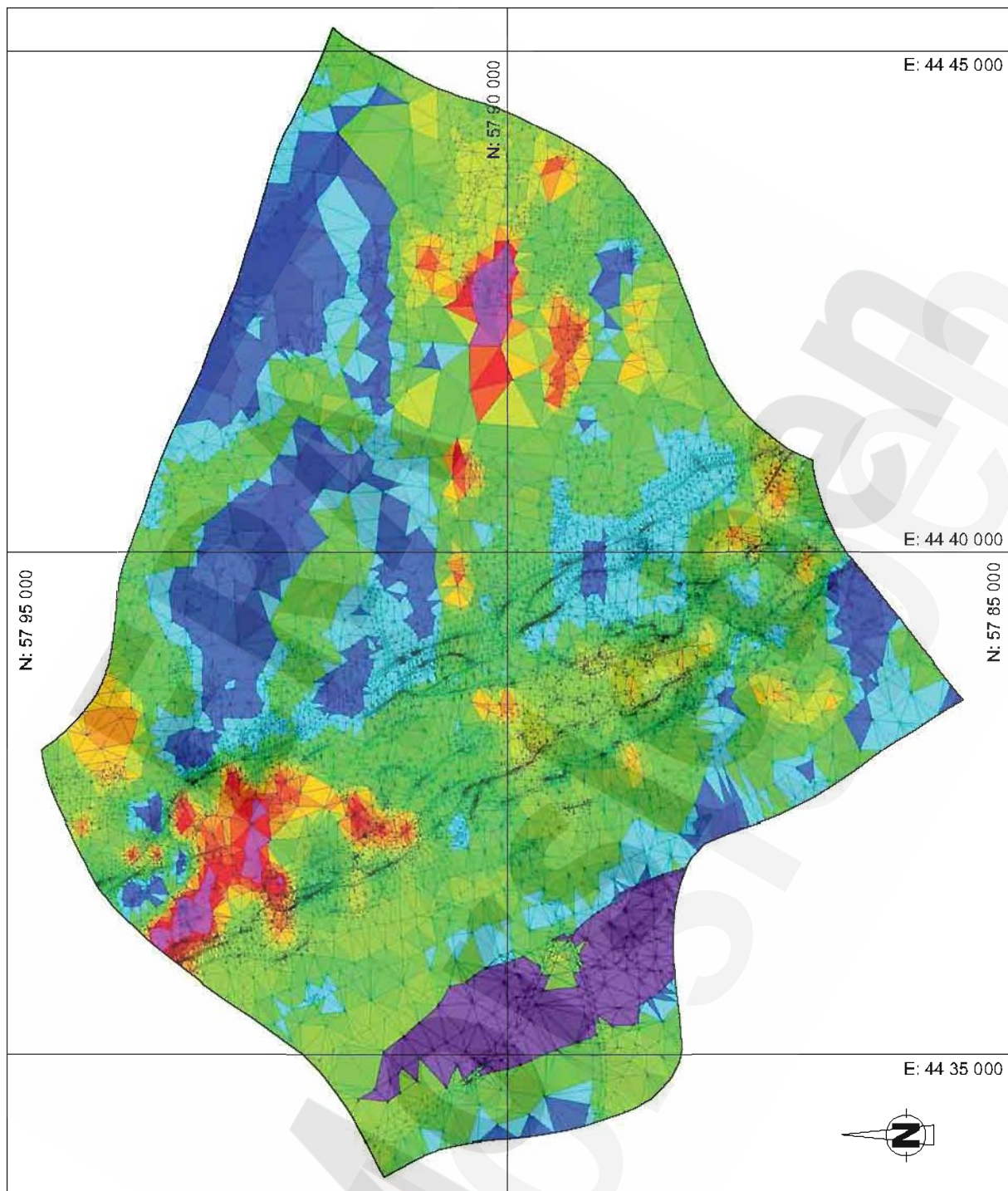
Abbildung 30 Digitales Geländemodell





4305/033/recharge\_bgr eps/19 04 01

Abbildung 31 Flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet ERAM nach [12], Abbildung 4.14 (vgl. Abbildung 28) nach erfolgtem Übertragen auf die Finite-Elemente-Diskretisierung mit Kriging. Vorgabe für den Rechenfall R44



4305/031\_r42\_gruwa eps/19.04.01

Grundwasserneubildung [mm/a]



Abbildung 32 Flächenhafte Verteilung der Grundwasserneubildung im Modellgebiet ERAM nach Kriging und Anpassungen im Brunntal. Vorgabe für die Rechenfälle R42 und R43

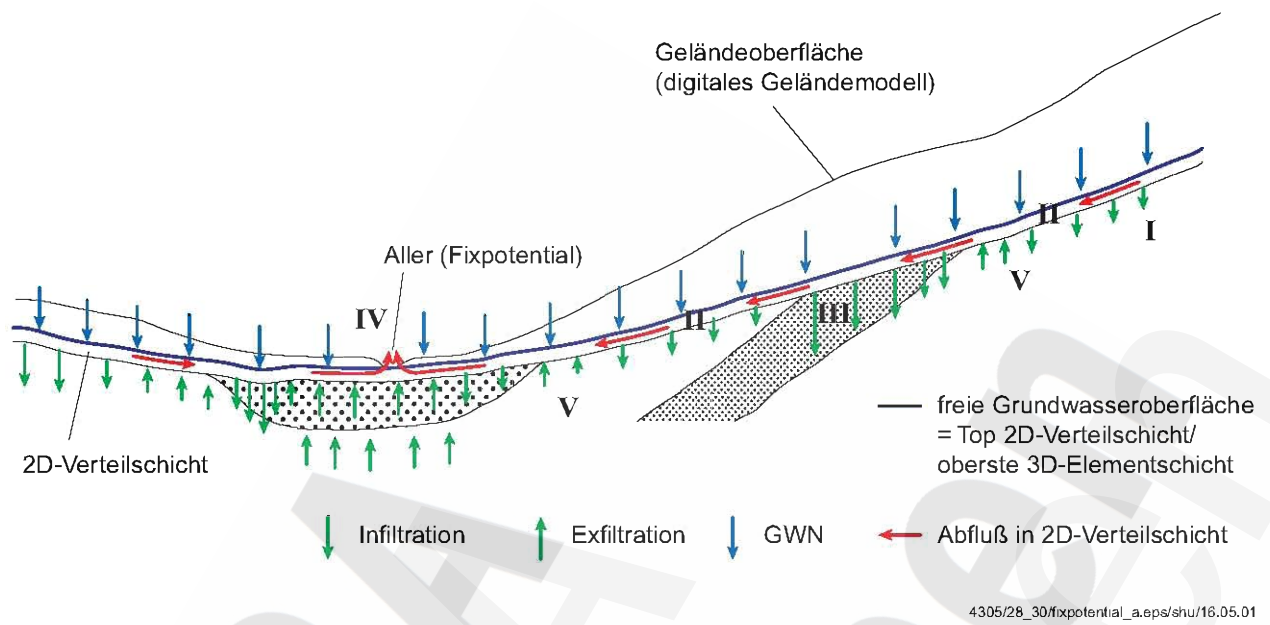


Abbildung 33 Schematische Darstellung zur Funktion der 2D Oberflächenelemente als Verteilschicht der vorgegebenen Grundwasserneubildung

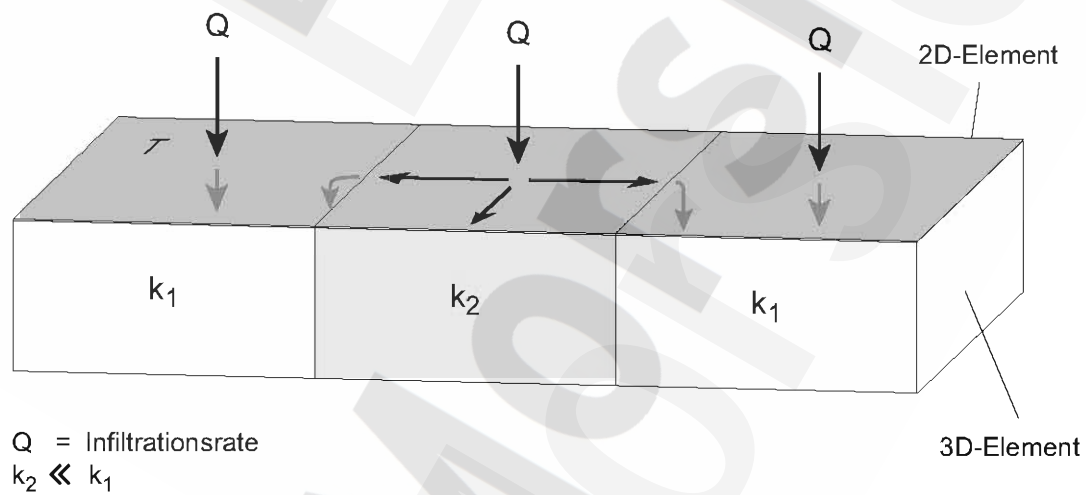
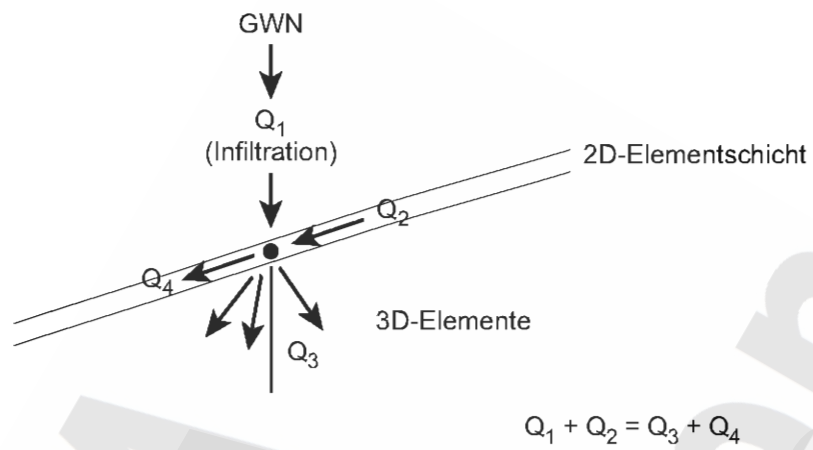
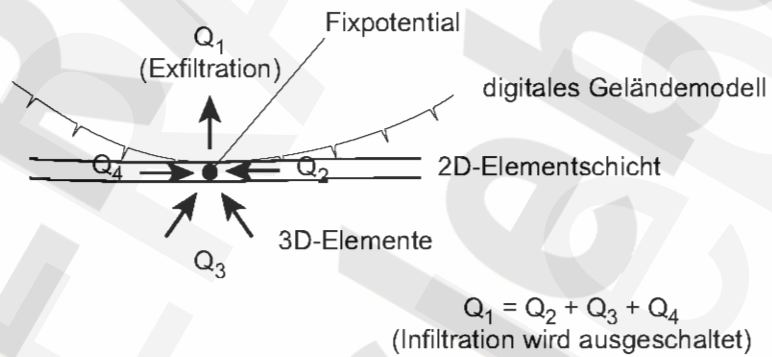


Abbildung 34 Schematische Darstellung der Wirkungsweise der 2D Verteilschicht in den Berechnungen mit freier Oberfläche

a) Normaler Grundwasserneubildungsknoten



b) Exfiltrationsknoten



4305/28\_30/freesurface\_ex.eps/shu/26.04.01

Abbildung 35 Berechnung der Flüsse in den Knoten entlang der Modelloberfläche.  
(a) Normaler Grundwasserneubildungsknoten, (b) Exfiltrationsknoten

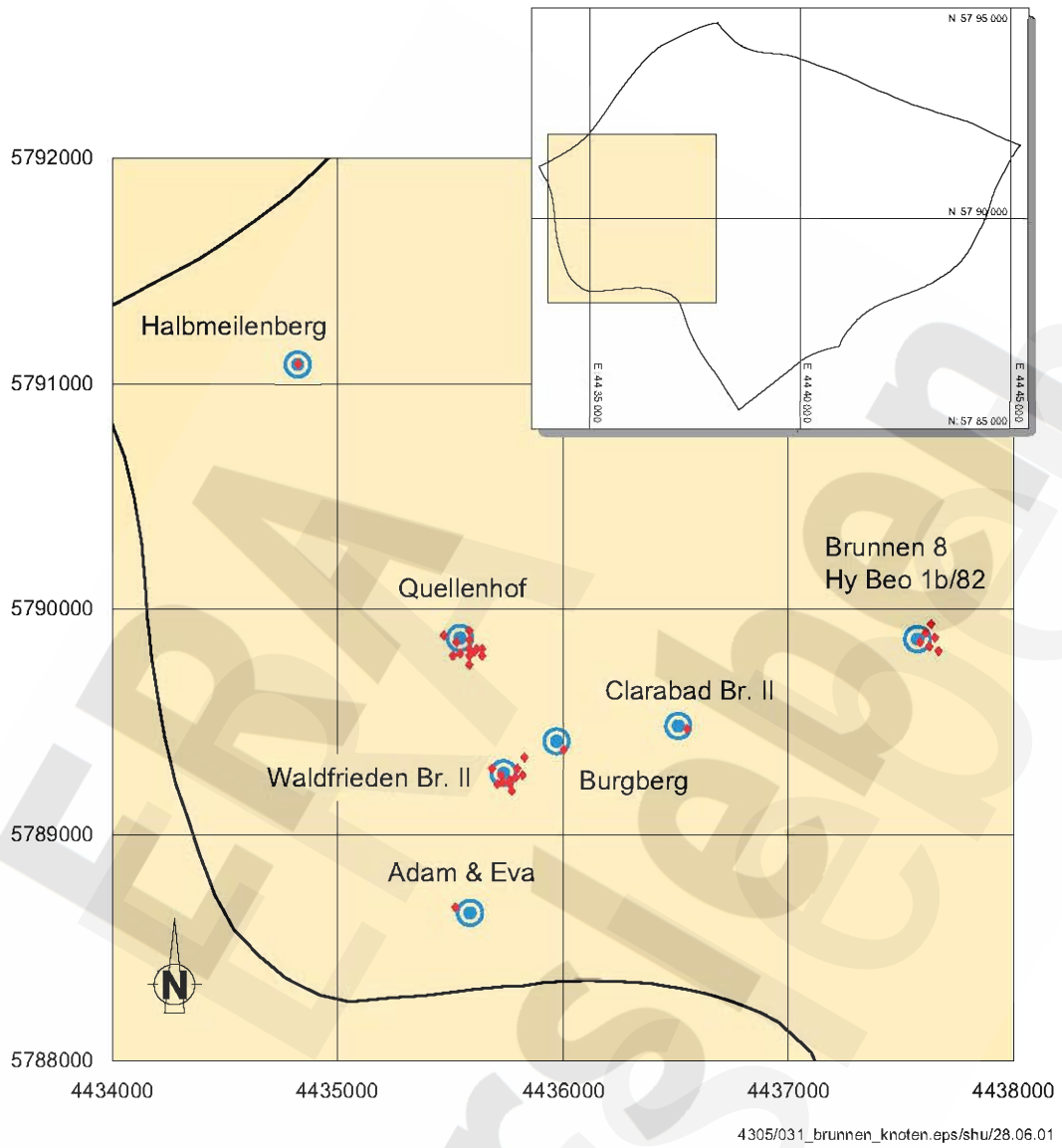


Abbildung 36 Grundwasserentnahme Brunntal. Geographische Verteilung der Entnahmeknoten

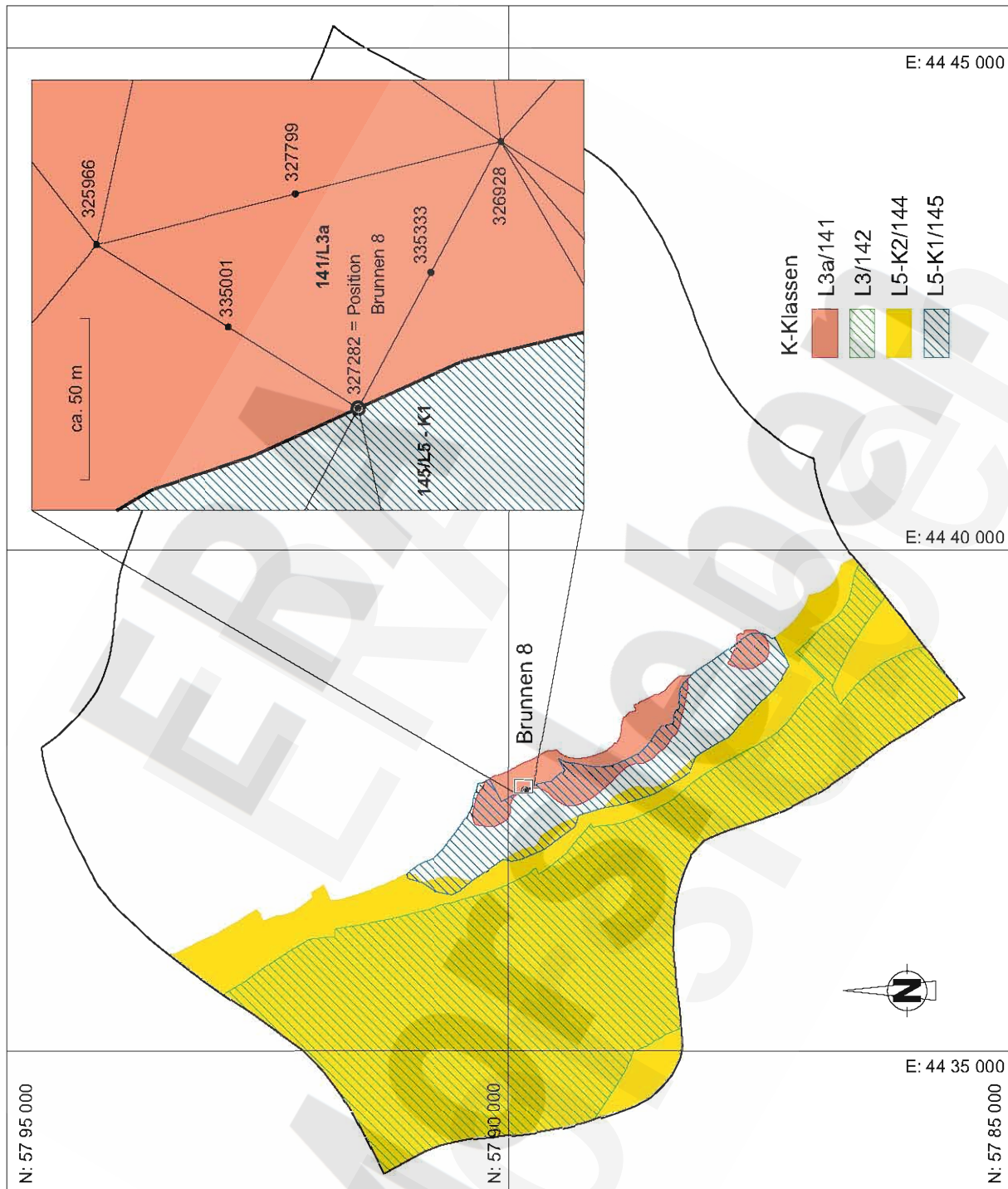


Abbildung 37 Verbreitungsgebiet der Einheiten L3a/141, L3/142, L5-K2/144, L5-K1/145 im Lappwald und Detailskizze des Entnahmebereiches des Brunnen 8

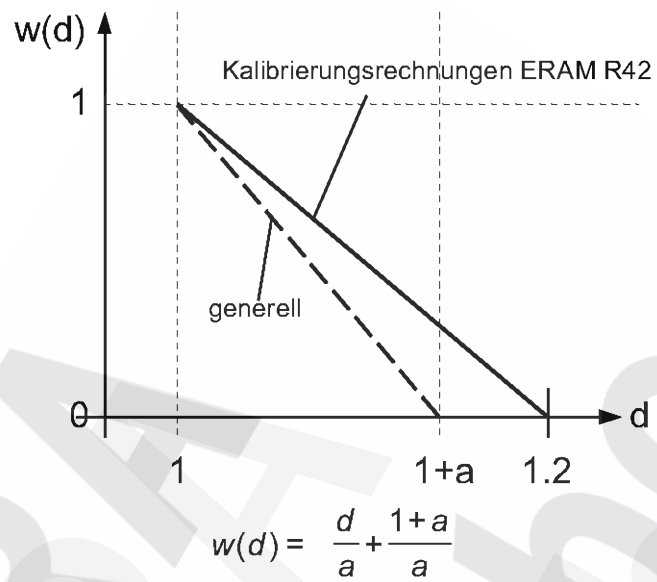
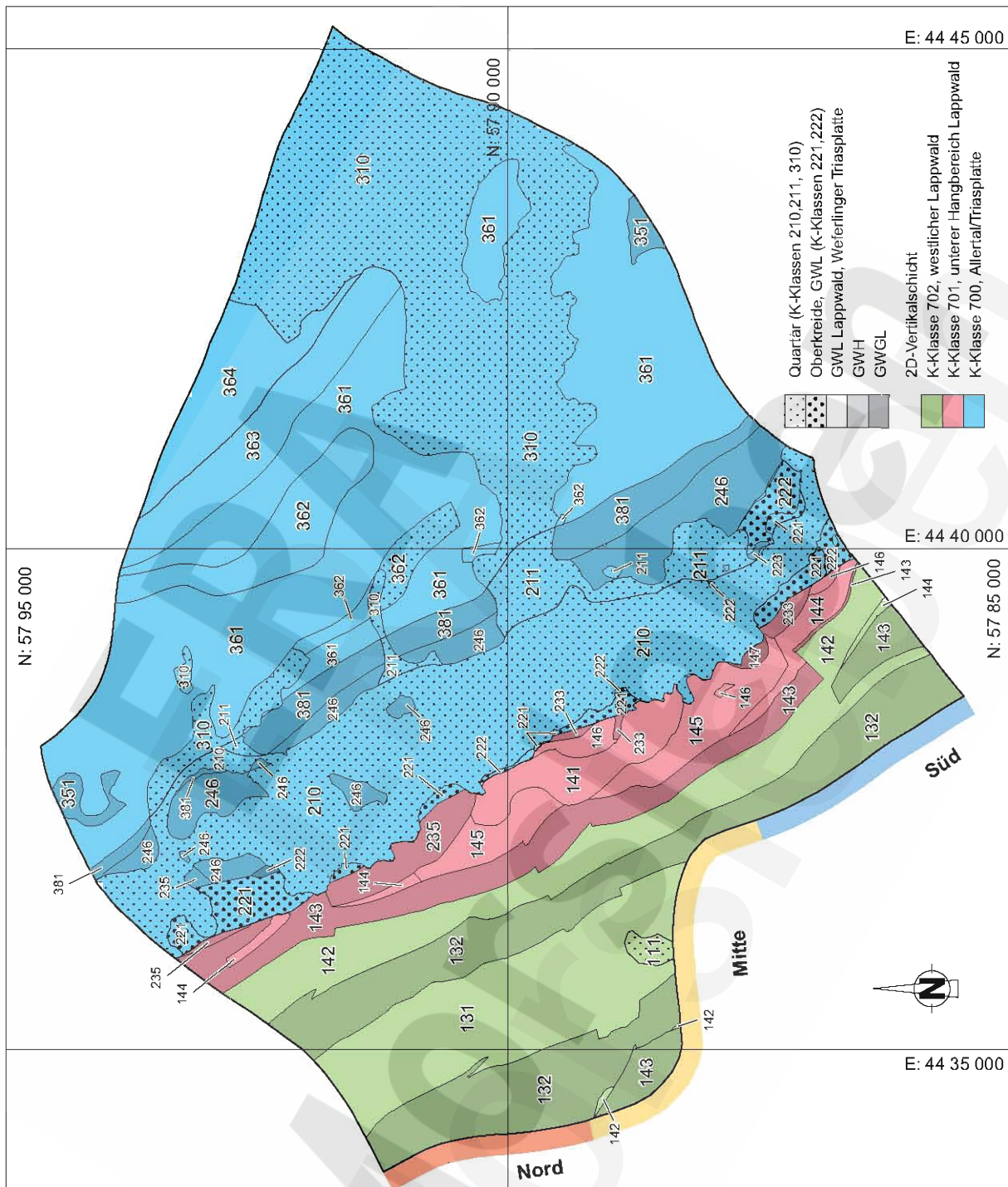


Abbildung 38 Gewichtung der Zielfunktion  $w$  in Abhängigkeit der Grundwasserdichte  $d$



4305\_031\_abb04\_eps/shu/20.04.01

Abbildung 39 Rechenfälle R42, R43. Lokalisation der Abschnitte mit Randzufluß im Lappwald (Abschnitte Süd, Mitte, Nord) und Zonierung der 2D Verteilschicht



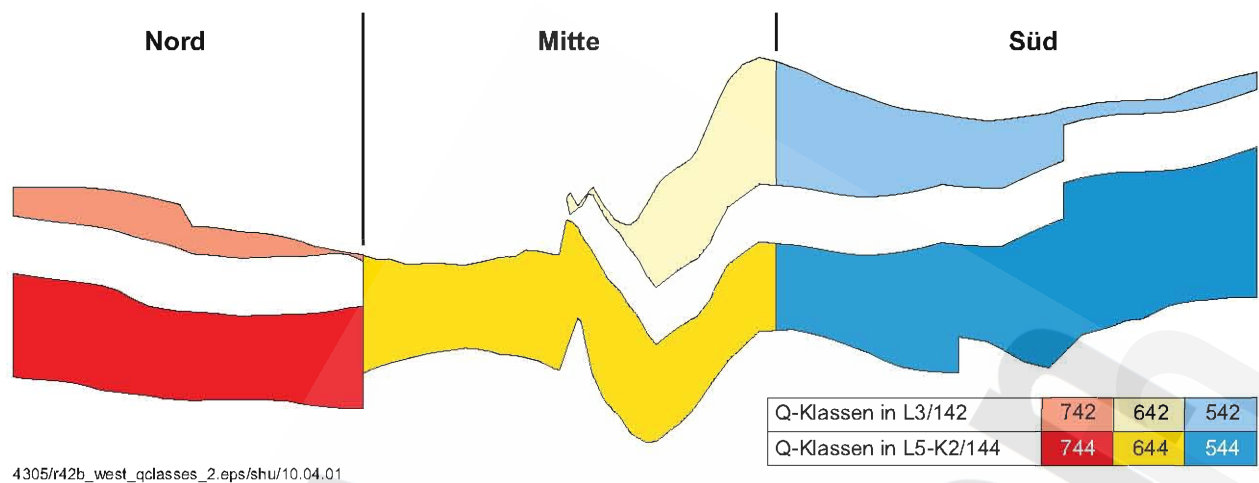


Abbildung 40 Rechenfälle R42, R43. Randzufluß im Lappwald. Aufsicht auf den westlichen Modellrand mit den Zuflußabschnitten Süd, Mitte und Nord in den Aquiferen L3/142 (oben) und L5-K2/144 (unten)

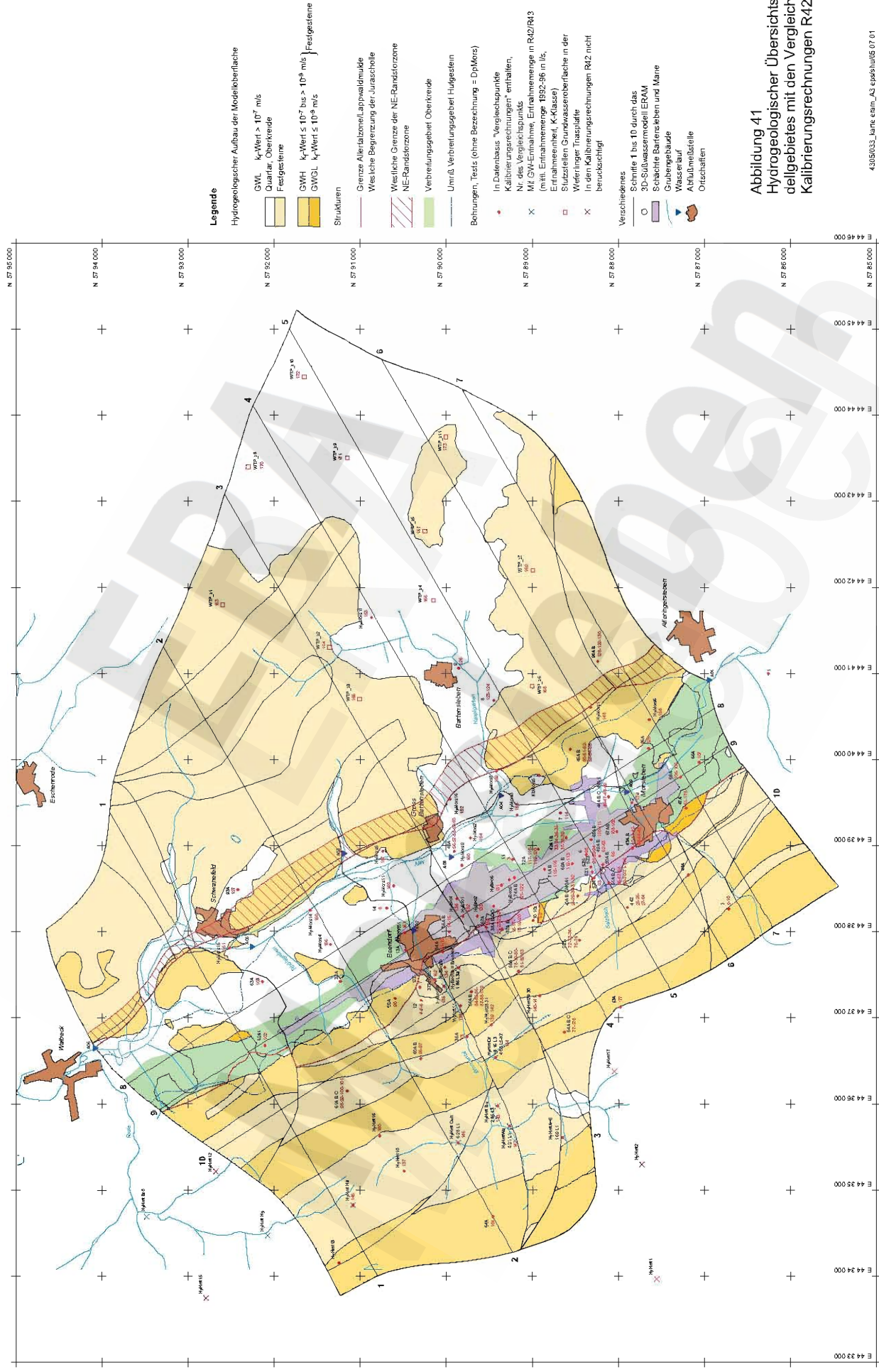


Abbildung 41  
Hydrogeologischer Übersichtsplan des Modellgebietes mit den Vergleichspunkten der Kalibrationsrechnungen R42

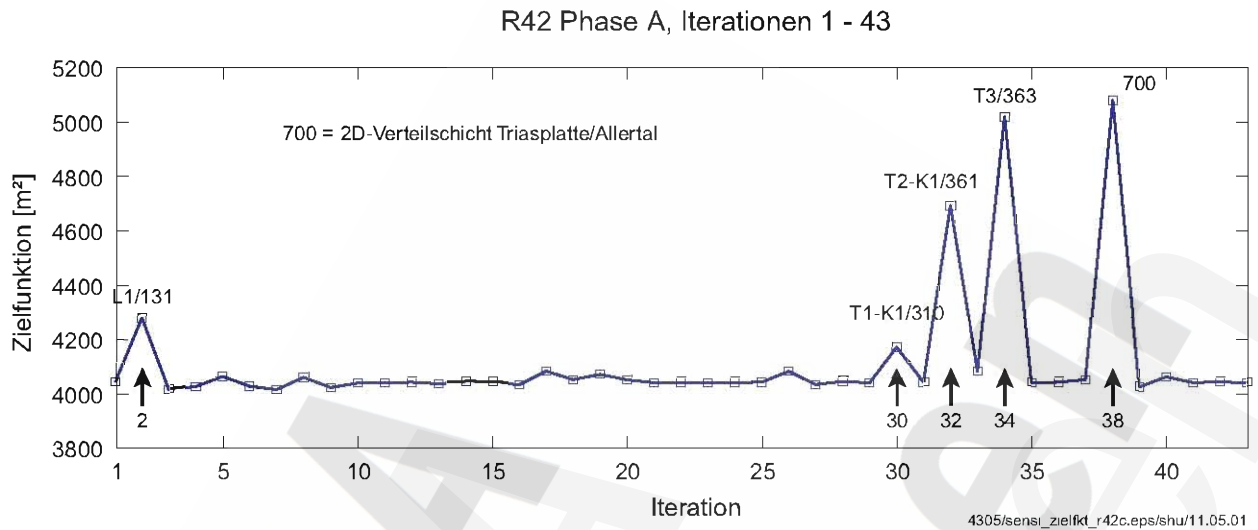


Abbildung 42 Kalibrierungsrechnungen R42, Iterationen 1 bis 43, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die Zielfunktion

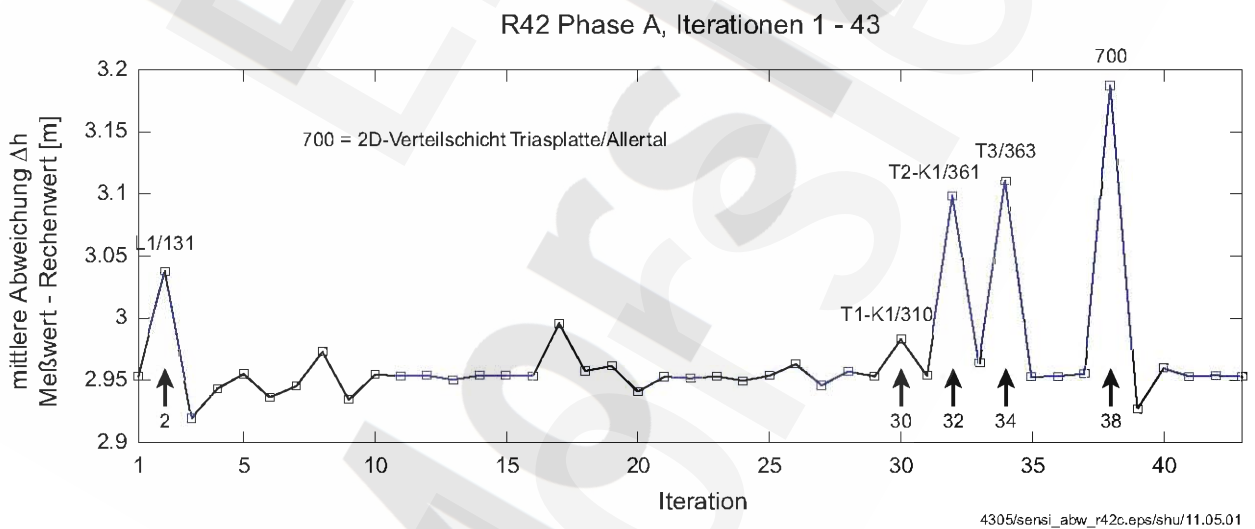


Abbildung 43 Kalibrierungsrechnungen R42, Iterationen 1 bis 43, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert

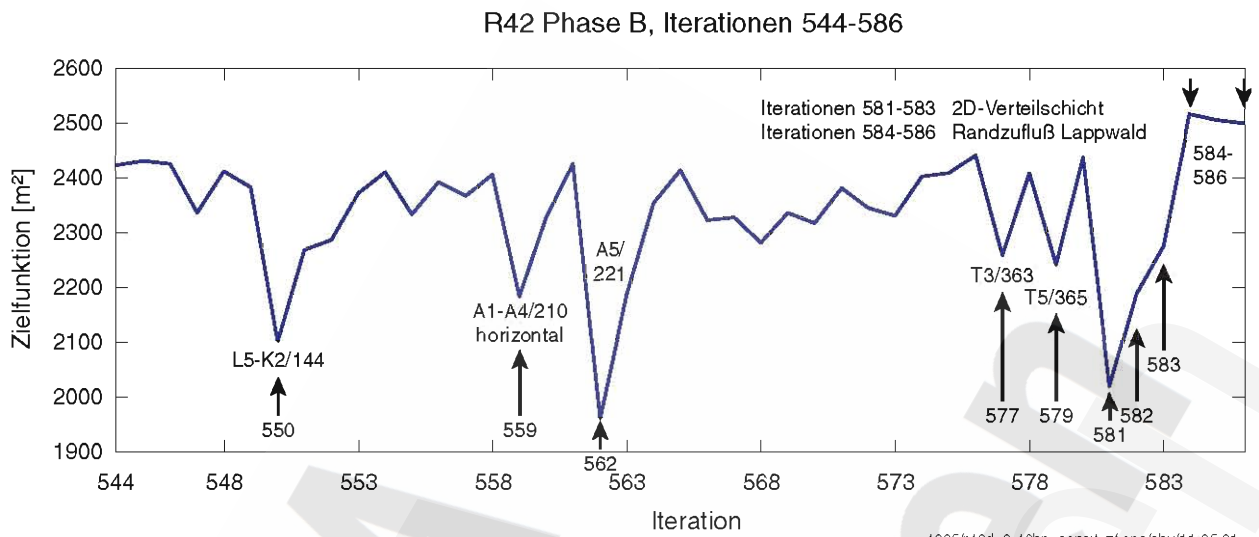


Abbildung 44 Kalibrierungsrechnungen R42 (Phase B), Iterationen 544 bis 586, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die Zielfunktion

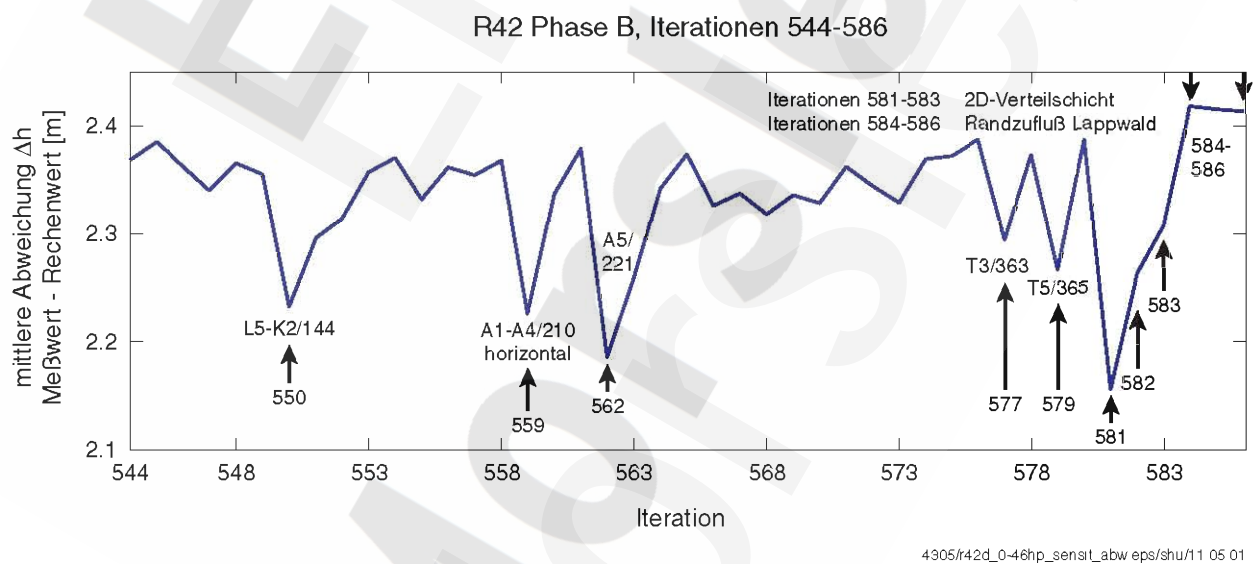


Abbildung 45 Kalibrierungsrechnungen R42 (Phase B), Iterationen 544 bis 586, Sensitivitätsrechnungen. Auswirkungen der Änderung je eines einzelnen Parameters auf die mittlere Abweichung Meißwert-Rechenwert

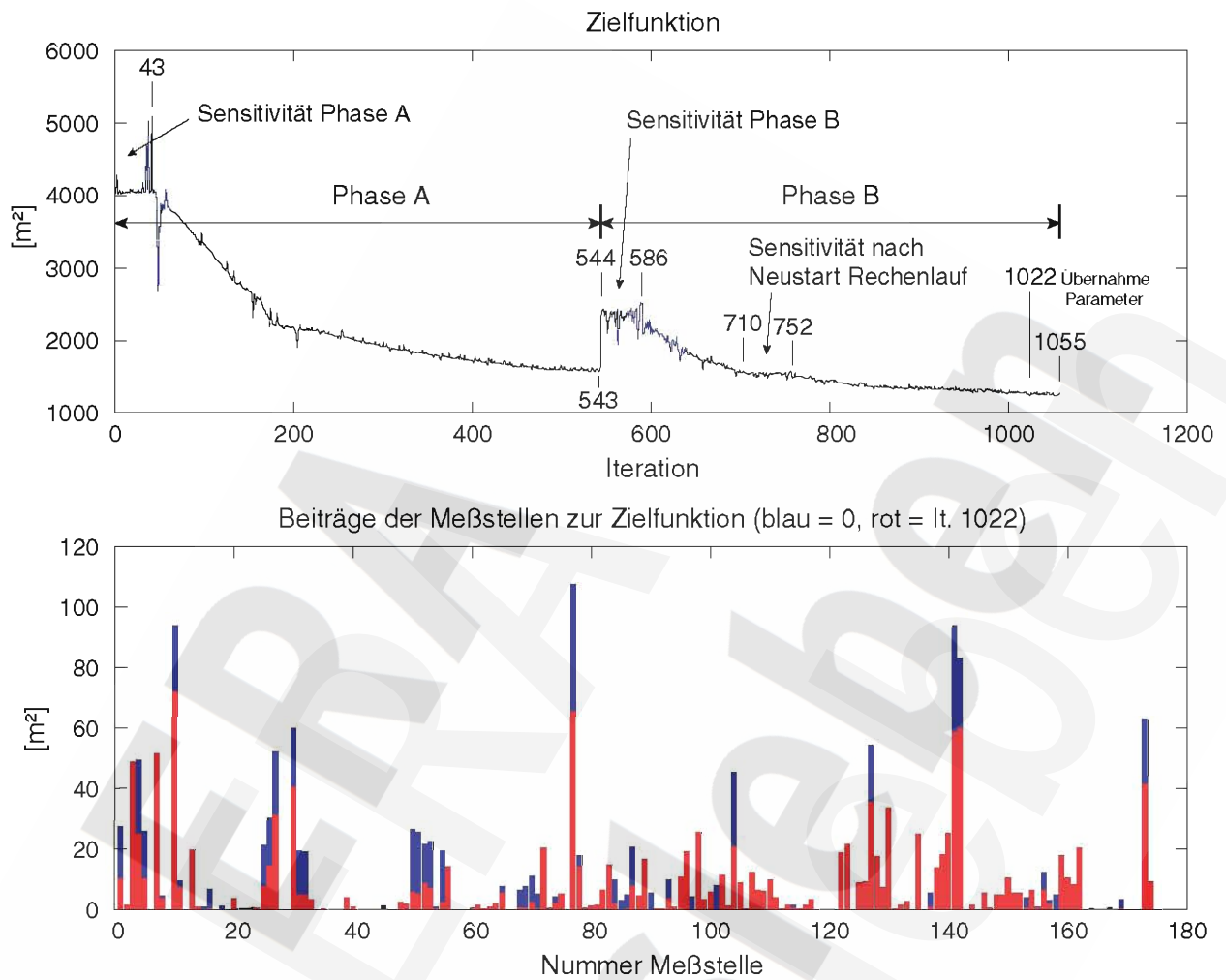


Abbildung 46 Kalibrierungsrechnungen R42. Entwicklung der Zielfunktion und Beiträge der einzelnen Meßstellen

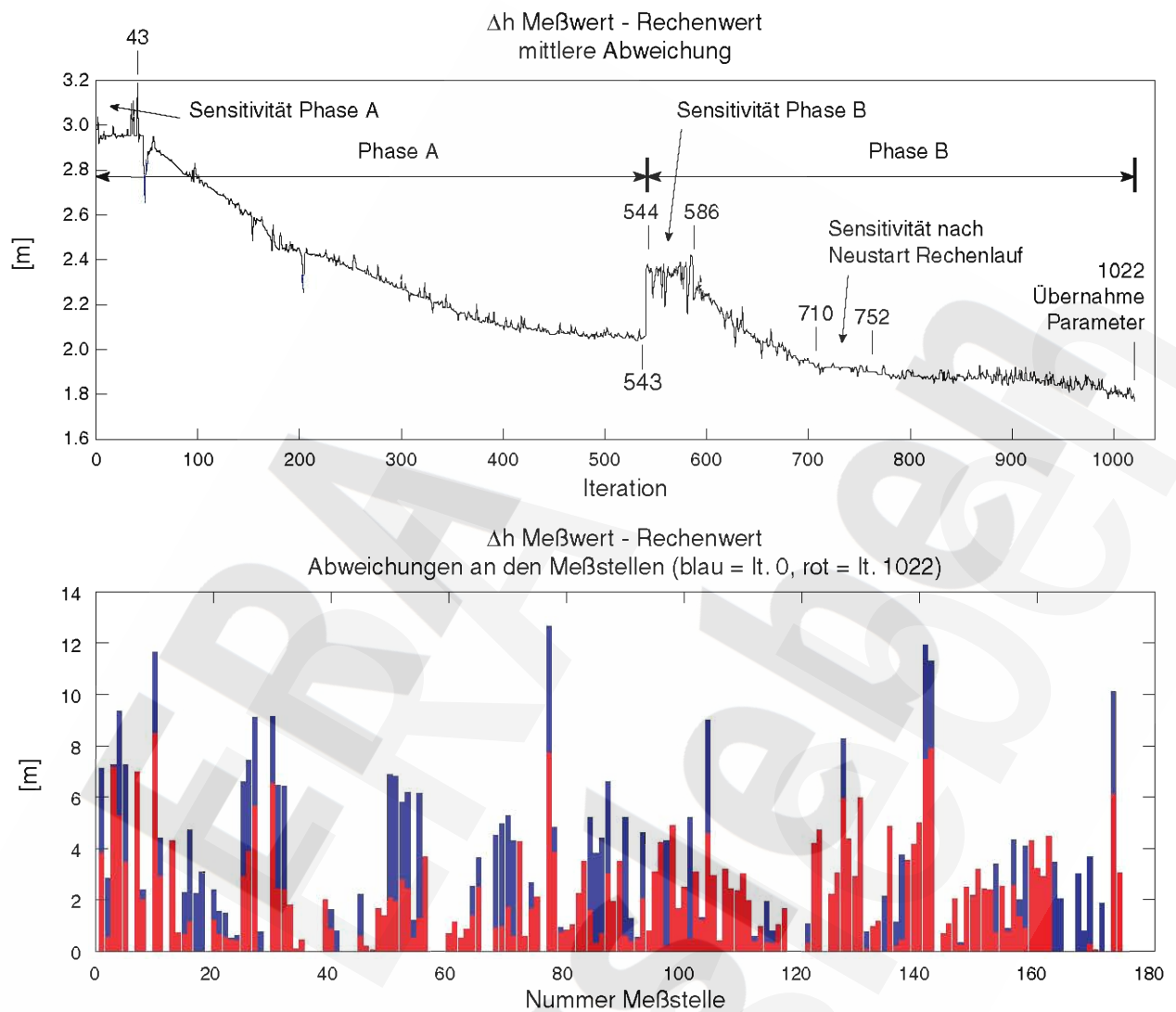


Abbildung 47 Kalibrierungsrechnungen R42. Entwicklung der Abweichung Meßwert-Rechenwert und Veränderung an den einzelnen Meßstellen

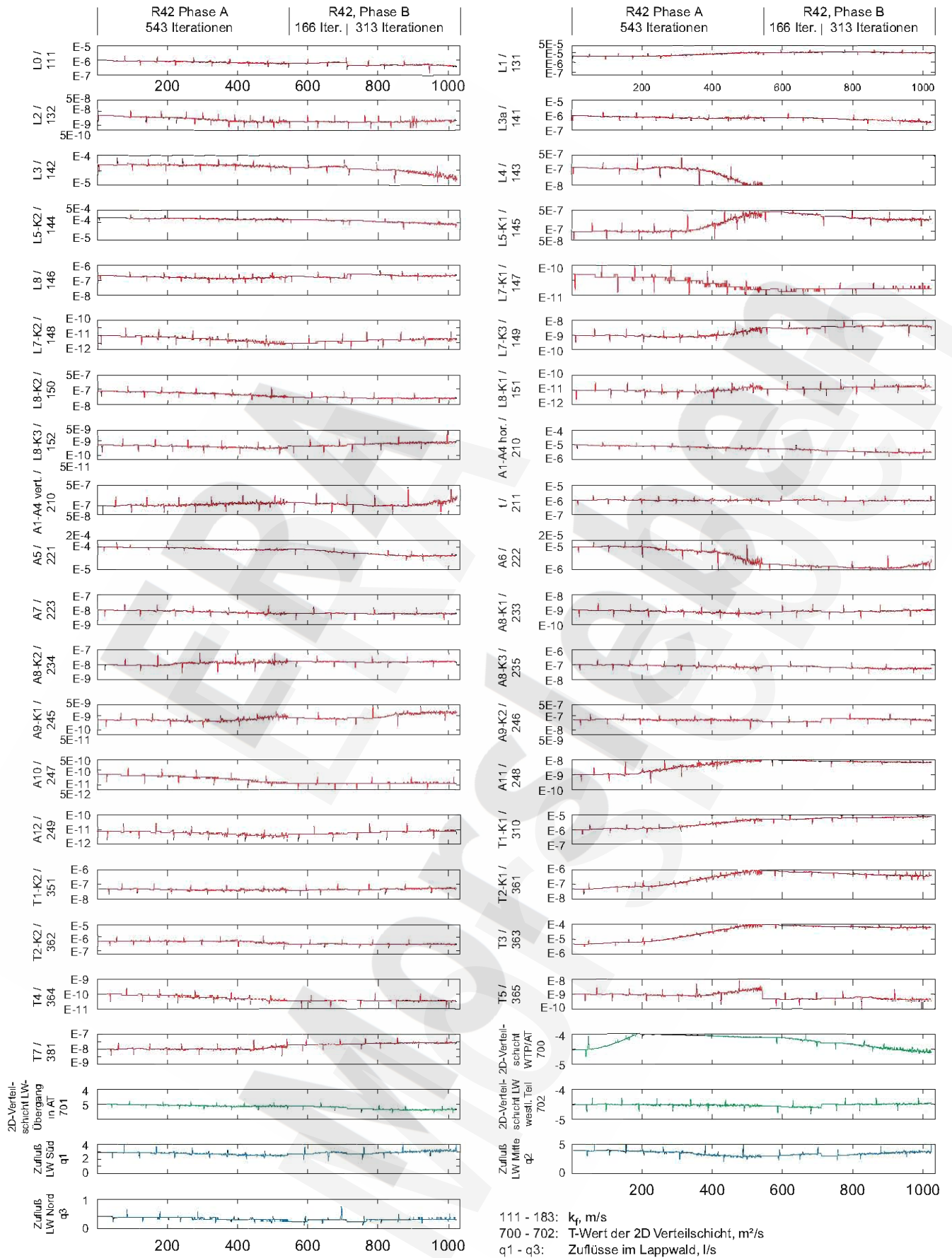
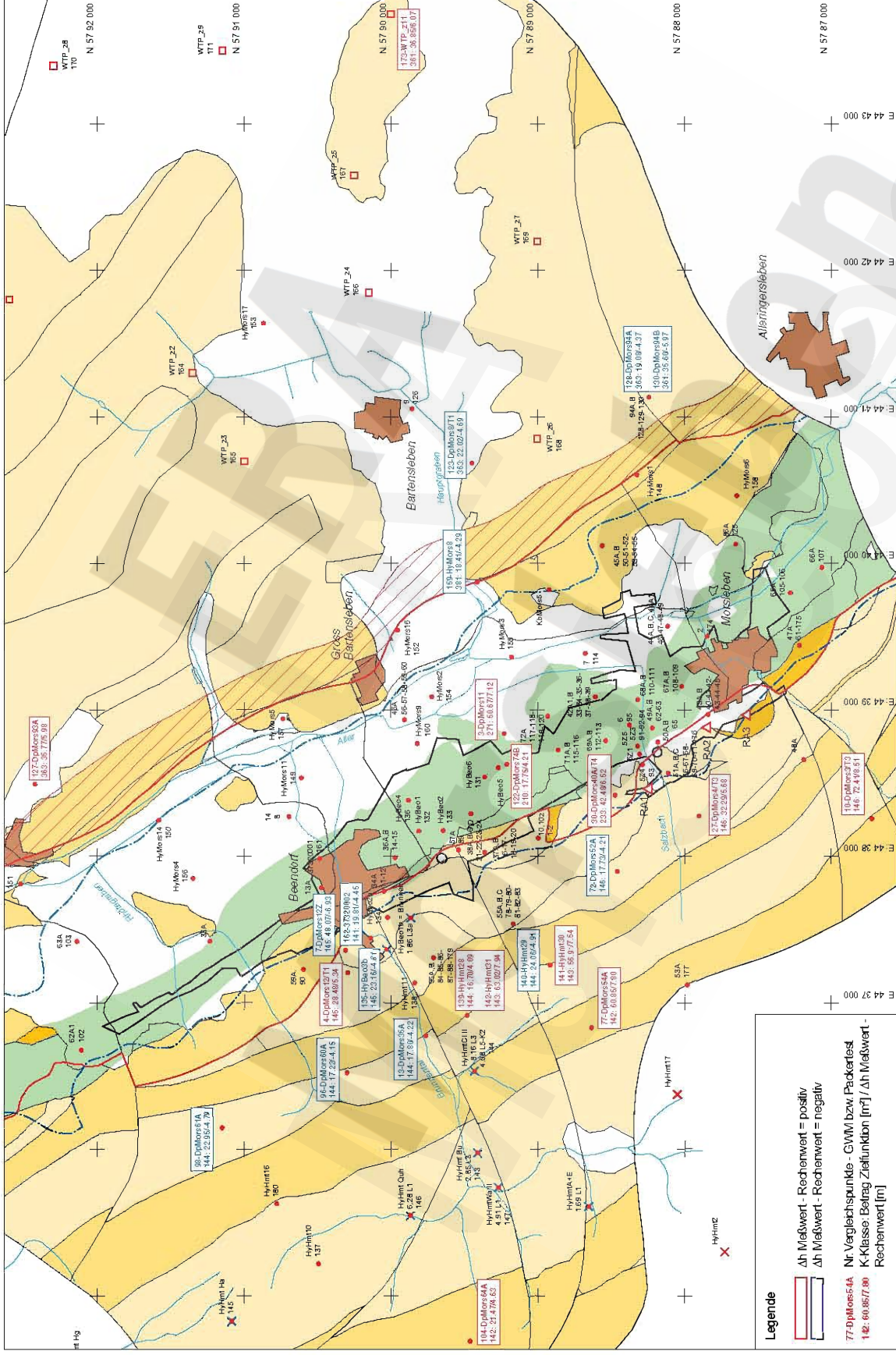


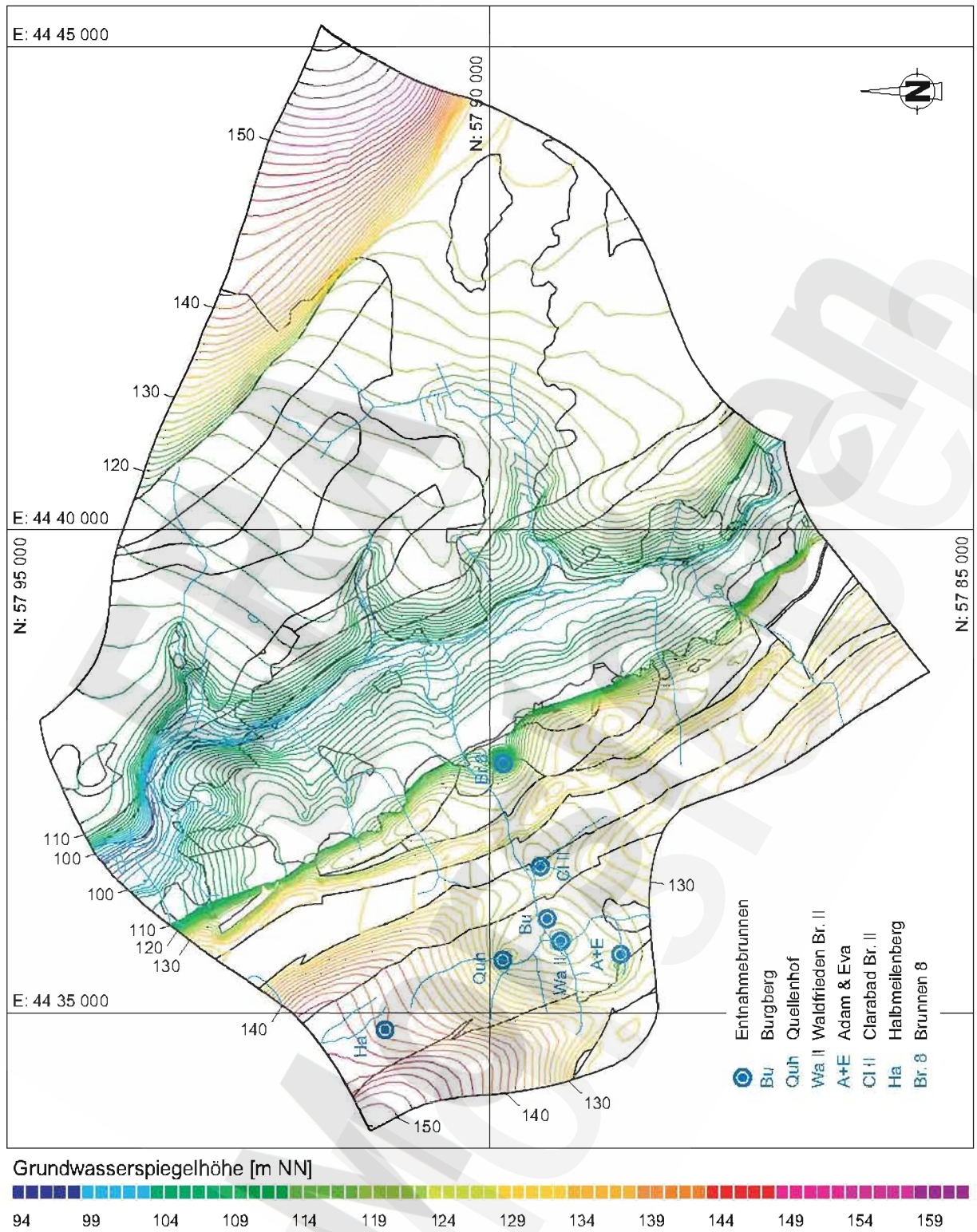
Abbildung 48 Kalibrierungsrechnungen R42. Entwicklung der kalibrierten Variablen ( $k_f$ -Werte, Randzuflüsse Lappwald und T-Werte der 2D Verteilungsschicht)



4305/33\_Leite Elem. 34\_alsHufe 01 01

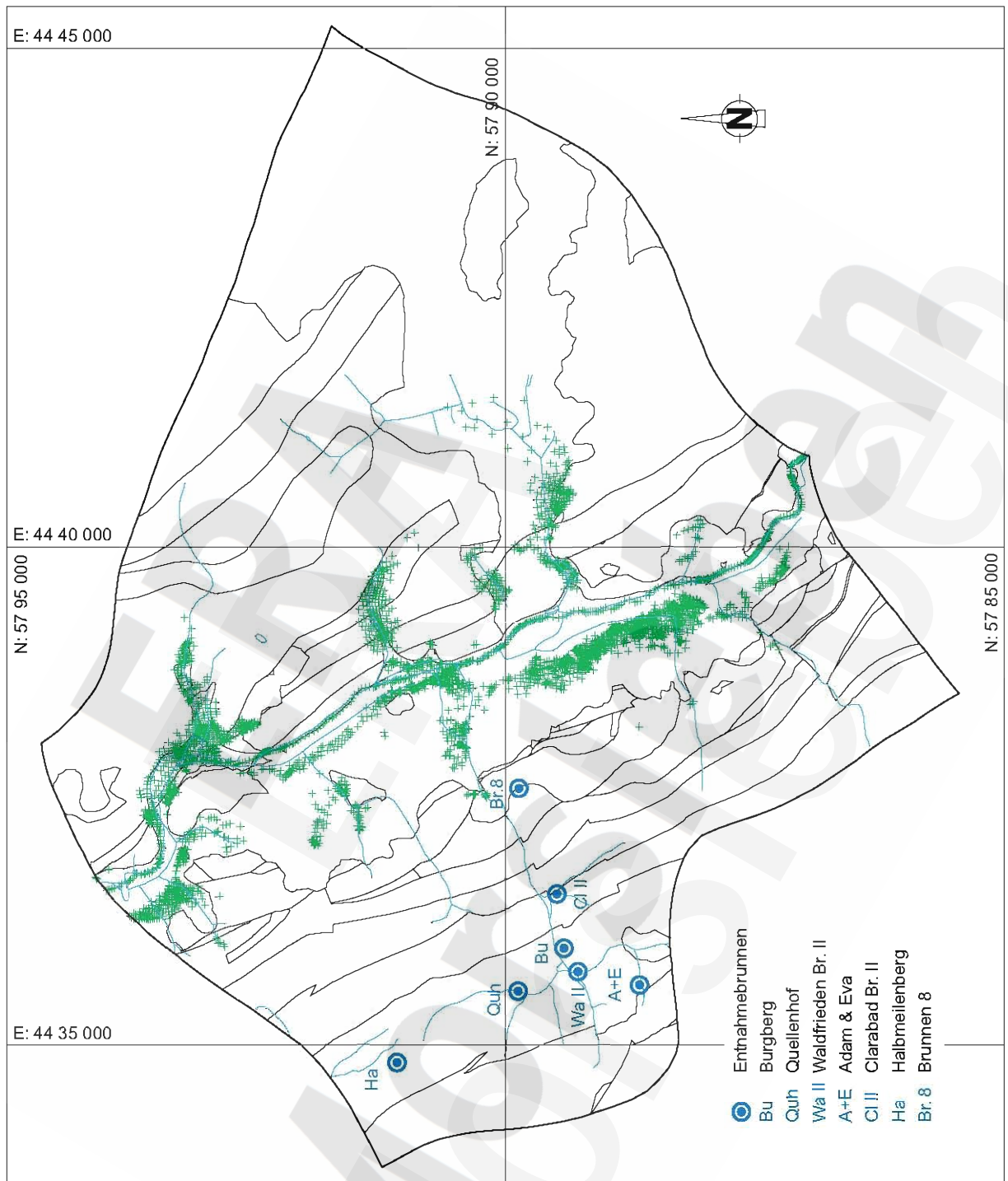
Abbildung 49 Kalibrierungsrechnungen R42, Iteration 1022. Vergleichspunkte mit Beiträgen zur Zielfunktion von 16 m<sup>2</sup> und mehr (Abweichung | Maßwert-Rechenwert | ≥ 4,0 m)





4305/33/R42d\_313c\_piezo\_eps/shu/11 07 01

Abbildung 50 Rechenfall R43. Berechnete Grundwasseroberfläche



4305/33/R42d\_exfzonen.eps/shu/10.07.01

Abbildung 51 Rechenfall R43. Verteilung der Exfiltrationsknoten (grüne Kreuze)

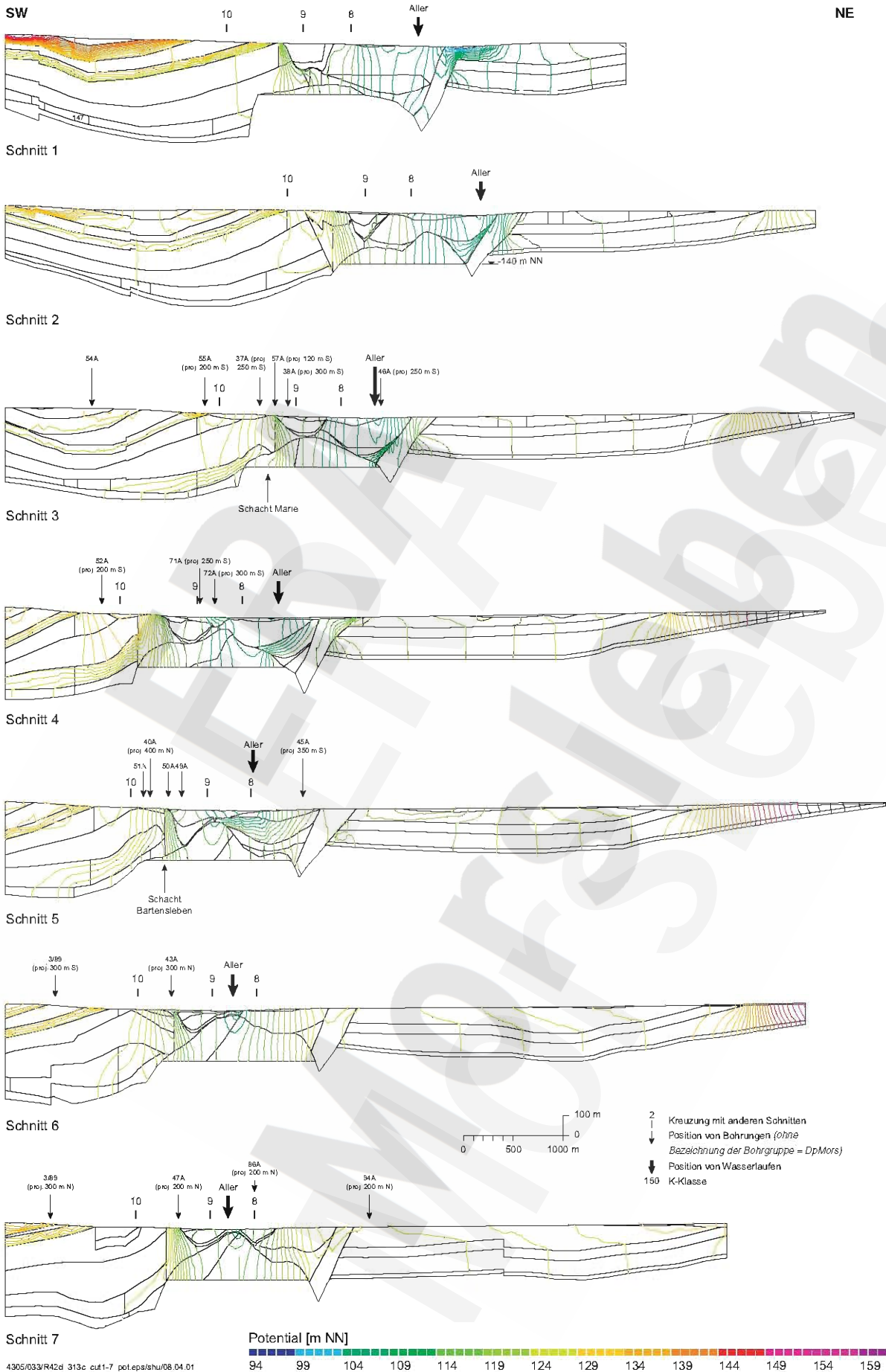


Abbildung 52 Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Schnitte 1 bis 7 quer zum Allertal

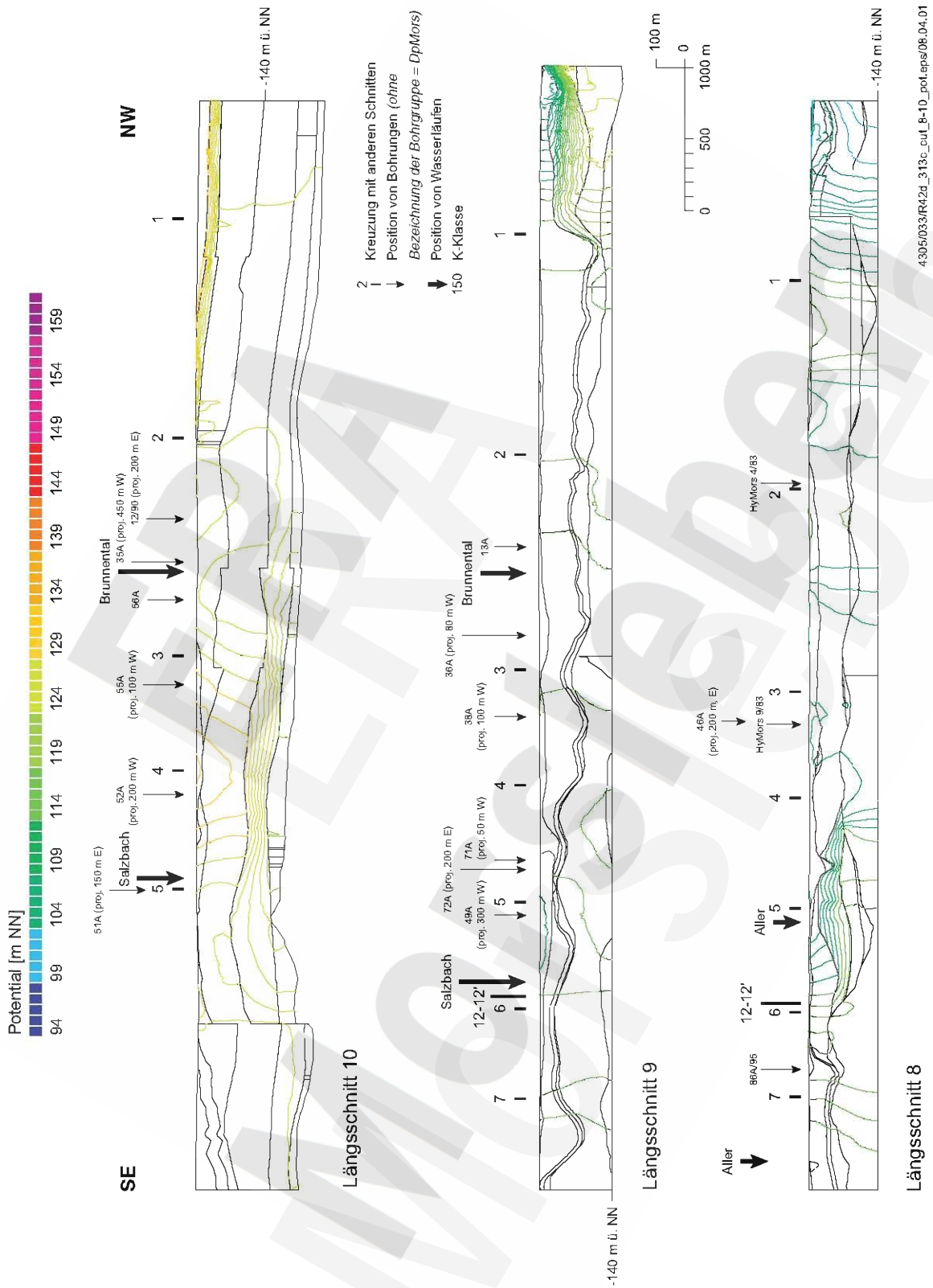
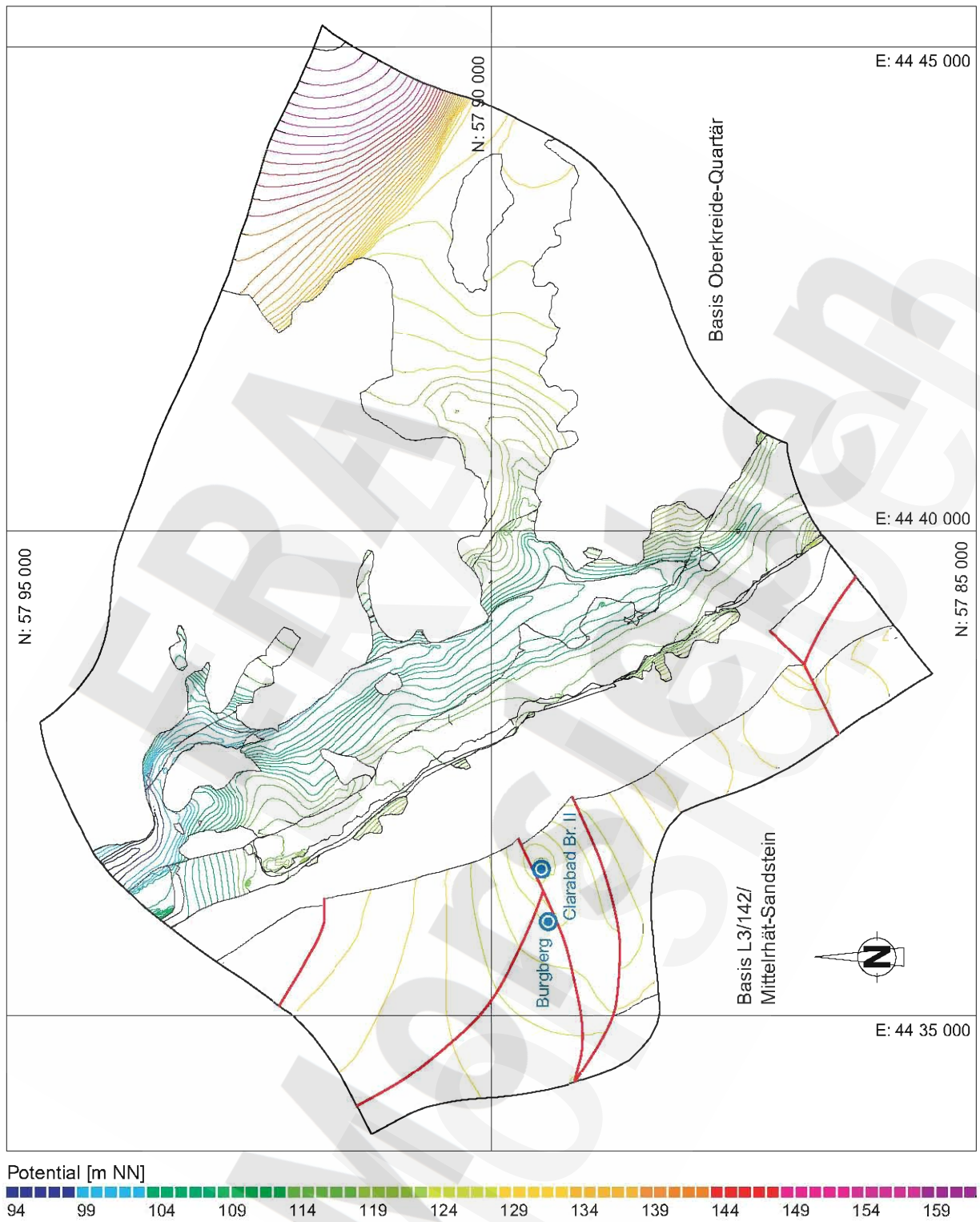
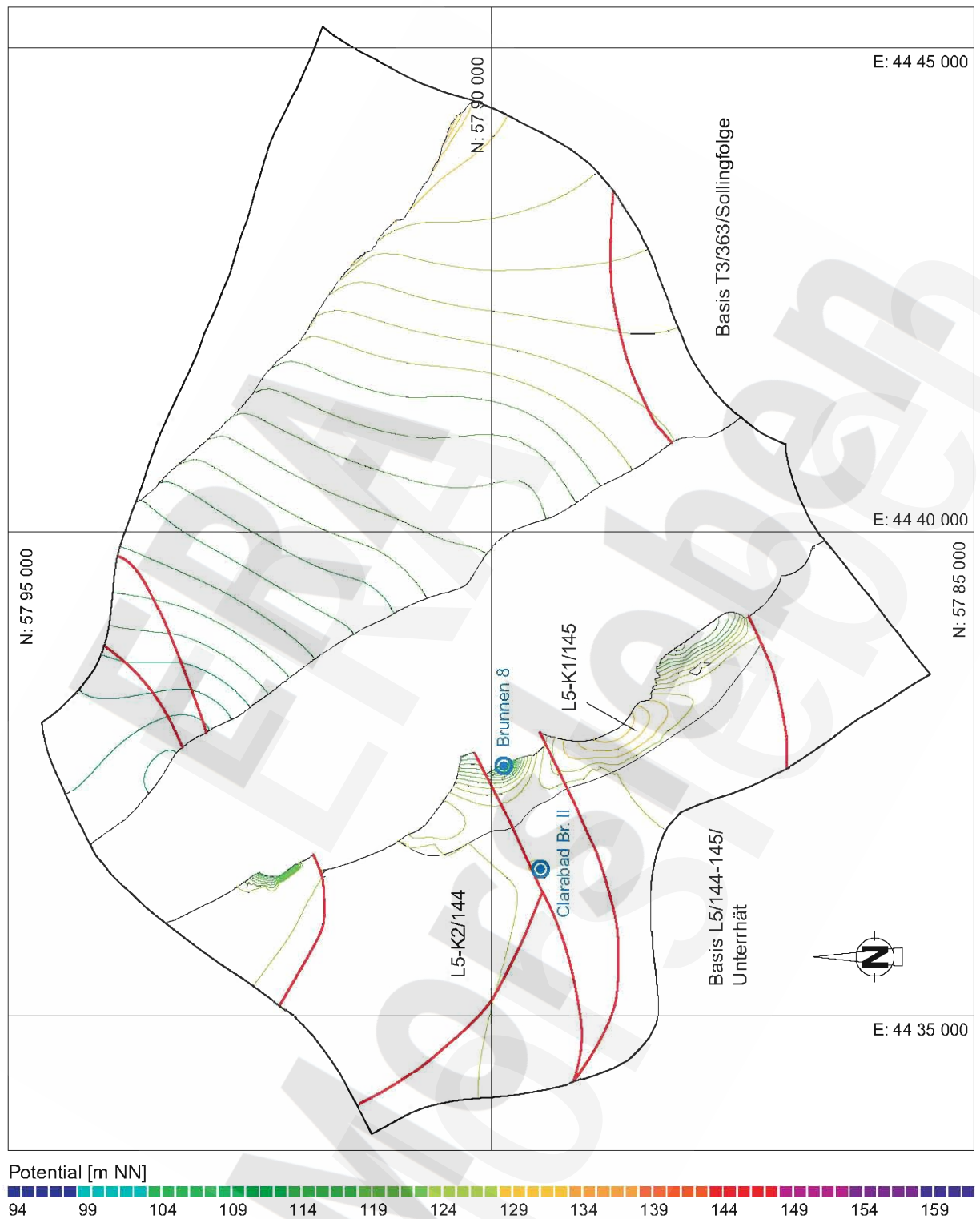


Abbildung 53 Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Schnitte 8 bis 10 parallel des Allertals



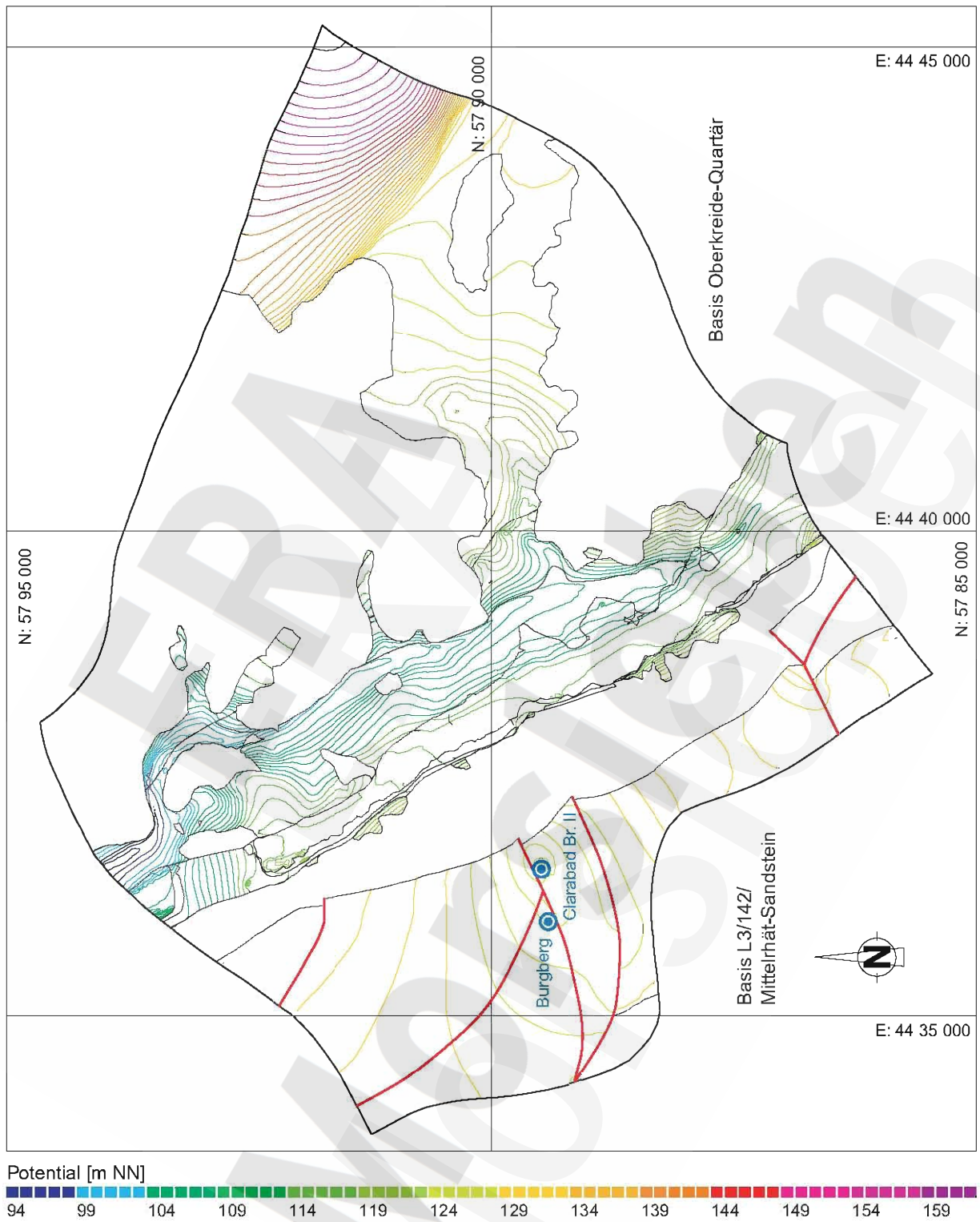
4305/033/R42.d\_313c\_142\_q\_kro\_pot.eps/shu/26.04.01

Abbildung 54 Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L3/142/ Mittelrhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte)



4305/033/r42d\_313c\_144-145\_363\_pot.eps/shu/14.05.01

Abbildung 55 Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte)



4305/03/R42.d\_313c\_142\_q-kro\_pot.eps/shu/26.04.01

Abbildung 56 Rechenfall R43. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L8/150-151-152/Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte)



Abbildung 57 Rechenfall R43. Darcyfluß entlang der Schnitte 1, 2, 3 und 5 quer zum Allertal und der Schnitte 9 und 10 parallel des Allertals





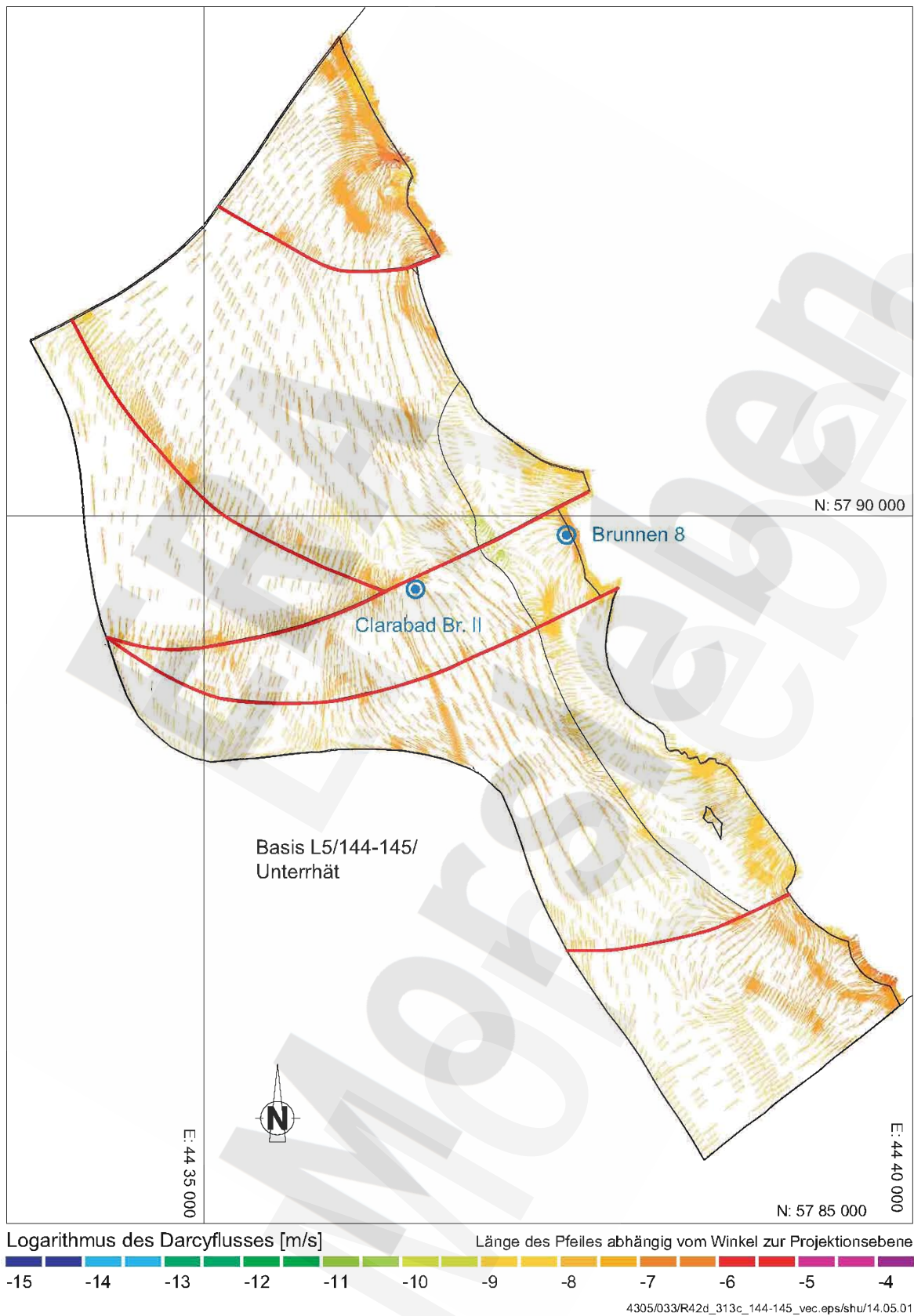
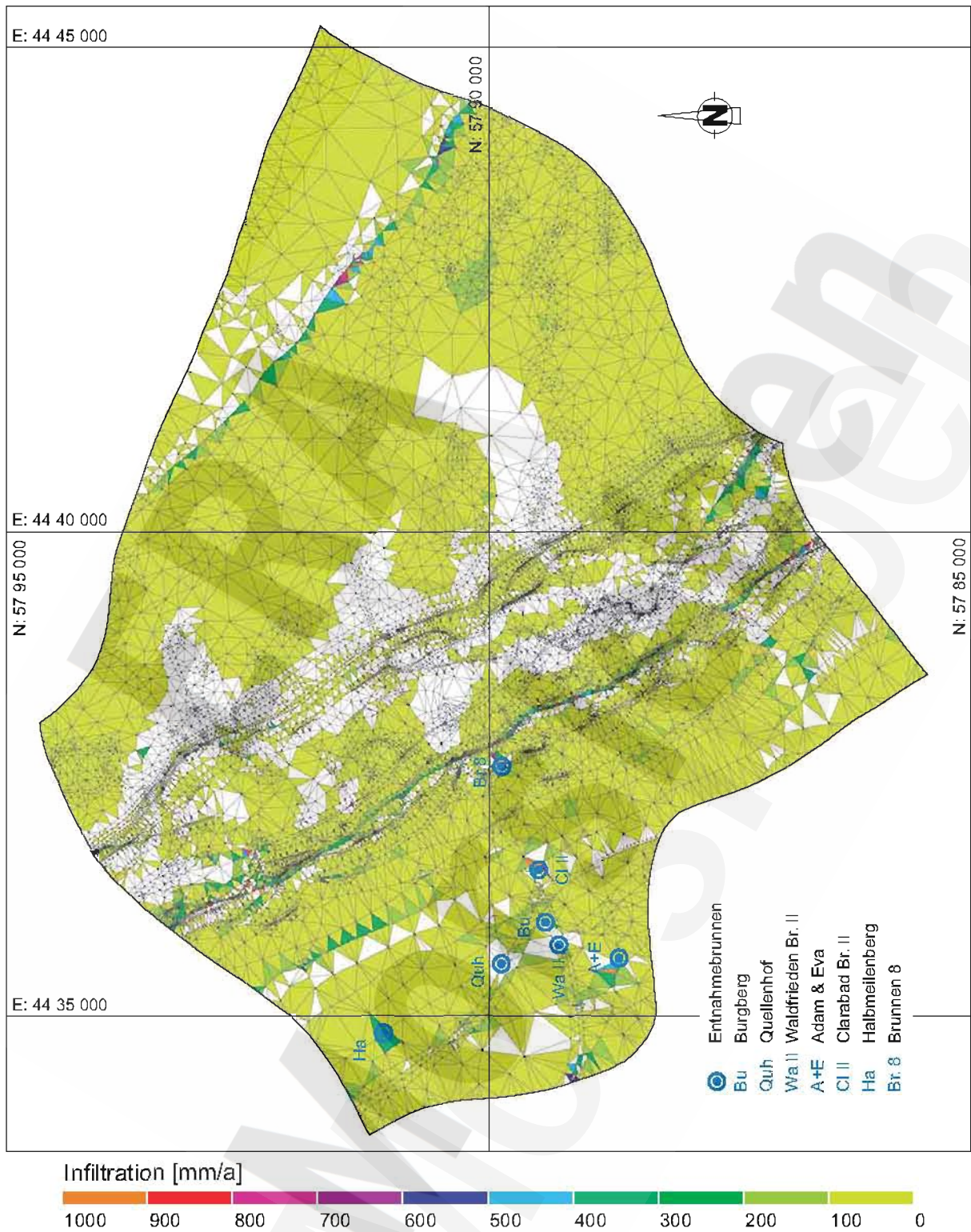
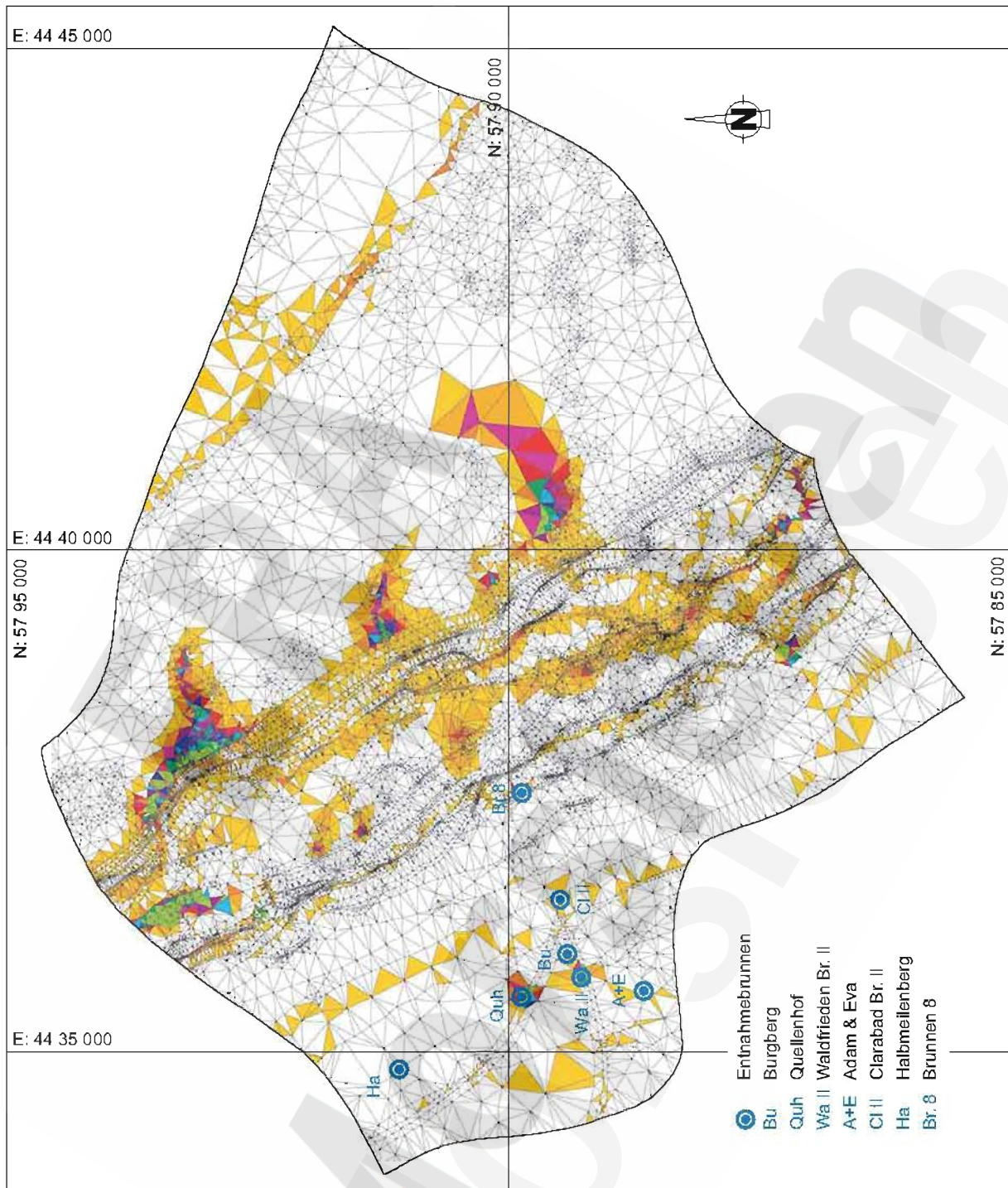


Abbildung 59 Rechenfall R43. Darcyfluß entlang der Basis der Einheit L5/144-145/Unterrhät (Lappwald)



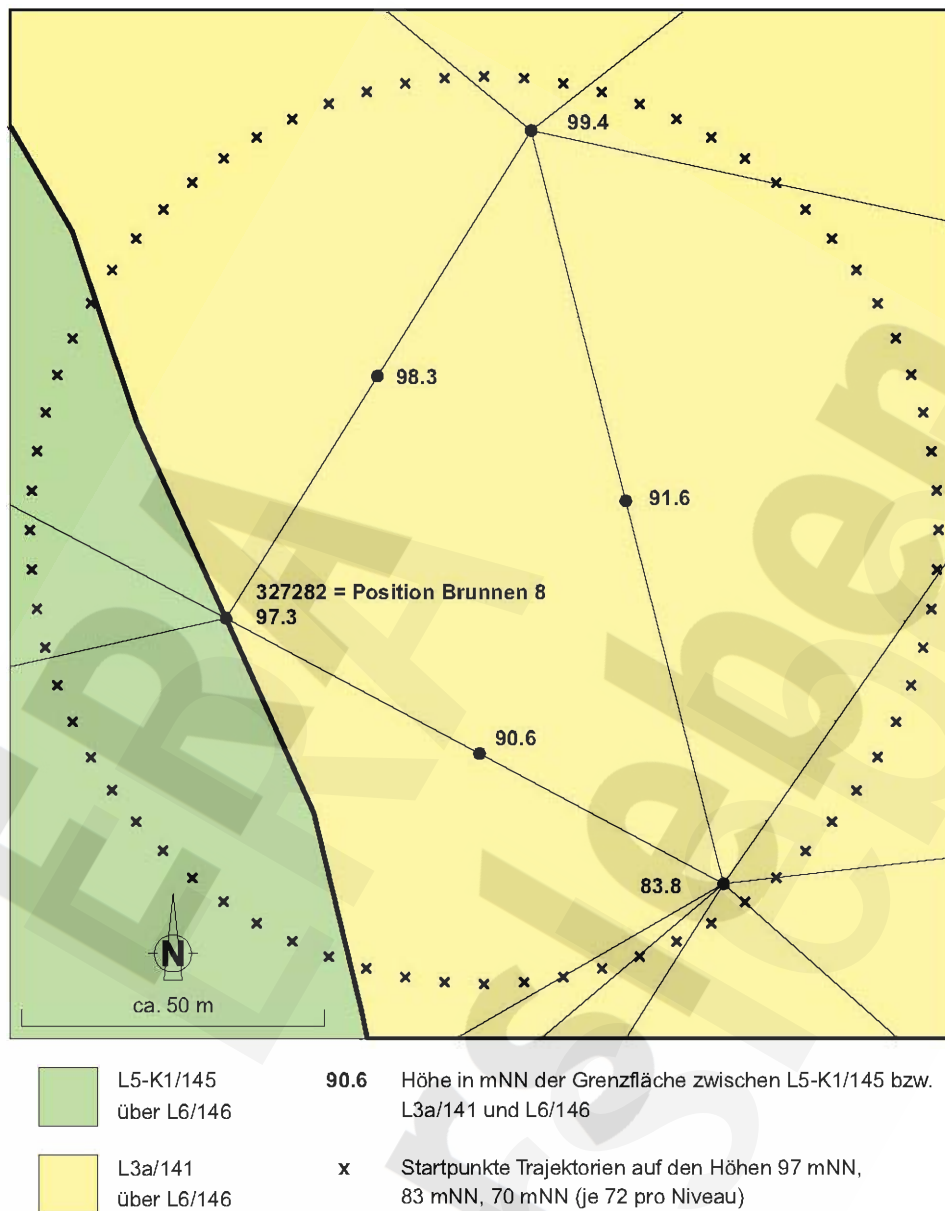
4305/03/R42d\_318c\_mf eps/shu/23 04 01

Abbildung 60 Rechenfall R43. Infiltrationen



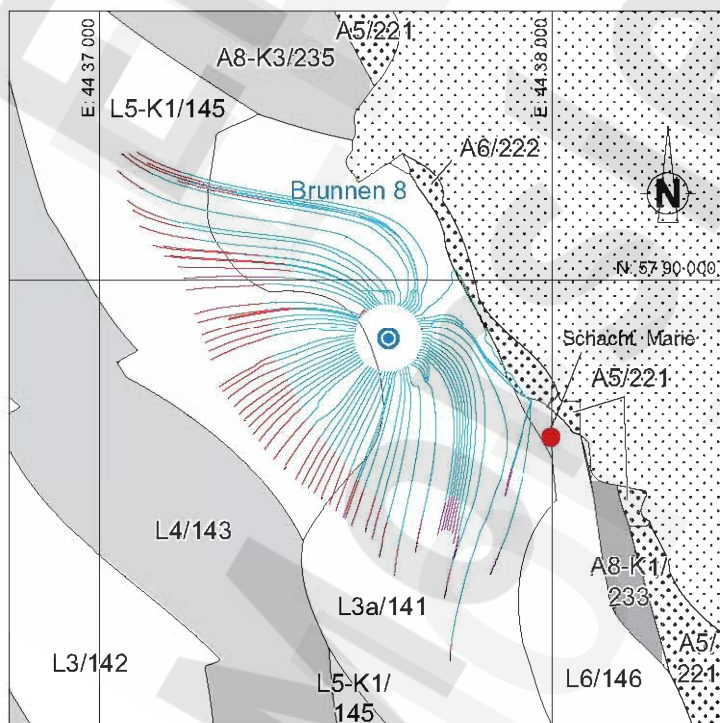
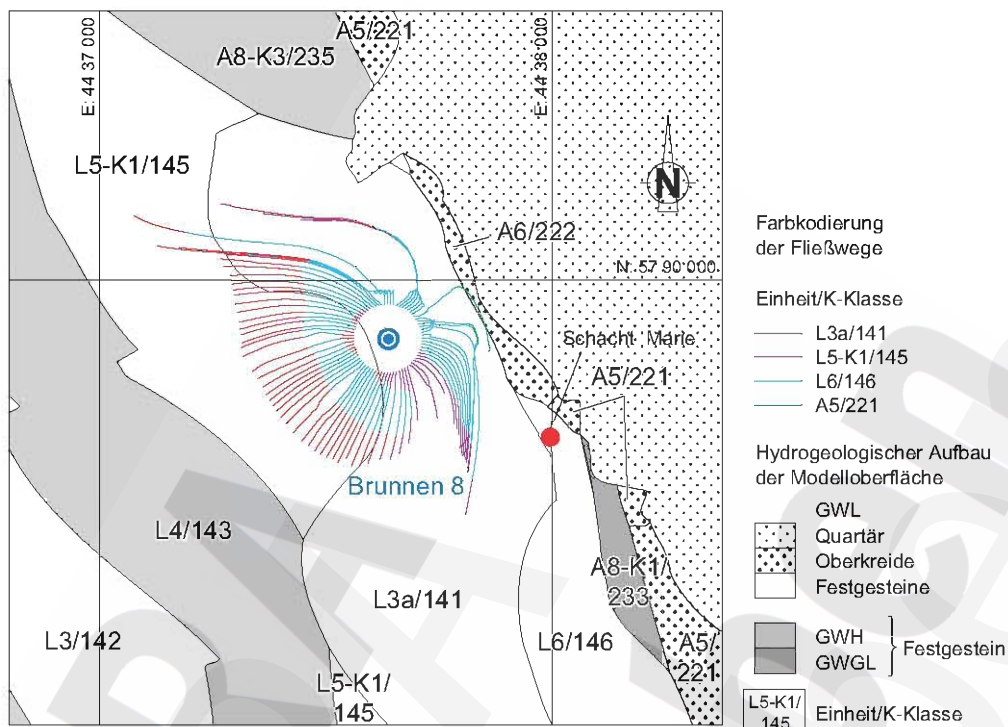
4305/033/R42d\_313c\_exf\_eps/shu/23\_04\_01

Abbildung 61 Rechenfall R43. Exfiltrationen



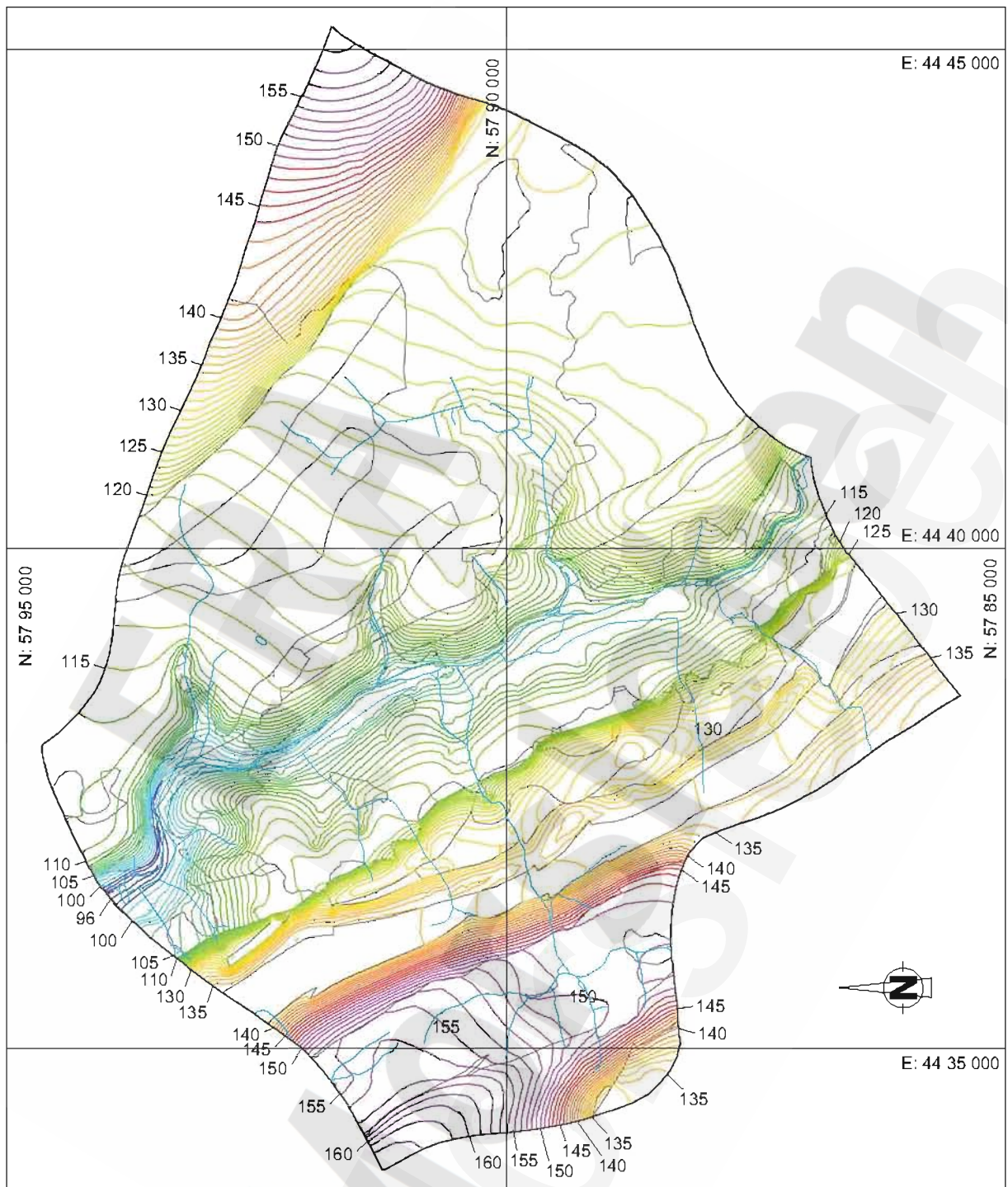
4305/031/brunnen\_8\_startpte.eps/shu/20.04.01

Abbildung 62 Rechenfall R43, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten im Absenktrichter von Brunnen 8. Verteilung der Startpunkte



4305/033/path\_1\_3\_eps/shu/14.05.01

Abbildung 63 Rechenfall R43, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten im Absenkrichter von Brunnen 8. Aufsicht auf die Fließwege mit Startpunkten auf 97 mNN (oben) und 70 mNN (unten)



4305/33/R44c\_piezo eps/sht/10 07 01

Abbildung 64 Rechenfall R44. Berechnete Grundwasseroberfläche

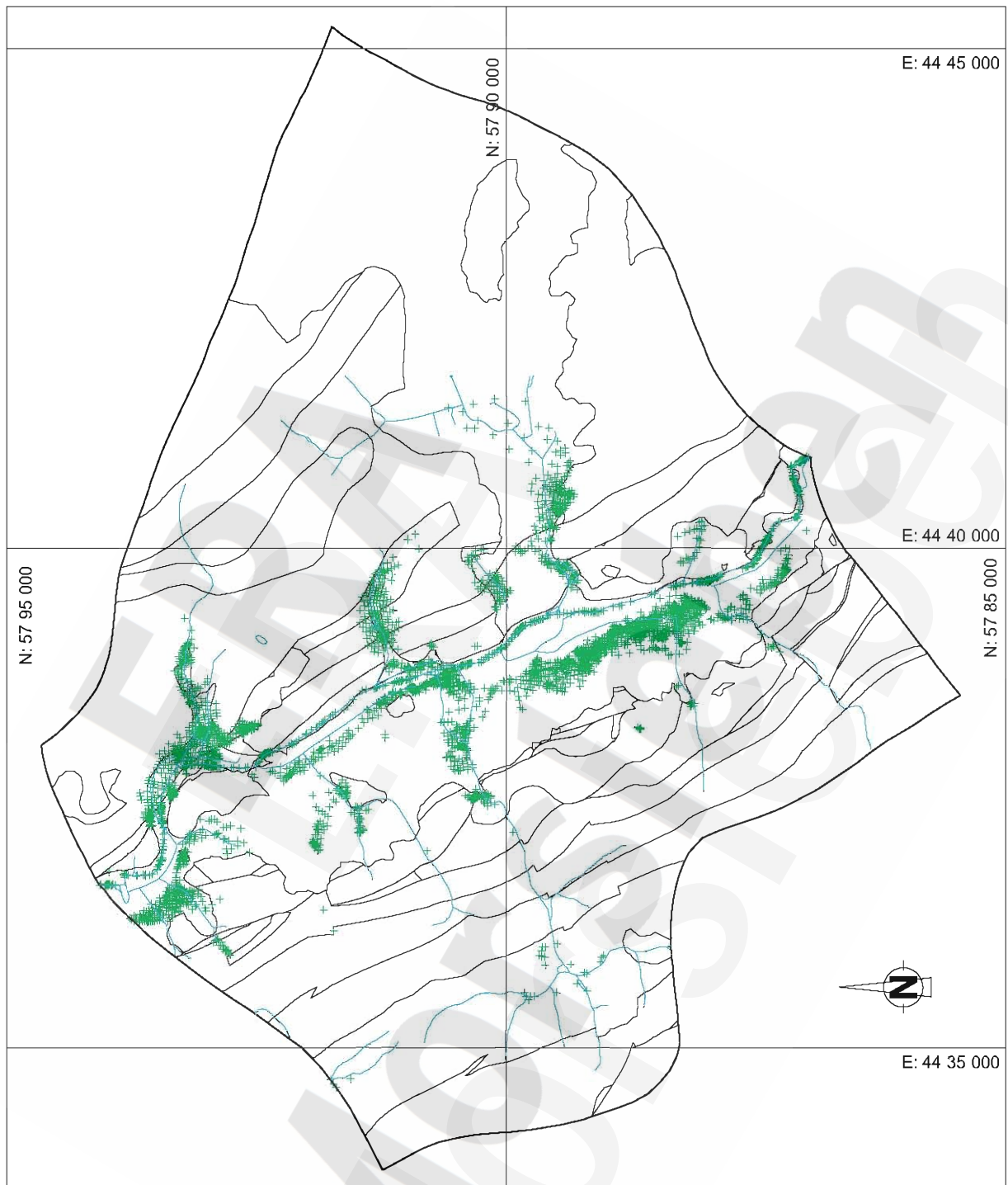


Abbildung 65 Rechenfall R44. Verteilung der Exfiltrationsknoten (grüne Kreuze)



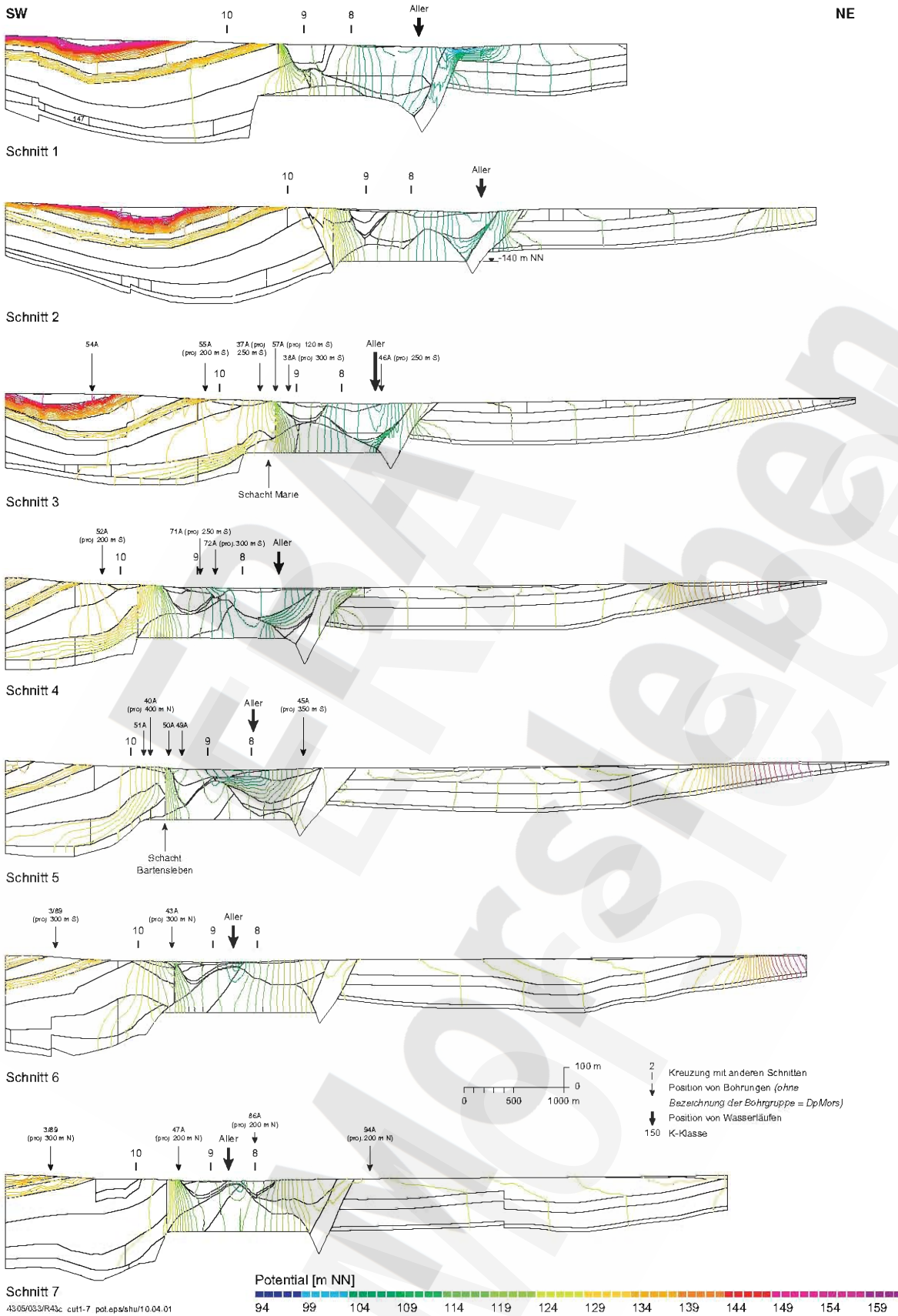


Abbildung 66 Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Schnitte 1 bis 7 quer zum Allertal

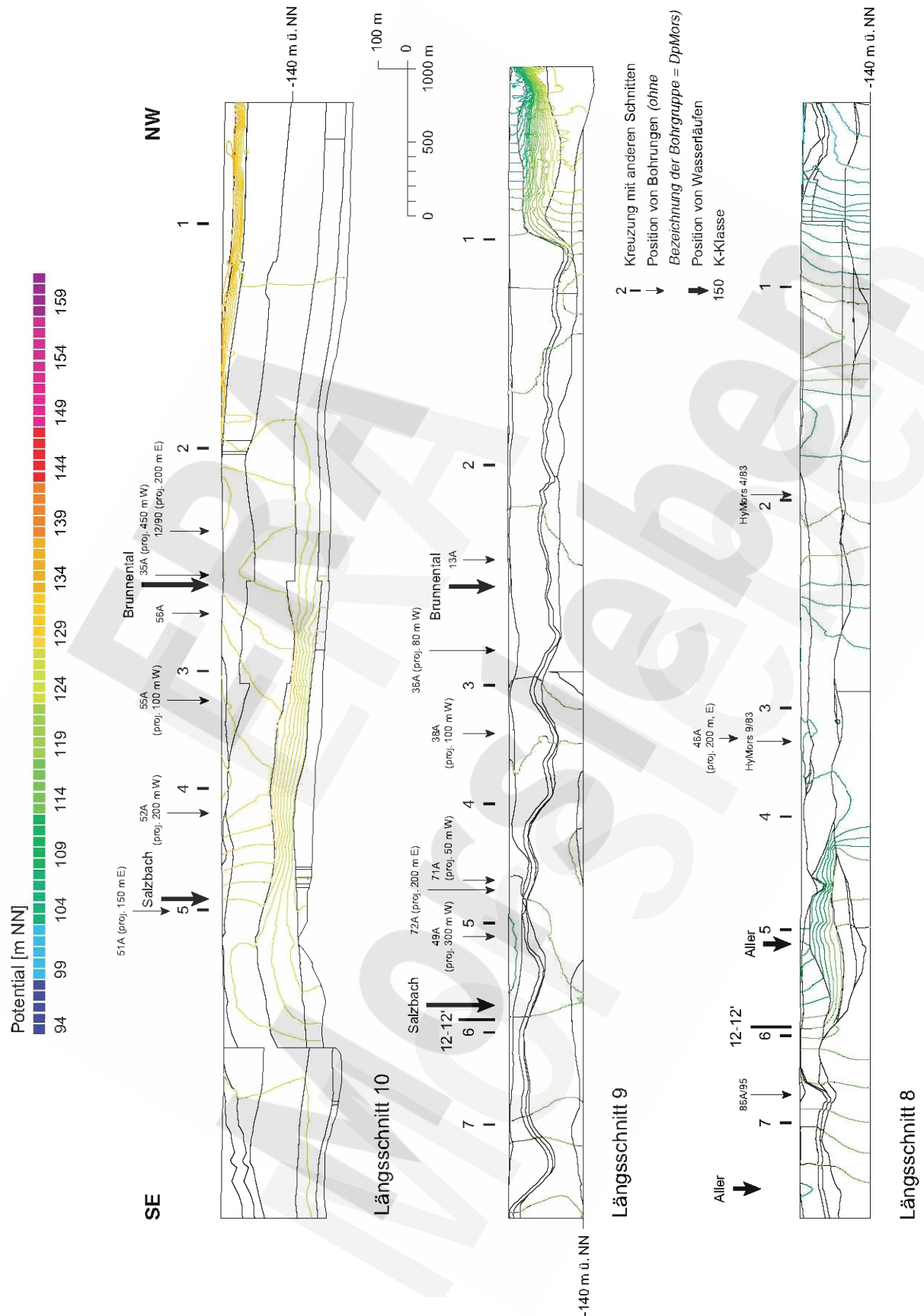
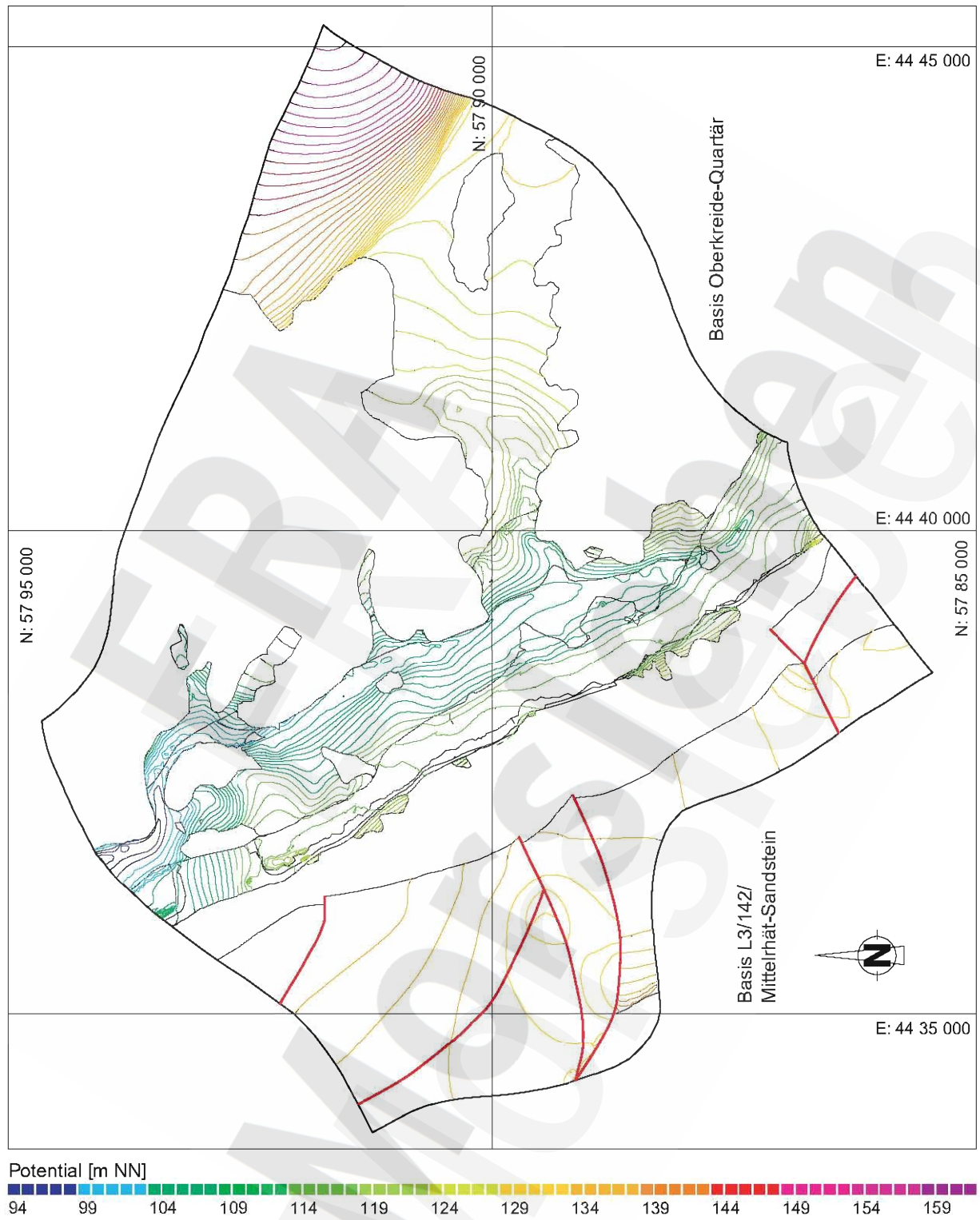
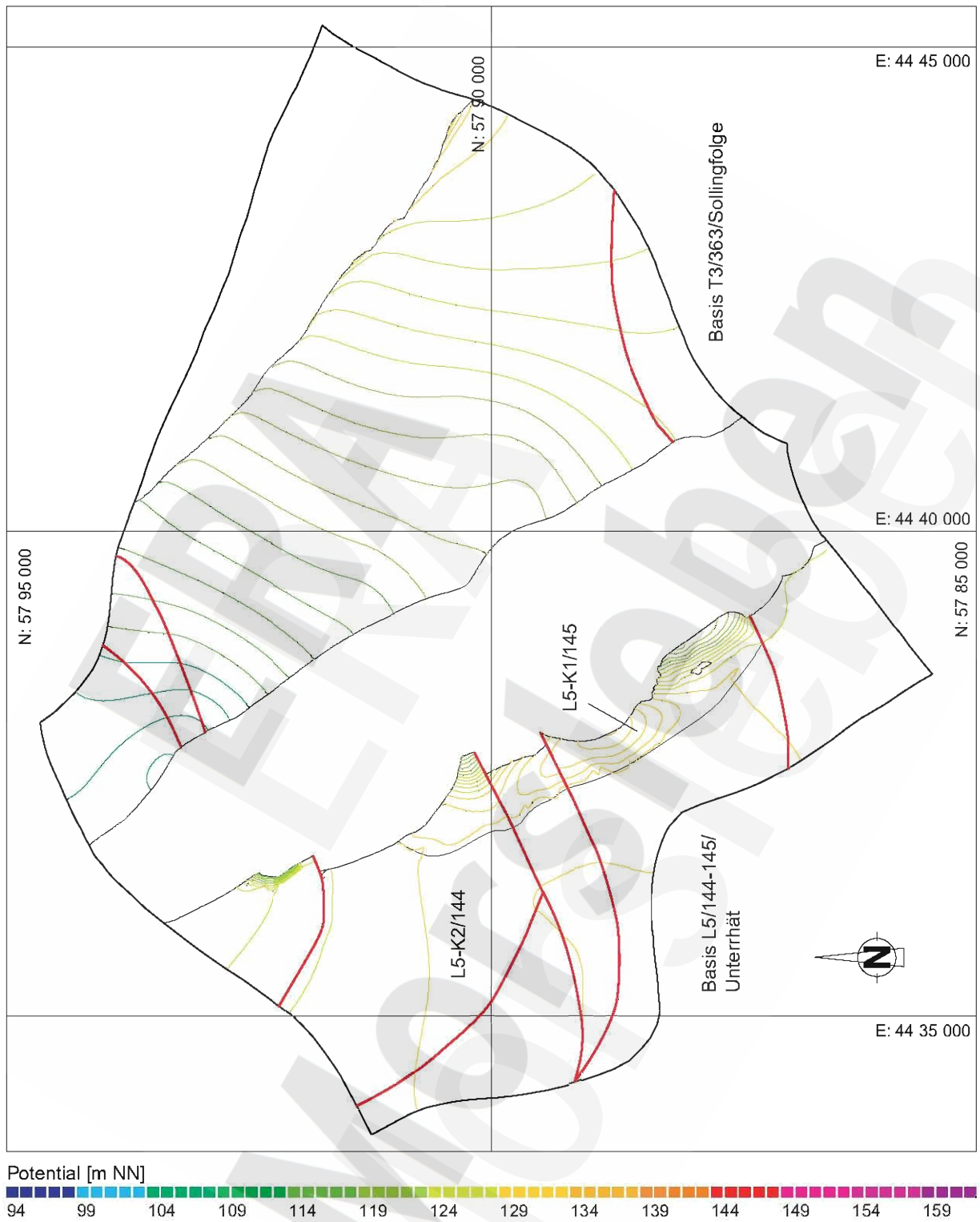


Abbildung 67 Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Schnitte 8 bis 10 parallel des Allertals



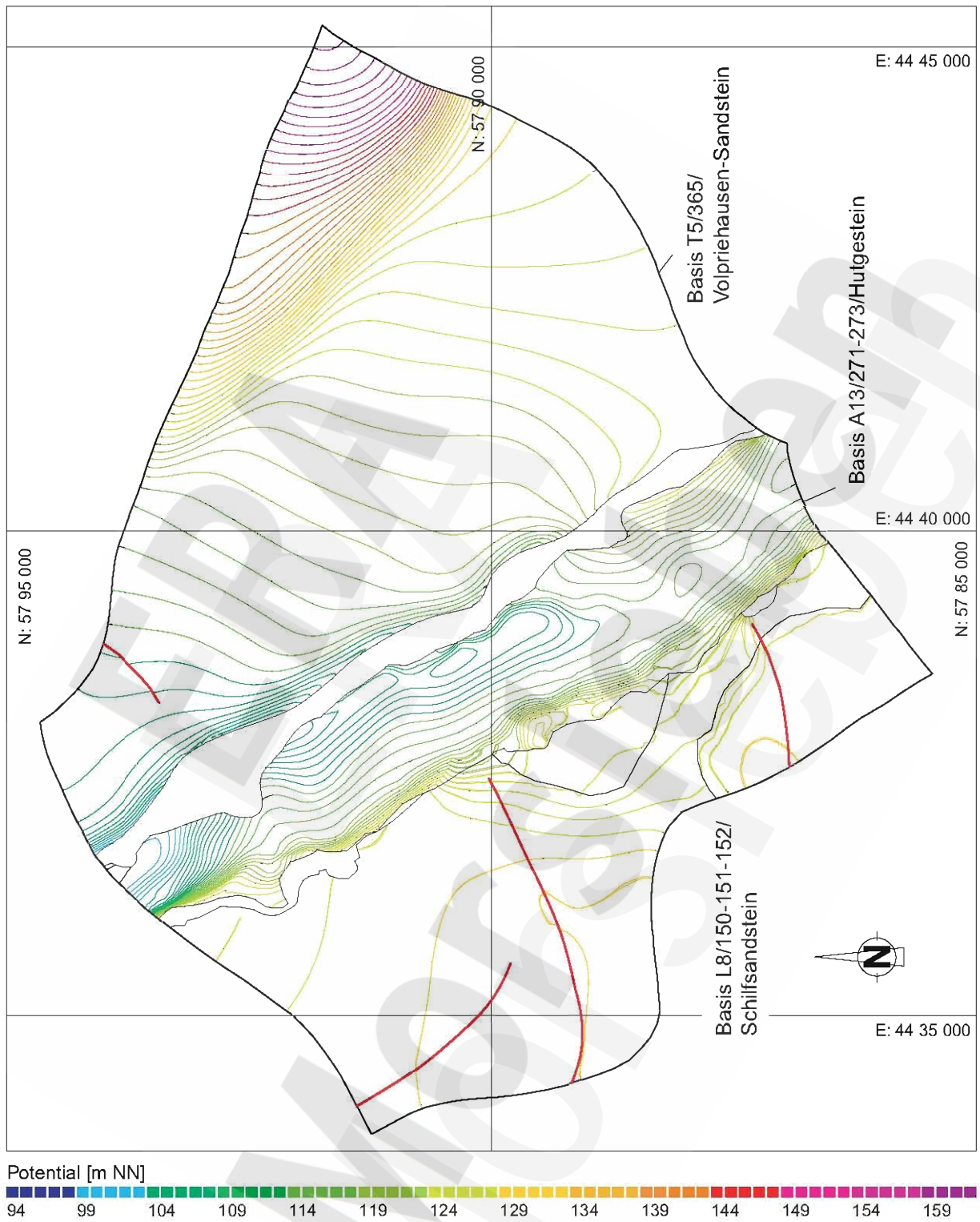
4305/033/R43c\_142\_q\_kro\_pot.eps/shu/09.05.01

Abbildung 68 Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L3/142/ Mittelrhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte)



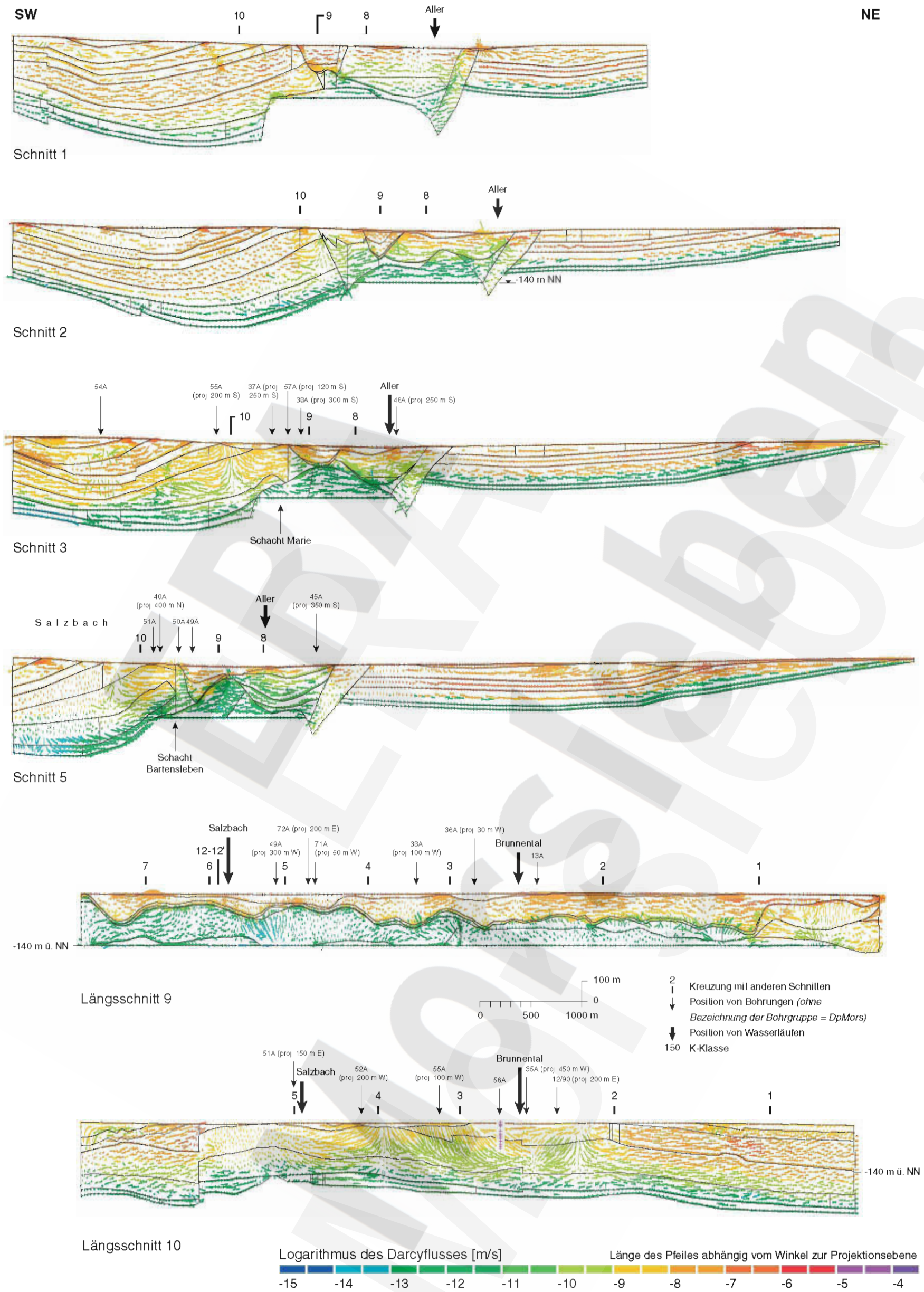
4305/033/R43c\_144-145\_363\_pot.eps/shu/14.05.01

Abbildung 69 Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte)



4305/033/R43c\_kmS\_hut\_volprie\_pot.eps/shu/09.05.01

Abbildung 70 Rechenfall R44. Potentialverteilung entlang der Basis der Einheiten L8/150-151-152/Schilfsandstein (Lappwald), A13/271-272-273/Hutgestein (Allertal) sowie T5/365/Volpriehausen-Sandstein (Triasplatte)



4305/033/R43c\_cul1-2-3-5-9-10\_veo eps/shu/10 07 01

Abbildung 71 Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Schnitte 1, 2, 3 und 5 quer zum Allertal und der Schnitte 9 und 10 parallel des Allertals

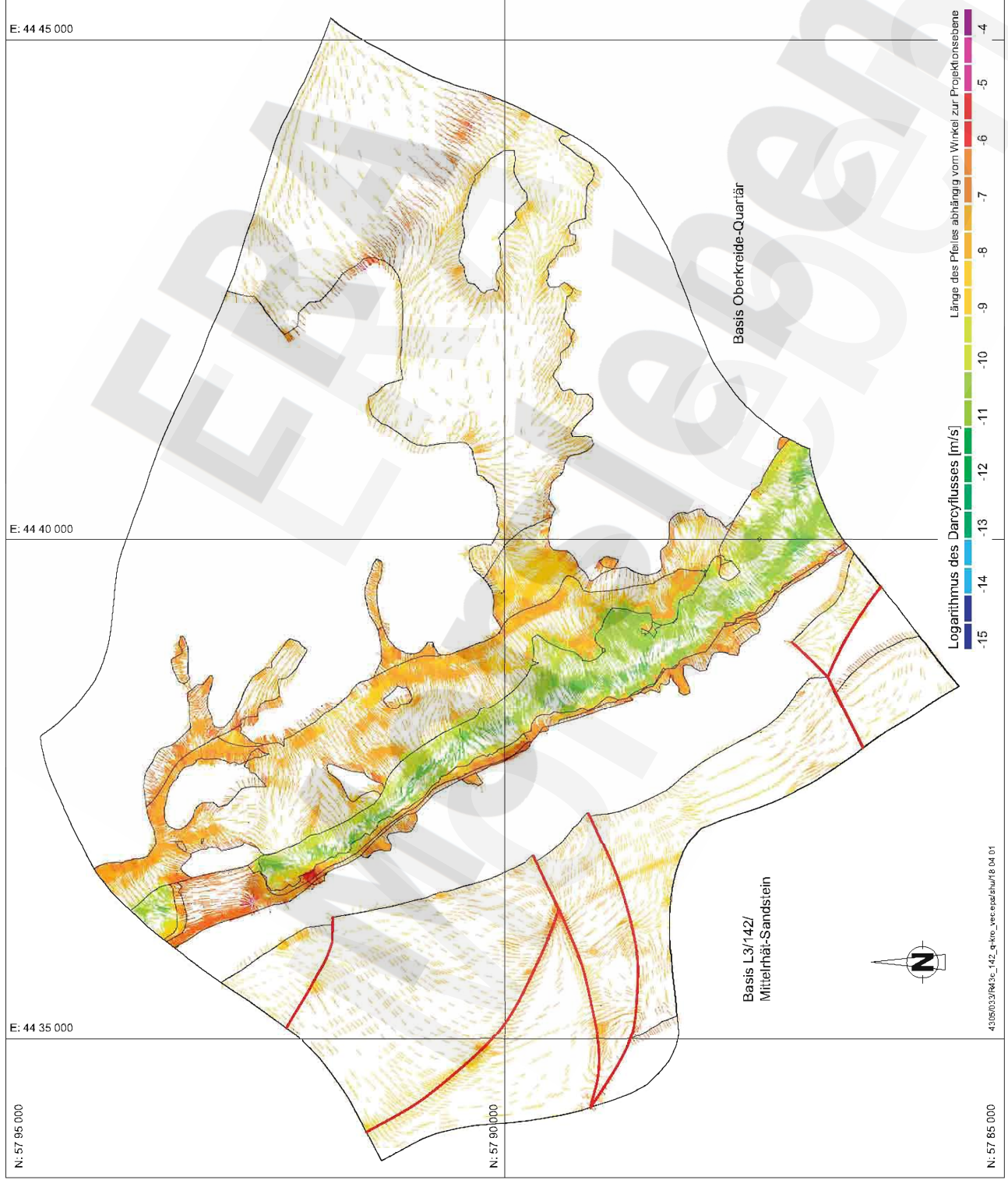


Abbildung 72

Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Basis der Einheiten L3/142/Mittelhät-Sandstein (Lappwald) und Oberkreide-Quartär (Allertal-Triasplatte)

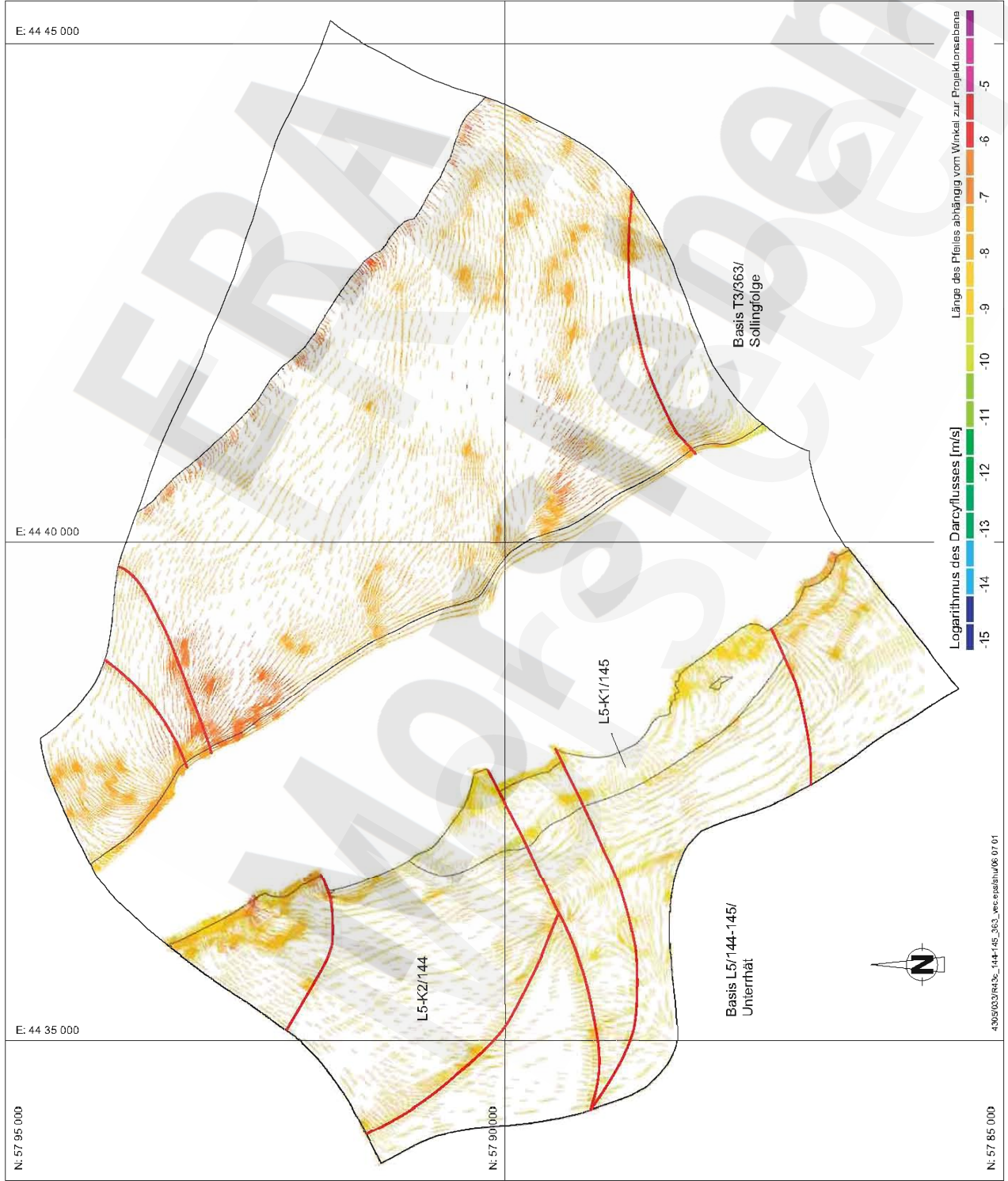
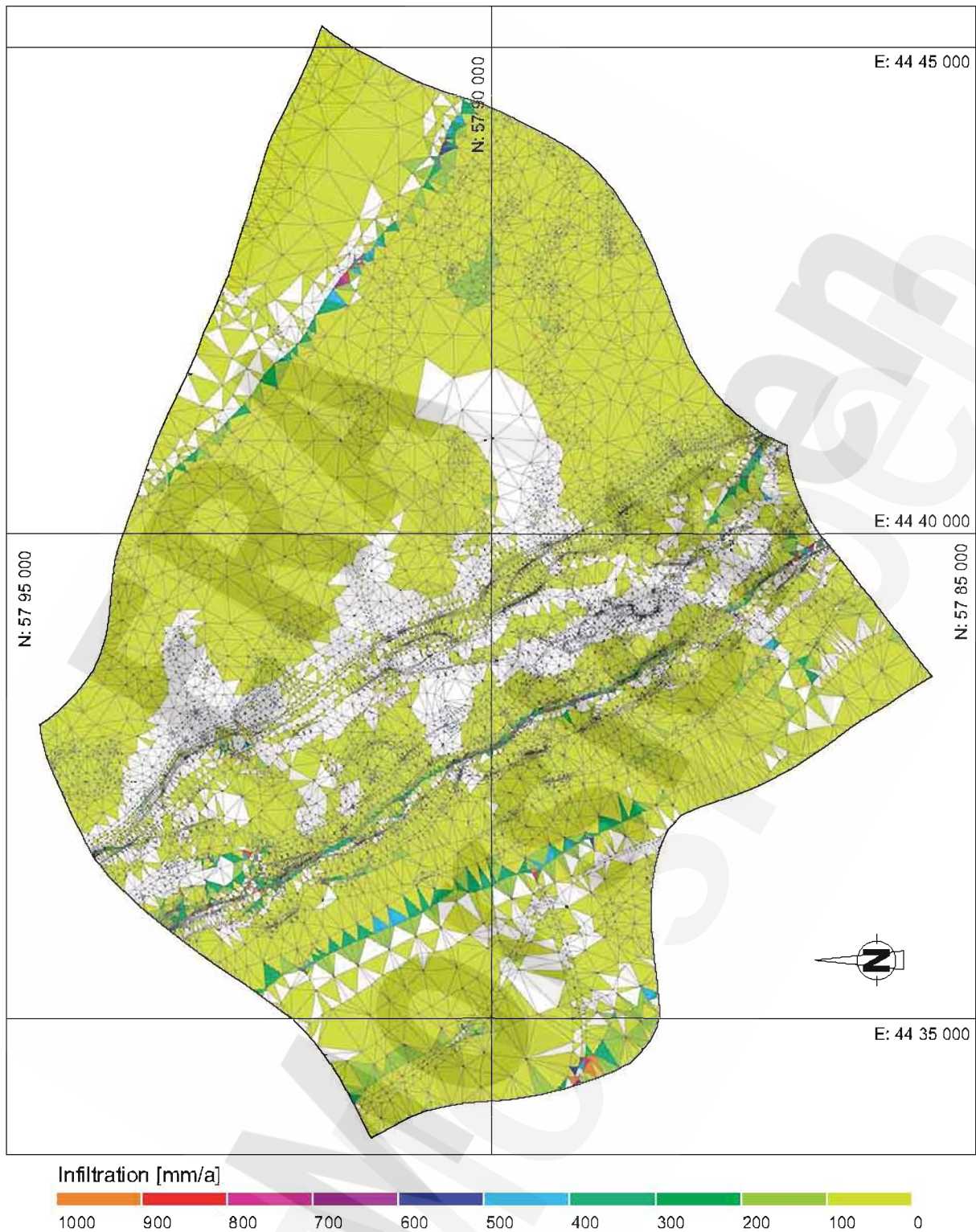


Abbildung 73

Rechenfall R44. Darcyfluß entlang der Basis der Einheiten L5/144-145/Unterrhät (Lappwald) und T3/363/Sollingfolge (Triasplatte)







4305/033/R44c\_mf eps/shu/17 04 01

Abbildung 75 Rechenfall R44. Infiltrationen

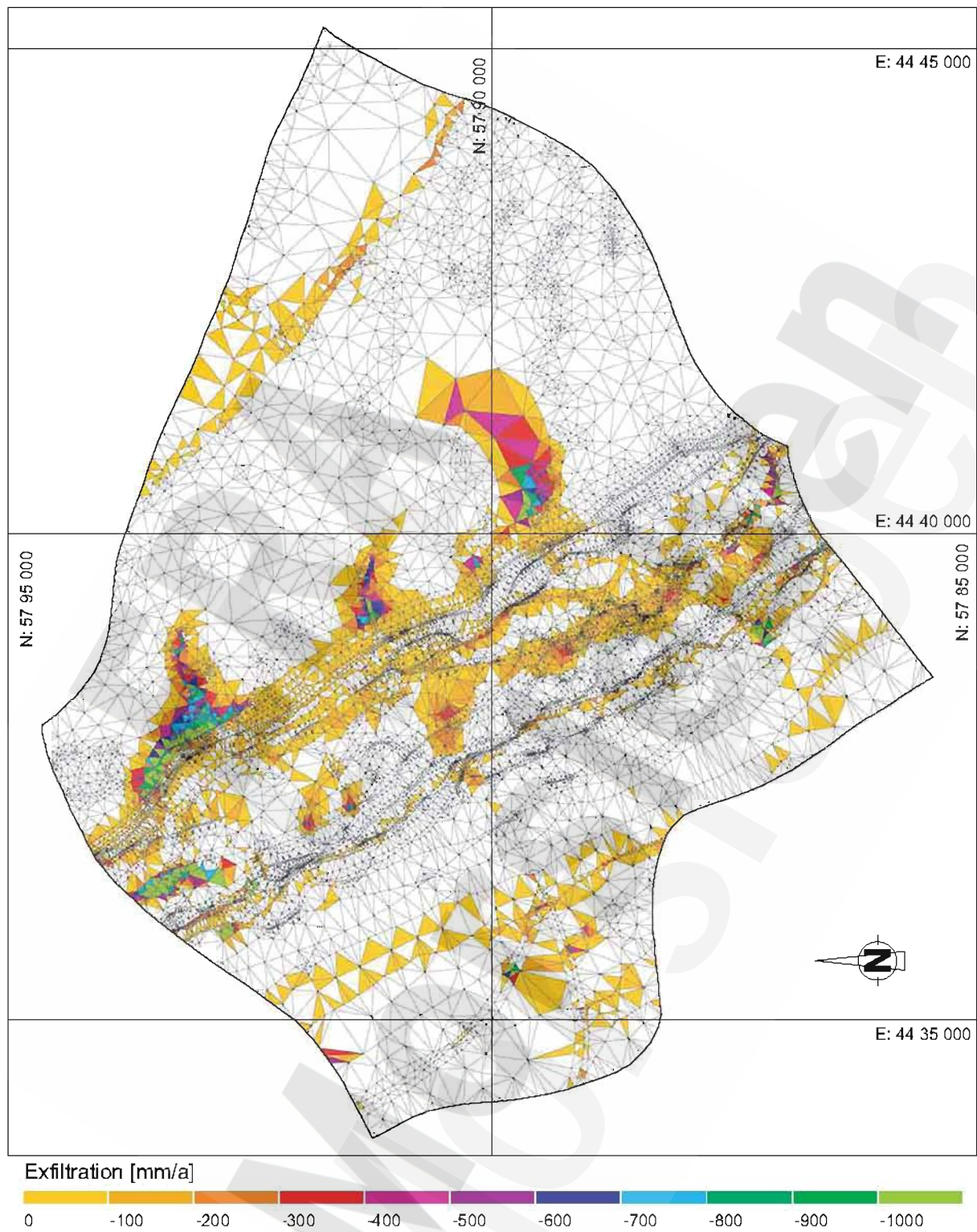
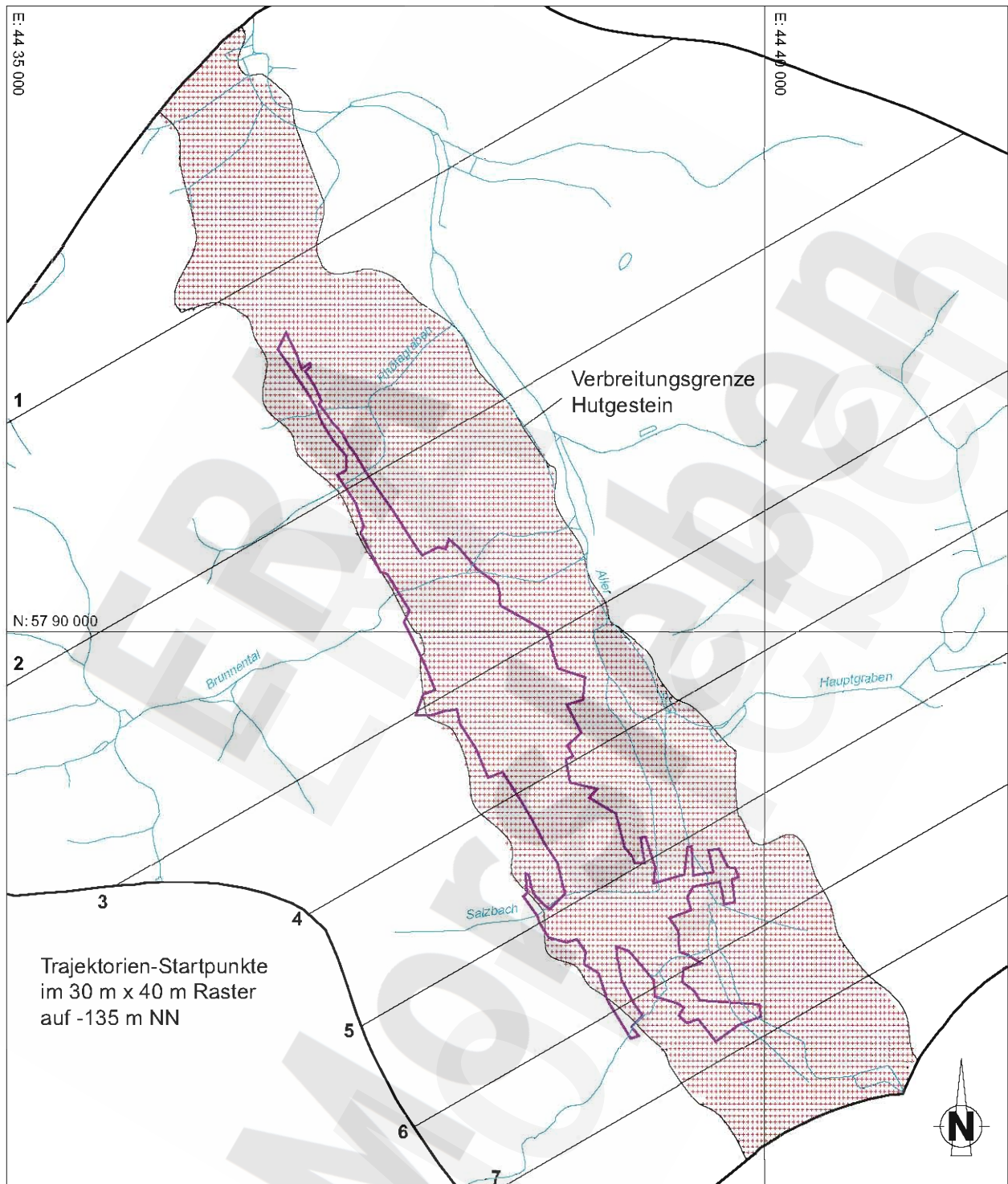


Abbildung 76 Rechenfall R44. Exfiltrationen

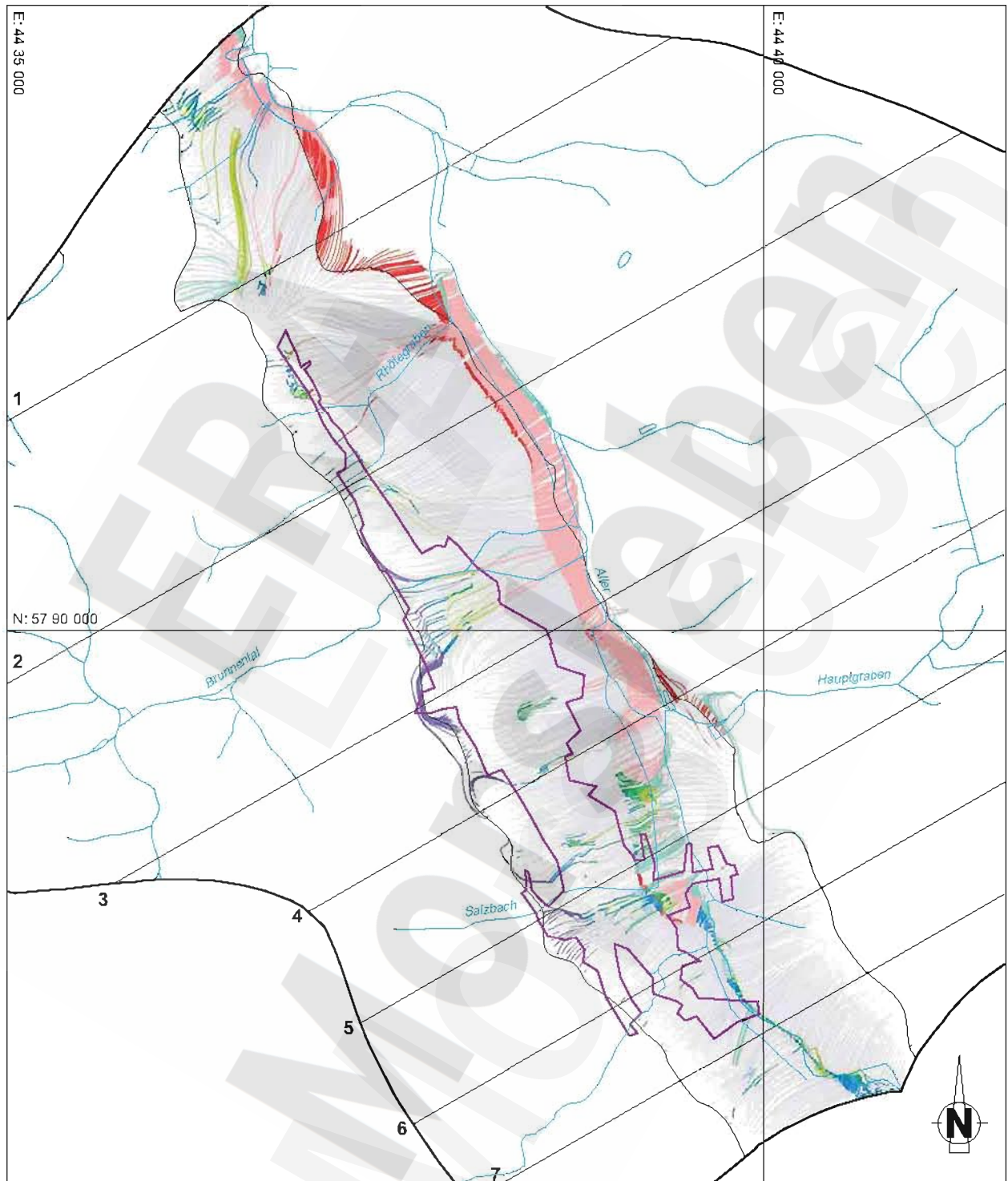


4305/startpunkte30-40.eps/shu/19.04.01

Abbildung 77 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Verteilung der Startpunkte

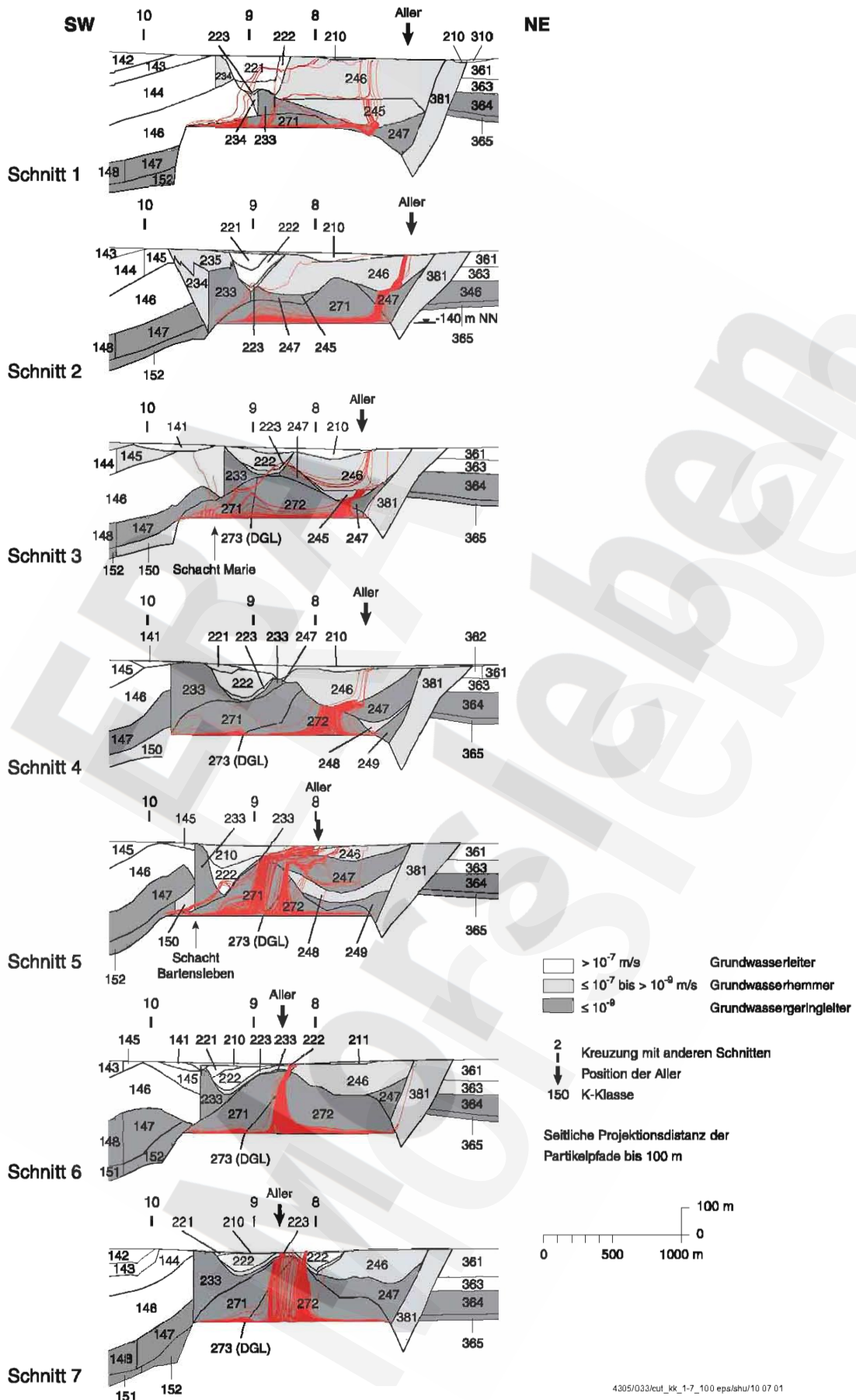
Einheiten/K-Klassen

L8/150, 152 Schilfsandstein	A1-A4/210, t/211 Quartär, Tertiär	A5/221, A6/222 Obere Kreide	A7/233	A8/233, 234, 235 Jura	A9/245, 246	A10/247, A11/248, A12/249	A13-K1/271, 272 Hutgestein
--------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	--------	--------------------------	-------------	---------------------------	-------------------------------



4305/r44 hut 2 aa eps/shu/10 07 01

Abbildung 78 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Horizontalprojektion der Partikelpfade mit Einfärbung der Pfade entsprechend der durchwanderten hydrostratigraphischen Einheit



4305/033/cut\_kk\_1-7\_100 eps/ahw/10 07 01

Abbildung 79 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Vertikalprojektion der Partikelpfade in die Schnitte 1 bis 7

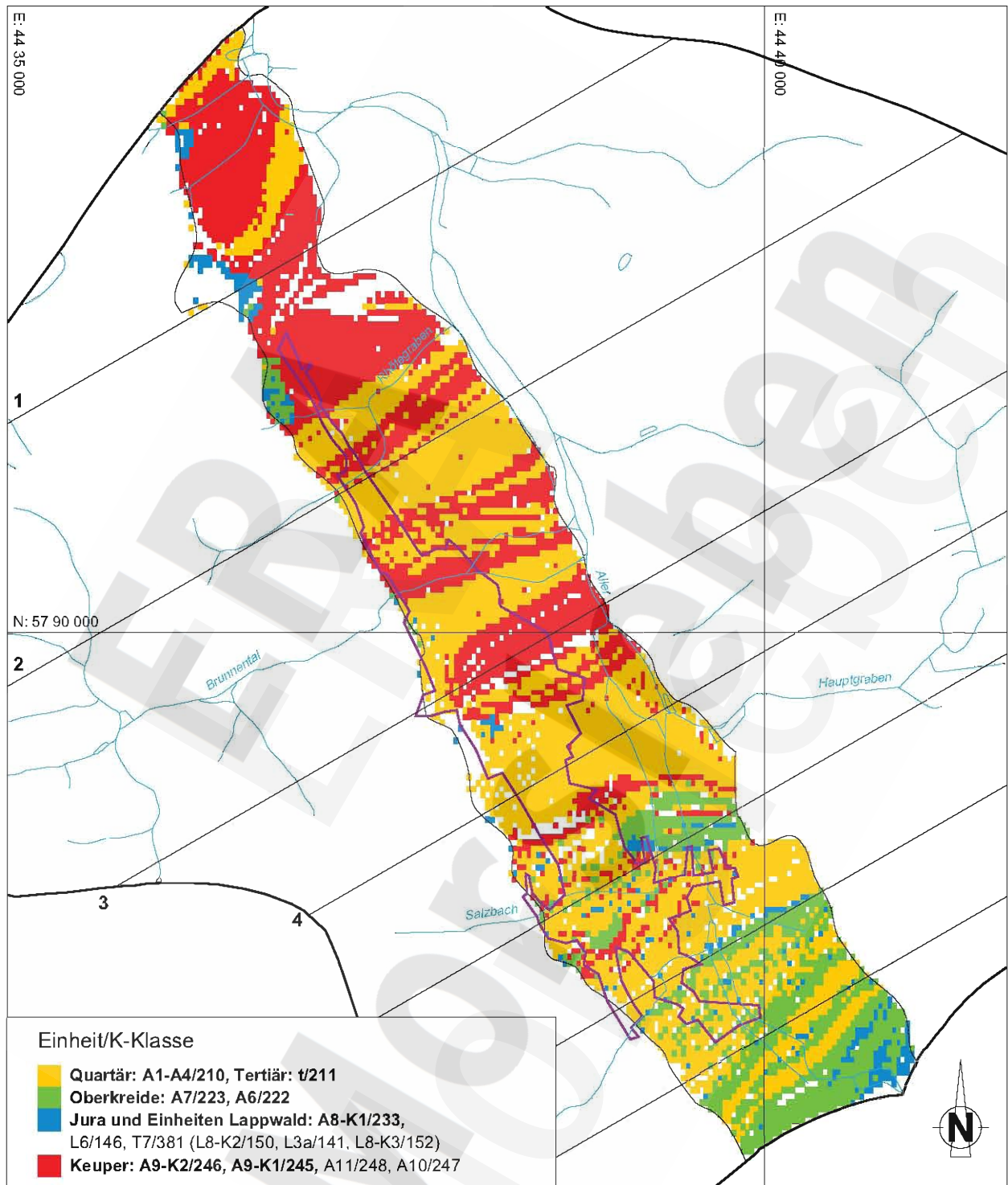
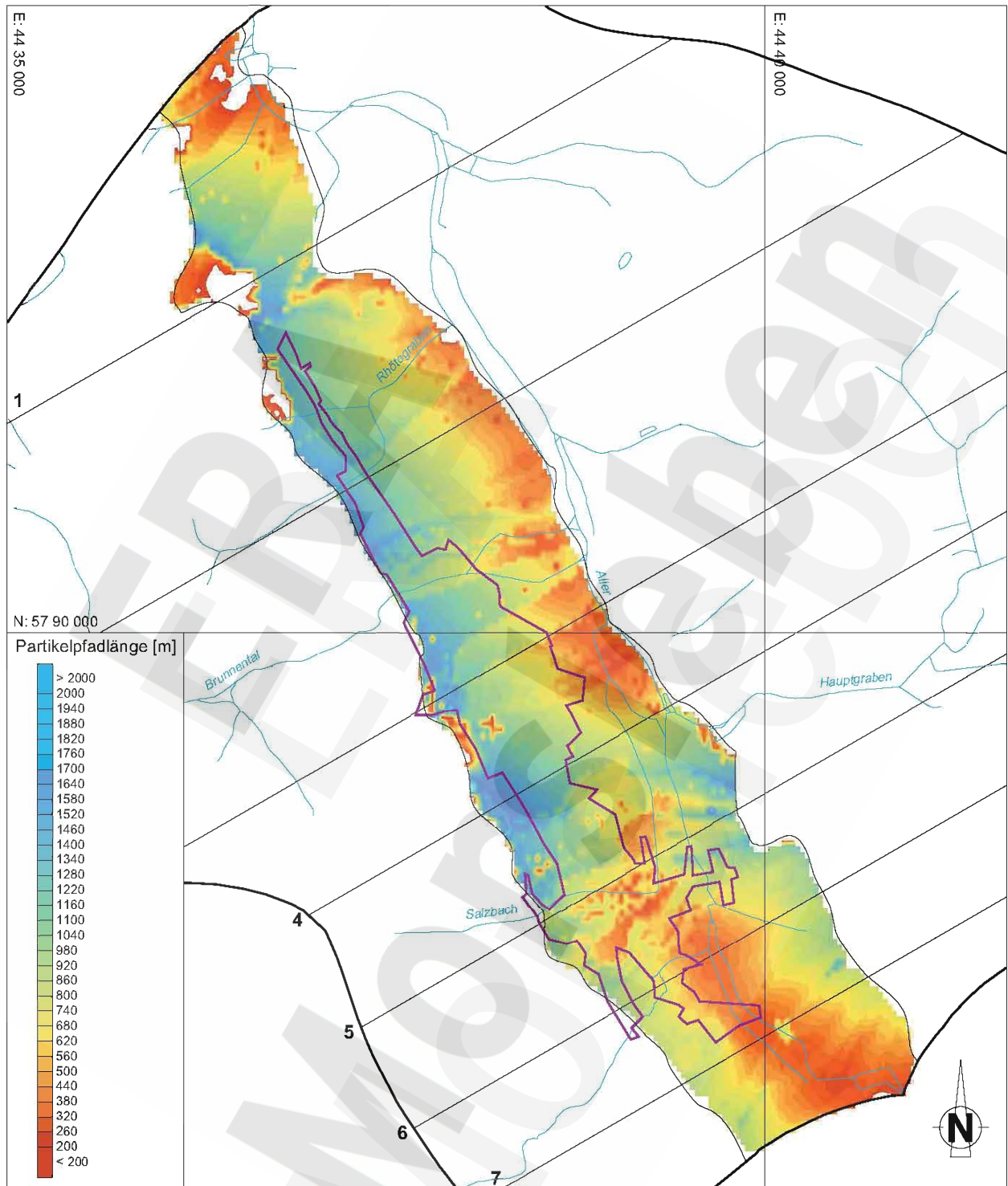


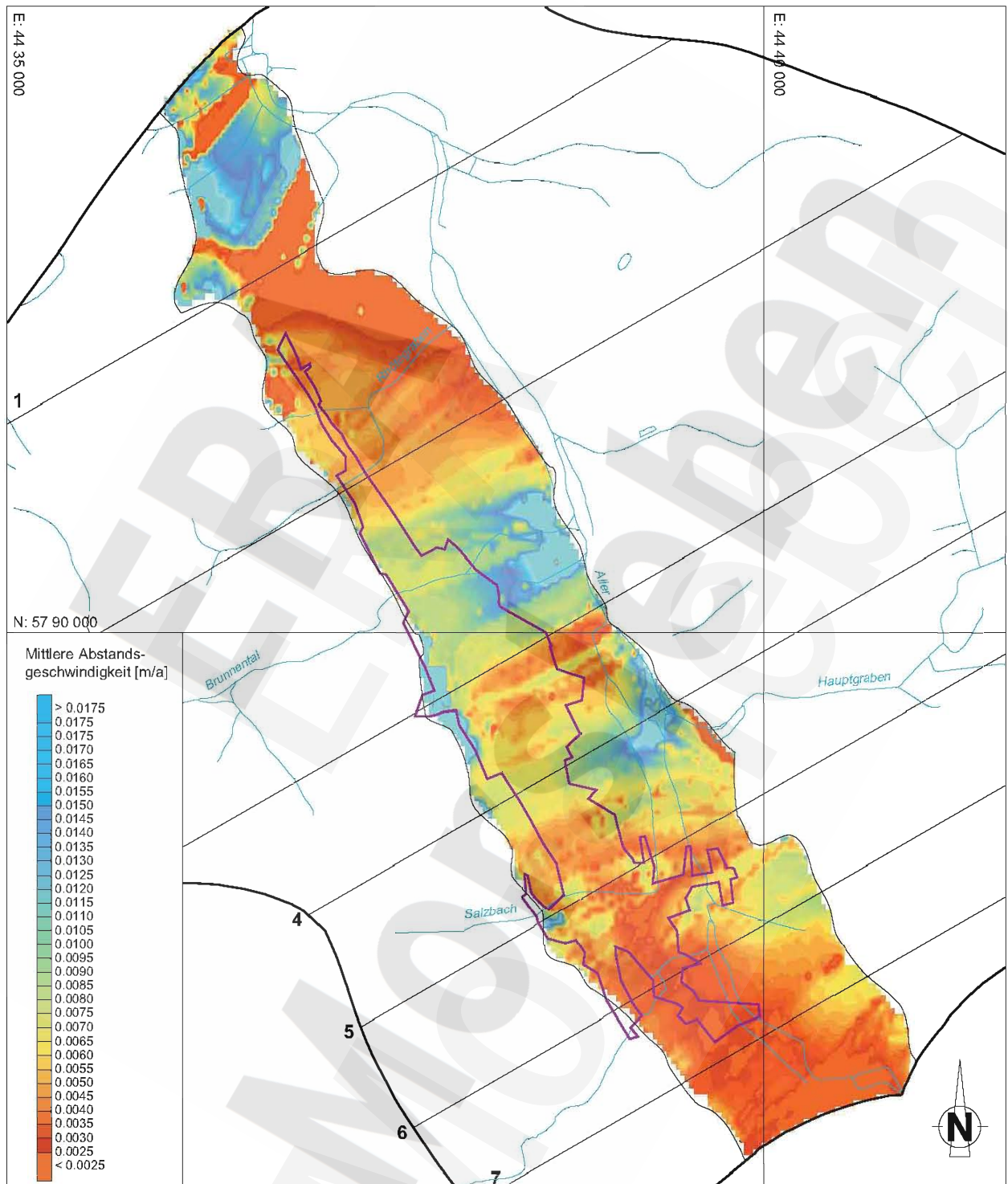
Abbildung 80 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Darstellung der hydrostratigraphischen Einheit am Partikelpfad am Startpunkt des Partikelpfades



4305/r44\_länge.eps/shu/10.07.01

Abbildung 81 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Länge der Partikelpfade zwischen Startpunkt und Modelloberfläche





4305/r44\_geschwindigkeit.eps/shu/10.07.01

Abbildung 82 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Durchschnittliche Abstandsgeschwindigkeit der Partikelpfade zwischen Startpunkt und Modelloberfläche

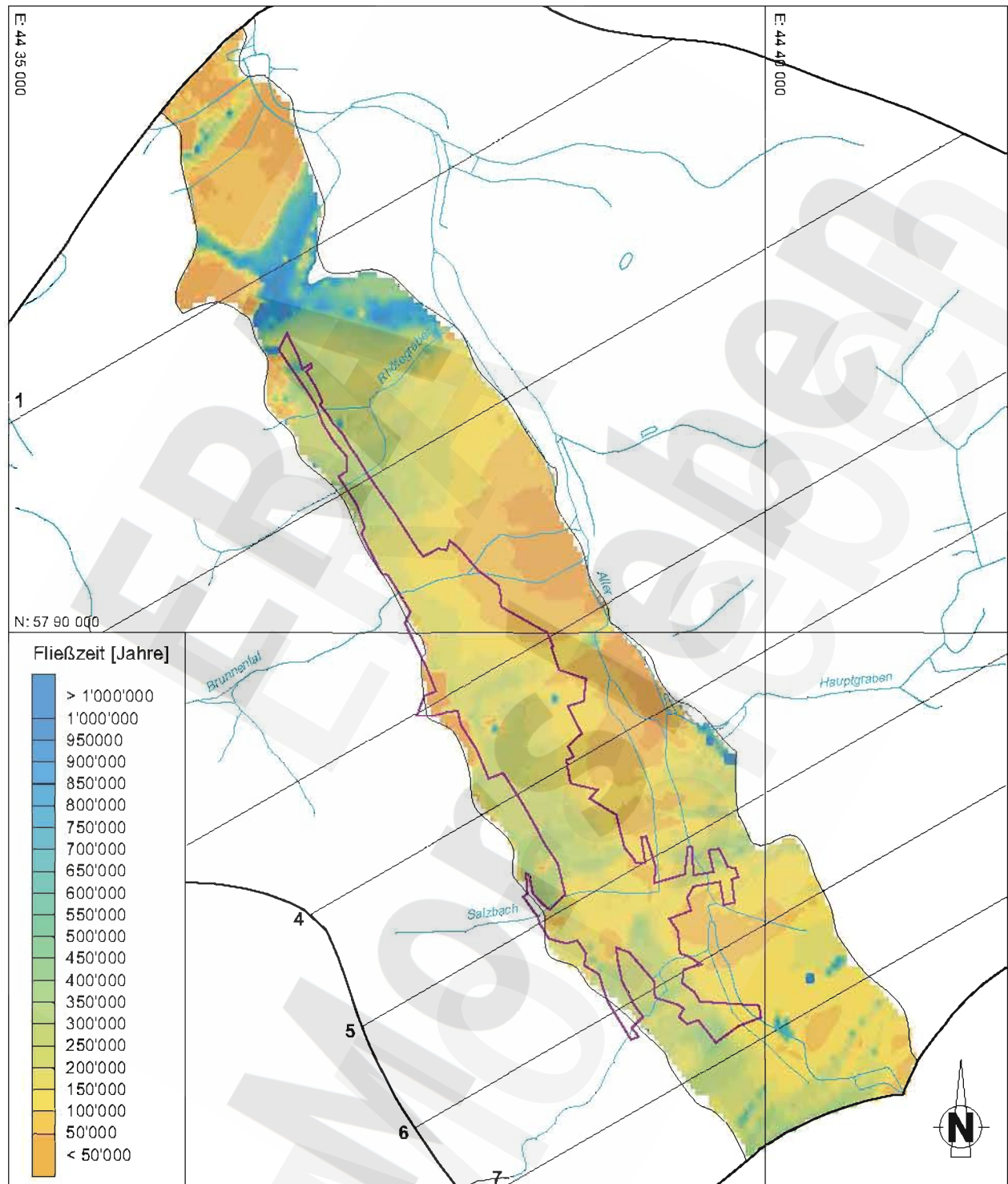


Abbildung 83 Rechenfall R44, Trajektorienrechnungen mit Startpunkten nahe der Basis des Hutgesteins. Fließzeit der Partikelpfade zwischen Startpunkt und Modelloberfläche

## 11 Anhänge

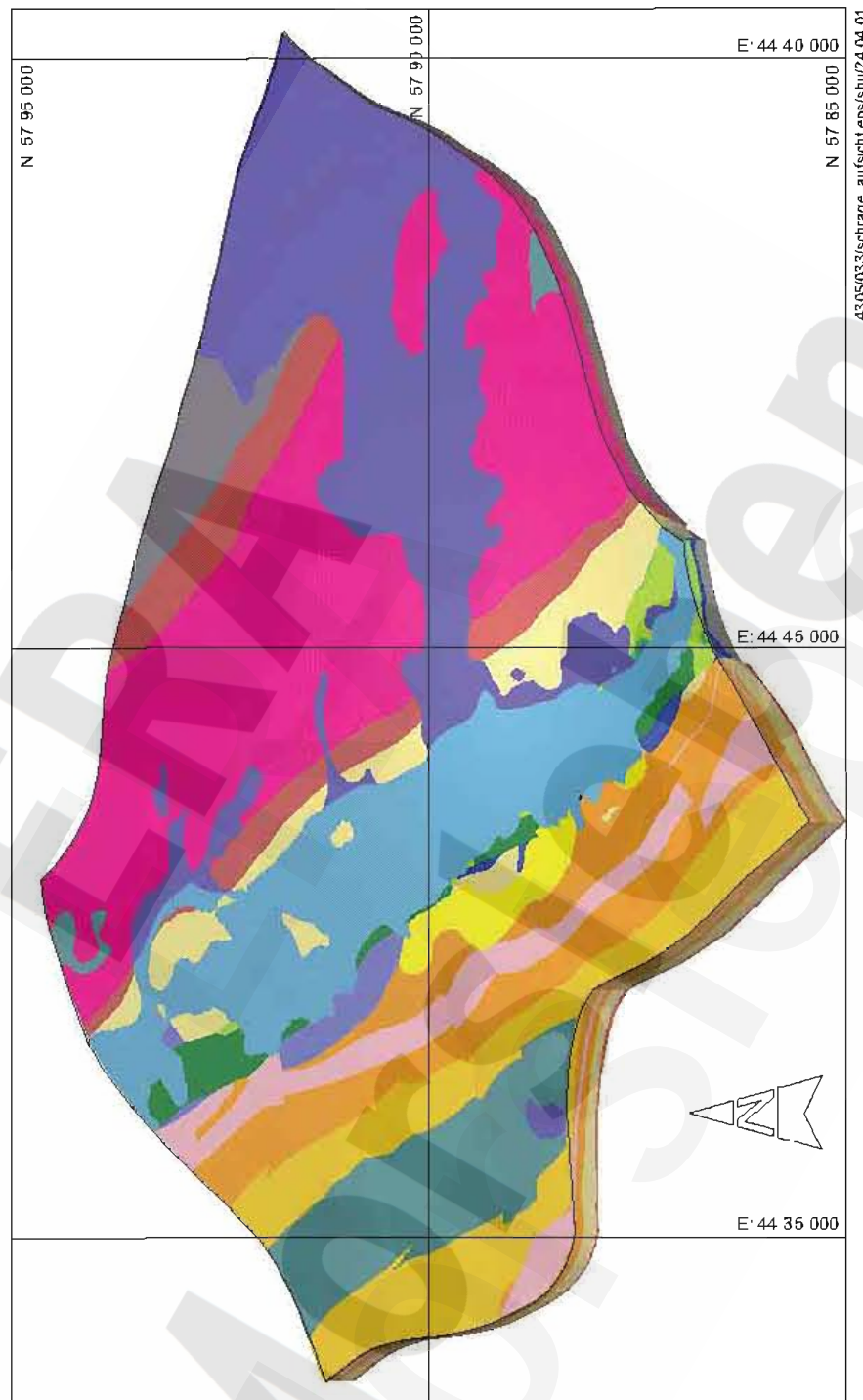
ERA  
ERA  
Morsleben

## Anhang 1

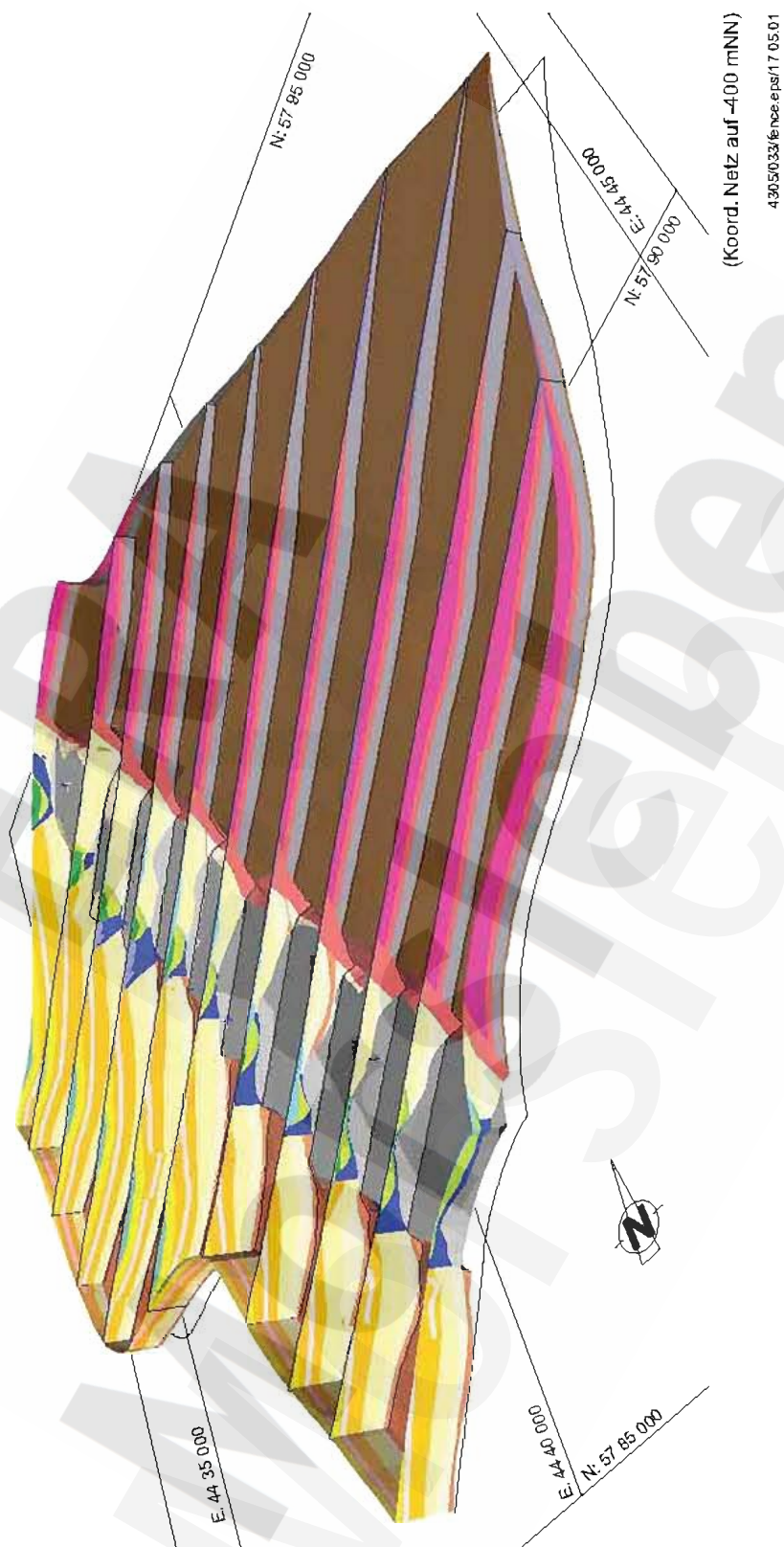
### Dokumentation des 3D Süßwassermodells ERAM

#### Verzeichnis der Abbildungen

Anhang 1-1	3D Süßwassermodell ERAM. Schräge Aufsicht auf das 3D Modell ERAM – alle hydrostratigraphischen Modelleinheiten .....	213
Anhang 1-2	Perspektivische schräge Aufsicht aus SE auf 9 Serienschnitte im 3D-Modell ERAM (Abstand der Gitterlinien 1 km, Streichrichtung der Serienschnitte SW-NE) .....	214
Anhang 1-3	Farblegende zu den Abbildungen des Anhangs 1 .....	215
Anhang 1-4	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0 und T1 abgedeckt .....	216
Anhang 1-5	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1 und A5 abgedeckt .....	217
Anhang 1-6	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5 und A6 abgedeckt .....	218
Anhang 1-7	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6 und A7 abgedeckt .....	219
Anhang 1-8	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7 und L3a abgedeckt .....	220
Anhang 1-9	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a und A8 abgedeckt .....	221
Anhang 1-10	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1 und L2 abgedeckt .....	222
Anhang 1-11	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2 und L3 abgedeckt .....	223
Anhang 1-12	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3 und L4 abgedeckt .....	224
Anhang 1-13	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4 und L5 abgedeckt .....	225
Anhang 1-14	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6 und A9 abgedeckt .....	226
Anhang 1-15	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7 und A10 abgedeckt .....	227
Anhang 1-16	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8 und A11 abgedeckt .....	228
Anhang 1-17	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11 und A12 abgedeckt (A13-K1 transparent: DGL A13-K2 ist sichtbar) .....	229
Anhang 1-18	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12 und T7 abgedeckt .....	230
Anhang 1-19	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12, T7 und T2 abgedeckt .....	231
Anhang 1-20	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12, T7, T2 und T3 abgedeckt .....	232
Anhang 1-21	Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12, T7, T2, T3 und T4 abgedeckt .....	233



Anhang 1-1 3D Süßwassermodell ERAM. Schräge Aufsicht auf das 3D Modell ERAM – alle hydrostratigraphischen Modelleinheiten



Anhang 1-2 Perspektivische schräge Aufsicht aus SE auf 9 Serienschnitte im 3D-Modell ERAM (Abstand der Gitterlinien 1 km, Streichrichtung der Serienschnitte SW-NE)

Lappwald				
111	L0	q		Quartär
131	L1	jusi juhe		Sinemurium (Ton- bis Schluffstein) Hettangium (Schluff-, Feinsand-, Tonstein)
132	L2	juhe ko3c		Hettangium (Schluff-, Feinsand-, Tonstein) Oberer Tonstein
141	L3a	koGl		Versturz und Gleitsedimente aus Oberkeupermaterialien
142	L3	ko2b		Mittlerer Sandstein
143	L4	koM		Mergelhorizont des Unteren
144	L5-K2	ko1		Untere
145	L5-K1	ko1		
146	L6	kmSM		Steinmergelkeuper
147	L7-K1	kmGo		Oberer Gipskeuper
148	L7-K2	kmGo		
149	L7-K3	kmGo		
150	L8-K2	kmS		Schilfsandstein
151	L8-K1	kmS		
152	L8-K3	kmS		
Allertal				
210	A1-A4	q		Quartär
211	T1-K1	q + t		
221	A5	kroWAu		Oberkreide, untere Walbeckerschichten
222	A6	kroALo		Oberkreide, obere Alleringerslebener Schichten
223	A7	kroALu		Oberkreide, untere Alleringerslebener Schichten
233	A8-K1	j		Jura
234	A8-K2	j		
235	A8-K3 z>60 mNN	j		
245	A9-K1	kmSM + ko1		Steinmergelkeuper + Untere
246	A9-K2	kmSM + ko1		
247	A10	kmGo		Oberer Gipskeuper
248	A11	kmS		Schilfsandstein
249	A12	kmGu ñ mu		Unterer Gipskeuper, Unterer Muschelkalk
271	A13-K1	cr (z2-z4)		Nintates Hutgestein
272	A13-K1	cr (z2-z4)		
273	A13-K2	cr (z2-z4)		Hutgestein, Schichtenfolge DGL
Weferlinger Triasplatte				
310	T1-K1	q + t		Quartär + Tertiär
311	A1-A4	q		Quartär
351	T1-K2	mu		Deckschichten
361	T2-K1	so		Oberer Buntsandstein
362	T2-K2	so Gipskarst		Oberer Buntsandstein, Gipskarst
363	T3	smS		Sollingfolge
364	T4	smV		Volpriehausen-Folge
365	T5	smVS		Volpriehausen-Sandstein
381	T7			NE-Randstrich

4305/033/Legende-anhang1.eps/28.06.01

## Anhang 1-3 Farblgende zu den Abbildungen des Anhangs 1



Anhang 1-4

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0 und T1 abgedeckt





Anhang 1-5

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1 und A5 abgedeckt



Anhang 1-6

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5 und A6 abgedeckt



Anhang 1-7

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6 und A7 abgedeckt



Anhang 1-8

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7 und L3a abgedeckt

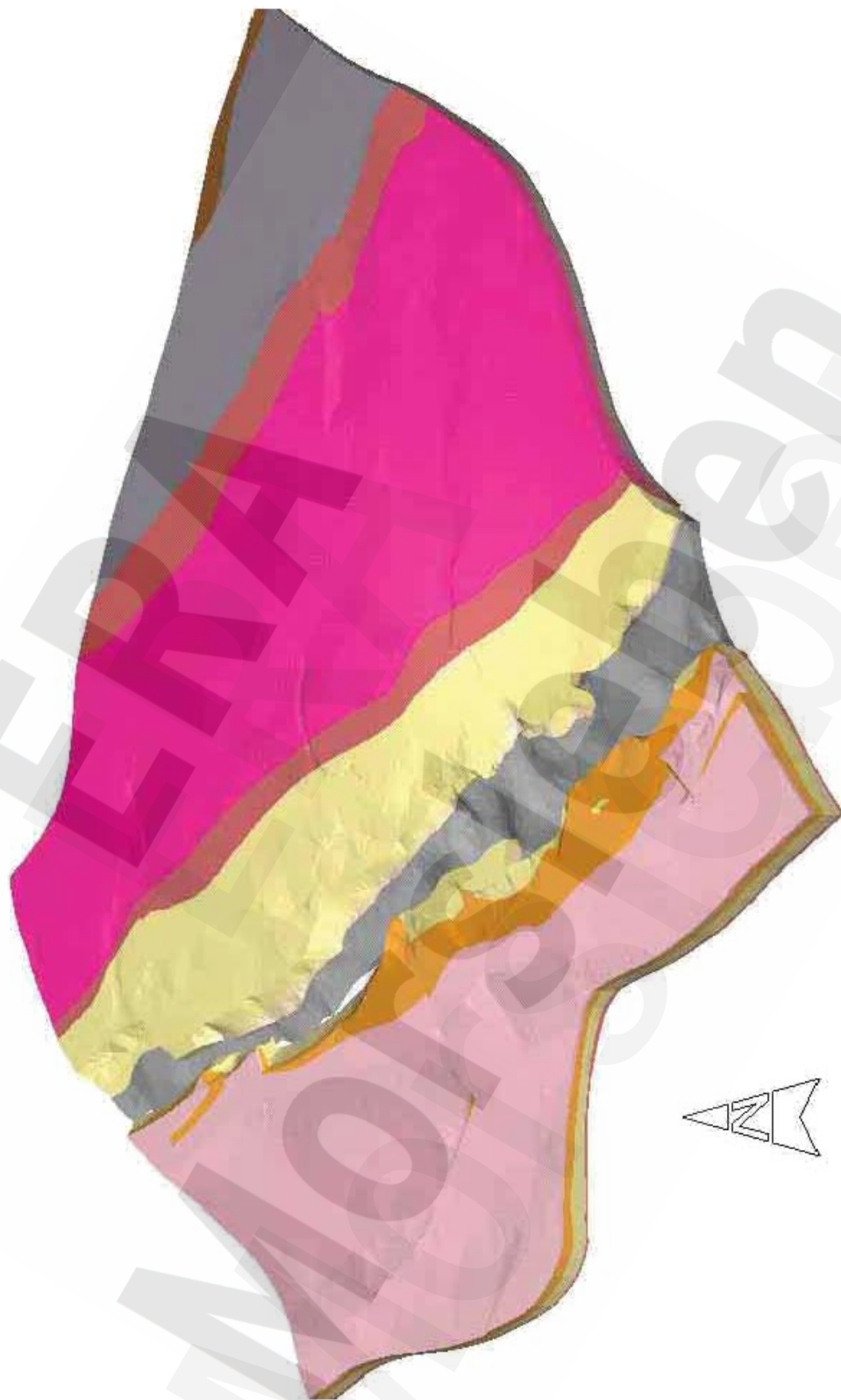


Anhang 1-9

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a und A8 abgedeckt



Anhang 1-10 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1 und L2 abgedeckt



Anhang 1-11 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2 und L3 abgedeckt



Anhang 1-12 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3 und L4 abgedeckt





Anhang 1-13 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4 und L5 abgedeckt



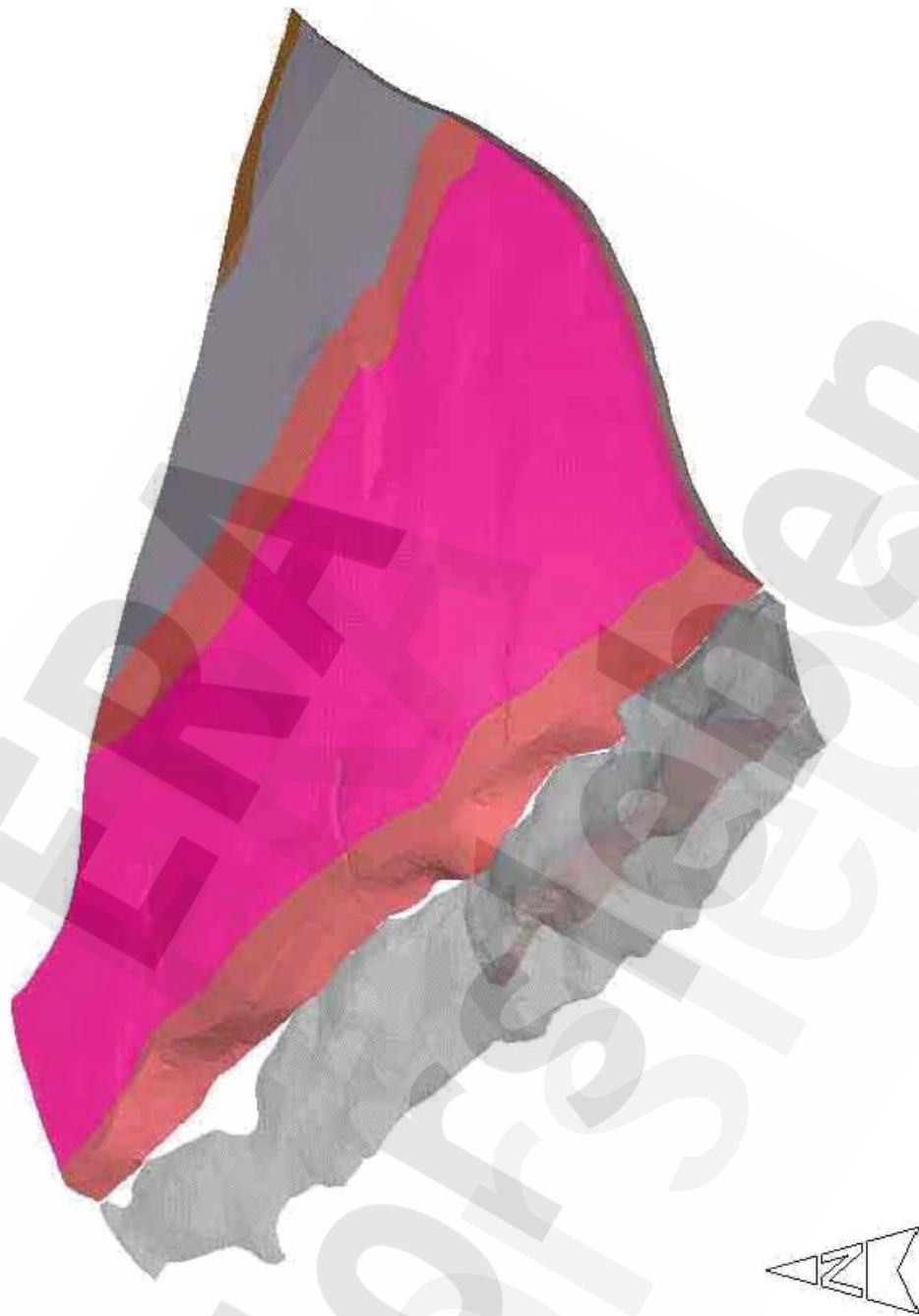
Anhang 1-14 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6 und A9 abgedeckt



Anhang 1-15 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7 und A10 abgedeckt



Anhang 1-16 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8 und A11 abgedeckt



Anhang 1-17 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11 und A12 abgedeckt (A13-K1 transparent: DGL A13-K2 ist sichtbar)



Anhang 1-18 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12 und T7 abgedeckt



Anhang 1-19

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12, T7 und T2 abgedeckt



Anhang 1-20

Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12, T7, T2 und T3 abgedeckt





Anhang 1-21 Schräge Aufsicht auf das 3D-Modell ERAM - Einheiten A1-A4, L0, T1, A5, A6, A7, L3a, A8, L1, L2, L3, L4, L5, L6, A9, L7, A10, L8, A11, A12, T7, T2, T3 und T4 abgedeckt