

## **Grundsatzfragen Hydrogeologie**

Workshop der GRS in  
Zusammenarbeit mit  
dem PTKA-WTE

Braunschweig,  
5. – 6. November 2009



## Grundsatzfragen Hydrogeologie

Workshop der GRS in  
Zusammenarbeit mit  
dem PTKA-WTE

Braunschweig,  
5. – 6. November 2009

Zusammengestellt von:

Judith Flügge  
André Rübel

Dezember 2010

### **Anmerkung:**

Die diesem Bericht zugrunde-  
liegenden Arbeiten wurden mit  
Mitteln des Bundesministeriums  
für Wirtschaft und Technologie  
BMW i unter dem Förderkenn-  
zeichen 02 E 10548 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt  
dieser Veröffentlichung liegt  
alleine bei den Autoren.

**Deskriptoren:**

Deckgebirge, Endlager, Geologie, Hydrogeologie, Isotope, Klimaänderungen, Modellierung, Norddeutschland, Salzformation



## **Widmung**

Herr Dr. Eckhard Fein wurde am 05. September 2009 unerwartet und viel zu früh aus unserer Mitte gerissen. Dieser Bericht ist ihm und seinem Wirken gewidmet. Herr Dr. Fein hat über viele Jahre die Entwicklung leistungsfähiger Programme zur Modellierung der dichtegetriebenen Grundwasserströmung und zum Schadstofftransport vorangebracht und maßgeblich gestaltet. Zu Recht genoss er in der Fachwelt ein hohes Ansehen. Seinem persönlichen Engagement und seiner Integrationskraft haben wir viel zu verdanken. Beim Workshop „Hydrogeologische Grundsatzfragen“, zu dessen Themengebieten Herr Dr. Fein viele wichtige Beiträge geleistet hat, wurde seiner im Stillen gedacht. Wir vermissen Herrn Dr. Fein als kompetenten Fachmann und stets sachorientierten Kollegen, vor allem aber als integren, humorvollen Menschen.

Dezember 2010

Jörg Mönig



# Inhaltsverzeichnis

## Zusammenfassung des Workshops

	<b>Vorwort.....</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Geologie .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Hydrogeologie und Hydrochemie.....</b>	<b>11</b>
3.1	Salz-/Süßwasserverteilung .....	11
3.2	Die Beschaffenheit des Grundwassers .....	14
3.3	Isotopenuntersuchungen und Grundwasseralter .....	15
3.4	Süß-/Salzwasserbewegung .....	17
<b>4</b>	<b>Klimatische Veränderungen.....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Modelluntersuchungen .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>Offene Fragen und weiteres Vorgehen .....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>33</b>

## Workshopbeiträge

<b>A</b>	<b>Hydrostratigraphische Gliederung und hydrogeologischer Bau des Känozoikums im Raum Gorleben.....</b>	<b>37</b>
A.1	Zusammenfassung .....	37
A.2	Einleitung.....	37
A.2.1	Geschichte der Deckgebirgserkundung .....	38

A.2.2	Ziel der Deckgebirgserkundung .....	39
A.3	Hydrostratigraphische Gliederung.....	39
A.3.1	Salzstock, Paläozän bis Unteroligozän und Basis des oberflächennahen Grundwassersystems .....	41
A.3.2	Oberoligozän und Untermiozän .....	42
A.3.3	Menap-, Bavel- und Cromer-Komplex.....	43
A.3.4	Quartärbasis und Elster .....	43
A.3.5	Holstein und Unterer Saale-Komplex .....	45
A.3.6	Oberer Saale-Komplex .....	45
A.3.7	Weichsel und Holozän .....	46
A.4	Hydrogeologischer Bau im Untersuchungsgebiet.....	47
A.5	Literaturverzeichnis.....	48
<b>B</b>	<b>Süß-/Salzwasserverteilung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben.....</b>	<b>51</b>
B.1	Einleitung.....	51
B.2	Vorgehensweise bei der Datenauswertung.....	52
B.3	Beschreibung der Süß-/Salzwasserverteilung.....	54
B.4	Zusammenfassung .....	63
B.5	Literaturverzeichnis.....	65
<b>C</b>	<b>Chemische Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben .....</b>	<b>67</b>
C.1	Datengrundlage .....	67
C.2	Typisierung der Grundwässer .....	67

C.3	Herkunft und Genese der Salzwässer.....	70
C.4	Geochemische Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Sedimenten .....	72
C.4.1	Alkalisierung und Erdalkalisierung der Grundwässer .....	73
C.4.2	Mikrobielle Sulfatreduktion.....	75
C.5	Zusammenfassung .....	78
C.6	Literaturverzeichnis.....	79
<b>D</b>	<b>Isotopenuntersuchungen und Grundwasseralter .....</b>	<b>81</b>
D.1	Einleitung.....	81
D.2	Tritium .....	82
D.3	Stabile Isotope.....	84
D.4	Radiokohlenstoff .....	88
D.5	Helium .....	91
D.6	Zusammenfassung .....	93
D.7	Literatur .....	94
<b>E</b>	<b>On the Hydrological Situation in the Gorleben Aquifer System .....</b>	<b>95</b>
E.1	Abstract .....	95
E.2	Introduction.....	95
E.3	Approach and data .....	97
E.4	Results and discussion .....	98
E.4.1	General hydrological situation.....	99

E.4.1.1	Vertical mixing: Chloride and fall-out tritium distribution with depth .....	100
E.4.1.2	<sup>18</sup> O depth distribution .....	102
E.4.1.3	Surface evaporation of recharge water .....	105
E.4.1.4	Ca and Cl concentration with <sup>18</sup> O .....	106
E.4.2	Process generating high dissolved inorganic and organic carbon .....	108
E.4.3	Groundwater dating based on <sup>14</sup> C and its decay .....	111
E.4.3.1	The source of dissolved inorganic carbon (DIC) .....	112
E.4.3.2	Correcting <sup>14</sup> C source term for atmospheric testing.....	113
E.4.3.3	<sup>14</sup> C and <sup>13</sup> C evolution in a specific part of the Gorleben aquifer system .....	115
E.4.3.3.1	< DI <sup>14</sup> C >.....	115
E.4.3.3.2	< DI <sup>13</sup> C >.....	116
E.4.3.3.3	< DI <sup>13</sup> C in the brines > .....	117
E.4.3.3.4	< <sup>14</sup> C of fulvic acid >.....	118
E.4.4	Groundwater origin and sources by <sup>13</sup> C and <sup>14</sup> C .....	119
E.5	Summary and conclusions.....	122
E.6	Acknowledgement .....	123
E.7	References .....	123
<b>F</b>	<b>Darstellung der Süß-/Salzwasserdynamik im Bereich der Gorlebener Rinne im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben.....</b>	<b>127</b>
F.1	Einleitung.....	127
F.2	Süß-/Salzwasserdynamik in der Gorlebener Rinne.....	127
F.2.1	Hydrogeologische Charakterisierung .....	127
F.2.2	Süß-/Salzwasserdynamik .....	130
F.2.3	Isotopenhydrologische Untersuchungen .....	134
F.2.4	Prinzipmodell zur Erklärung des Auftretens holozäner Grundwässer in der Gorlebener Rinne.....	135

F.2.5	Oberflächennahe Salzwasservorkommen.....	138
F.3	Zusammenfassende Diskussion .....	140
F.4	Literaturverzeichnis.....	143
<b>G</b>	<b>Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland....</b>	<b>145</b>
G.1	Einleitung.....	145
G.2	Die klimatische Vergangenheit Norddeutschlands abgeleitet aus weltweit gewonnenen Klimadaten.....	146
G.3	Klimatische Zukunft .....	148
G.4	Beeinflussungen und Randbedingungen der Deckgebirgshydrogeologie aufgrund von eiszeitlichen Prozessen .....	149
G.4.1	Permafrost.....	150
G.4.2	Eismächtigkeiten.....	151
G.4.3	Eistektonik und Exaration .....	152
G.4.4	Meeresüberdeckung .....	152
G.4.5	Grundwasserneubildung und -austritt .....	155
G.4.6	Grundwasserchemie.....	155
G.4.7	Kaltzeitliche Rinnen .....	155
G.4.7.1	Verbreitung und Ausbildung von subglazialen Rinnen .....	156
G.4.7.2	Rinnengenese .....	159
G.4.7.2.1	Entstehung durch fluviale Prozesse .....	159
G.4.7.2.2	Tektonische Ursachen.....	160
G.4.7.2.3	Subrosions und halokinetisch bedingte Entstehung.....	160
G.4.7.2.4	Entstehung durch Gletscherschurf (Exaration).....	160
G.4.7.2.5	Entstehung durch Sedimentverflüssigung („Liquefaction“, „Piping“) .....	161
G.4.7.2.6	Entstehung durch Unterkühlung („Supercooling“) .....	162

G.4.7.2.7	Entstehung durch subglaziale Schmelzwässer ( → Sporadische, plötzliche subglaziale Flutereignisse von im Eis aufgestauten Schmelzwässern) .....	163
G.4.8	Fluviatile Erosion vor dem Gletscherrand .....	164
G.5	Langzeitsicherheitsliche Bedeutung von eiszeitlichen Prozessen für ein Deckgebirge.....	164
G.6	Zusammenfassung .....	166
G.7	Literaturverzeichnis.....	167
<b>H</b>	<b>Modelluntersuchungen zur Grundwasserbewegung im Zusammenhang mit Erkundung und Langzeitsicherheit am Standort Gorleben .....</b>	<b>175</b>
H.1	Einleitung.....	175
H.2	Grundwassermodelle mit konstanter Dichte (Süßwassermodelle) .....	176
H.2.1	Stationäres dreidimensionales Grundwassermodell.....	176
H.2.2	Zweidimensional vertikale Strömungsmodelle .....	181
H.3	Zweidimensionale Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung mit variabler Dichte.....	183
H.3.1	Modellstudien mit vereinfachten Geometrien .....	184
H.3.2	Modellstudien für einen realistischen Schnitt .....	188
H.4	Paläohydrogeologische Untersuchungen.....	193
H.4.1	Zweidimensionaler Profilschnitt.....	194
H.4.2	Dreidimensionale Rechnungen.....	200
H.5	Schlussfolgerungen aus den Modellrechnungen.....	204
H.6	Literaturverzeichnis.....	205



<b>I</b>	<b>2D Modellierung von Strömung und Schadstofftransport.....</b>	<b>211</b>
I.1	Einleitung.....	211
I.2	Das hydrogeologische Modell .....	212
I.3	Das Strömungsfeld .....	215
I.4	Der Radionuklidtransport .....	216
I.5	Literaturverzeichnis.....	226
<b>J</b>	<b>Modellierung der Grundwasserbewegung in der Umgebung eines Salzstocks – Arbeiten des BfS.....</b>	<b>229</b>
J.1	Einleitung.....	229
J.2	Modellierung der Grundwasserbewegung ohne Berücksichtigung der Versalzung.....	231
J.2.1	Ziele der Modellrechnungen .....	231
J.2.2	Modellaufbau und Kalibrierung .....	231
J.2.3	Durchgeführte Modellrechnungen und wesentliche Ergebnisse .....	234
J.3	Modellierung der Grundwasserbewegung mit Berücksichtigung der Versalzung.....	236
J.3.1	Qualifizierung des Rechenprogramms .....	236
J.3.2	Dreidimensionale Prinzipmodelle .....	238
J.3.2.1	Ziele der Modellrechnungen .....	238
J.3.2.2	Beschreibung der Modelle .....	239
J.3.3	Wesentliche Ergebnisse .....	242
J.4	Ausblick .....	243
J.5	Literaturverzeichnis.....	245

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>249</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>257</b>

## Vorwort

Im Zusammenhang mit der Frage der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, insbesondere in Salzstöcken, ist die Hydrogeologie des Deckgebirges in Norddeutschland während der vergangenen Jahrzehnte von verschiedenen nationalen Institutionen untersucht worden. Umfassende Untersuchungen wurden am Standort Gorleben im Rahmen eines Untertägigen und Übertägigen geowissenschaftlichen Erkundungsprogramms der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) bzw. des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) in den Jahren 1979 bis 1999 durchgeführt. Die Auswertung und Interpretation der Untersuchungsergebnisse erfolgte durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Eine abschließende Dokumentation der Ergebnisse des Erkundungsprogramms und umfangreiche Publikationslisten sind in /KOE 07/, /KLI 07/ und /BOR 08/ zu finden. Weitere der zahlreichen wissenschaftlichen Beiträge zur Hydrogeologie des Deckgebirges in Norddeutschland werden von den Autoren verschiedener im Anhang vorgestellter Fachbeiträge zitiert.

Die hydrogeologischen Verhältnisse in Norddeutschland wurden in der Vergangenheit intensiv diskutiert und die Untersuchungsergebnisse teilweise unterschiedlich interpretiert. Aus diesem Grund haben die GRS und der Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) am 5. und 6. November 2009 am Standort der GRS Braunschweig einen Workshop zum Thema „Grundsatzfragen Hydrogeologie – Reduzierung von Inkonsistenzen in der Interpretation von Ergebnissen“ durchgeführt. Hierzu wurden nationale Experten zu einem wissenschaftlichen Diskurs eingeladen. Diese hatten sich im Rahmen von F&E-Arbeiten, aber auch bei konkreten Standorterkundungen mit verschiedenen Aspekten der Hydrogeologie des Deckgebirges in Norddeutschland befasst. Vorhandene Erkenntnisse sollten zusammengetragen, Inkonsistenzen in der Interpretation identifiziert und offene Fragen definiert und wenn möglich beantwortet werden. Die eingeladene Expertenrunde bestand aus 24 Personen von 10 Institutionen (Tab. 1.1). Der Forschungsstand wurde in 10 Fachvorträgen vorgestellt (Tab. 1.2).

Der vorliegende Bericht besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Ergebnisse des Workshops aus der Sicht der GRS zusammengefasst (Kap. 2 bis 6). Im zweiten Teil, dem Anhang, befinden sich die schriftlichen Ausarbeitungen der 10 Fachbeiträge. Die Verantwortung für den Inhalt der angehängten Fachbeiträge liegt allein bei den einzelnen Autoren und den von ihnen vertretenen Organisationen.

Der Workshop „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ war nicht standort- oder wirtsgesteinsspezifisch ausgelegt. Ziel war es, allgemeine Grundsatzfragen zur Hydrogeologie Norddeutschlands im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle zu identifizieren und zu diskutieren. Standortspezifische Daten aus dem Raum Gorleben wurden dabei herangezogen, da an diesem Standort ausführliche Untersuchungen durchgeführt worden sind und umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung steht. Die Ergebnisse der Vorträge und der Diskussionen lassen sich in weiten Bereichen jedoch auch auf andere Standorte und andere Wirtsgesteinsformationen anwenden.



**Abb. 1.1** Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ am 05. und 06.11.2009 in Braunschweig

**Tab. 1.1** Liste der Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ in Braunschweig

<b>Name</b>	<b>Organisation</b>
Beushausen, Matthias	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter
Buckau, Gunnar	Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) GmbH, Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (INE)
Fischer-Appelt, Klaus	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln
Flügge, Judith	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig
Franke, Bettina	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover
Führböter, Jens	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter
Geyer, Stefan	Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Department Hydrogeologie
Keller, Siegfried	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
Klinge, Hans	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
Köster, Siegfried	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
Larue, Peter Jürgen	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln
Lietzow, Axel	Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG), Hannover
Mönig, Jörg	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig
Noseck, Ulrich	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig
Röhlig, Klaus-Jürgen	Technische Universität (TU) Clausthal, Institut für Endlagerforschung
Rübel, André	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Berlin
Schelkes, Klaus	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
Schneider, Anke	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig
Schubarth-Engelschall, Nicole	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter
Steininger, Walter	Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Wassertechnologie & Entsorgung (PTKA-WTE)

**Tab. 1.1** (Fortsetzung)

Name	Organisation
Vogel, Peter	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
Willscher, Birgit	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
Wolf, Manfred	Helmholtz Zentrum München (HMGU), Institut für Grundwasserökologie
Wollrath, Jürgen	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Salzgitter

**Tab. 1.2** Autorinnen und Autoren, sowie Themen der Vorträge zum Workshop „Grundsatzfragen Hydrogeologie“

Name	Vortragstitel
<u>Willscher</u> (BGR), <u>Klinge</u> (BGR), <u>Ludwig</u> (BGR)	Hydrostratigrafische Gliederung und hydrogeologischer Bau des Känozoikums im Raum Gorleben
<u>Klinge</u> (BGR), <u>Ludwig</u> (BGR), <u>Willscher</u> (BGR)	Süß-/Salzwasserverteilung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben
<u>Klinge</u> (BGR), <u>Ludwig</u> (BGR), <u>Willscher</u> (BGR)	Chemische Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben
<u>Rübel</u> (GRS)	Isotopenuntersuchungen und Grundwasseralter
<u>Buckau</u> (FZK), <u>Geyer</u> (UFZ), <u>Wolf</u> (HZM)	C-14 Altersbestimmungen vom gelösten organischen und anorganischen Kohlenstoff
<u>Klinge</u> (BGR), <u>Ludwig</u> (BGR), <u>Willscher</u> (BGR)	Süß-/Salzwasserbewegung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben
<u>Keller</u> (BGR)	Bedeutung von eiszeitlichen Rinnen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland
<u>Schelkes</u> (BGR), <u>Vogel</u> (BGR), <u>Schmidt</u> (BGR)	Modelluntersuchungen zur Grundwasserbewegung im Zusammenhang mit Erkundung und Langzeitsicherheit am Standort Gorleben
<u>Schneider</u> (GRS), <u>Fein</u> (GRS)	2D Modellierung von Strömung und Schadstofftransport
<u>Wollrath</u> (BfS)	Modellierung der Grundwasserbewegung in der Umgebung eines Salzstocks – Arbeiten des BfS

## 1 Einleitung

Im Rahmen dieses Workshops wurden Grundsatzfragen zur Hydrogeologie des Deckgebirges in Norddeutschland diskutiert. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Vorträge und die sich anschließenden Diskussionen aus Sicht der GRS kurz zusammengefasst. Dabei wird auf die Vorträge verwiesen, die im Anhang dokumentiert sind.

Die genaue Kenntnis der Hydrogeologie des Deckgebirges über einem potenziellen Endlager für radioaktive Abfälle ist in mehrerer Hinsicht wichtig für den Nachweis der Langzeitsicherheit. Zum einen muss im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises eine Standortcharakterisierung erbracht werden, mit Hilfe derer eine Beschreibung des Zustands des Endlagersystems aus den Komponenten Nahfeld, Fernfeld und Biosphäre ermöglicht wird. Die Standortcharakterisierung ist notwendig, um eine belastbare Prognose der Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Zukunft abgeben zu können. In diesem Zusammenhang ist die hydrogeologische Entwicklung des Deckgebirges in Folge klimatischer Veränderungen mit dem Entstehen neuer Eiszeiten besonders wichtig. Zum anderen sind die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge für potenziell aus einem Endlager in die Geosphäre austretende Radionuklide zu betrachten, so dass Informationen über z. B. die Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit auch für die radiologische Konsequenzenanalyse erforderlich sind.

Die Grundlagen der Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges Norddeutschlands wurden in drei Vorträgen von B. Willscher und H. Klinge mit Beiträgen von R.-R. Ludwig anhand des Standortes Gorleben vorgestellt. Frau Willscher gab eine Übersicht über die Erkundungsarbeiten und die Geologie (s. Kap. 2, Anhang A), während Herr Klinge die Süß-/Salzwasserverteilung und die chemische Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben vorstellte (s. Kap. 3.1 und 3.2 und Anhänge B und C).

In der Hydrogeologie werden häufig die Ergebnisse von Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung des Alters und der Herkunft der Grundwässer herangezogen. Isotopenuntersuchungen, deren Ergebnisse und mögliche Interpretationen wurden sowohl von A. Rübel als auch von G. Buckau, S. Geyer und M. Wolf vorgestellt (s. Kap. 3.3 und Anhänge D und E).

Nur mit Kenntnis der Geologie, des hydrogeologischen Aufbaus und der Grundwasserbeschaffenheit (inkl. der Isotopensignaturen) kann eine Aussage über die heutige und die zukünftige Süß-/Salzwasserbewegung im Deckgebirge an einem bestimmten Standort gemacht werden. Einen Überblick sowohl über die Grundwasserbewegung im Süßwasserkörper als auch über die Grundwasserbewegung bzw. den Salzwatertransport in und aus einer subglazialen Rinne am Beispiel des Standortes Gorleben gaben H. Klinge, R.-R. Ludwig und B. Willscher (s. Kap. 3.4 und Anhang F).

Im Rahmen der Revision der deutschen Sicherheitskriterien wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ein Zeitrahmen von einer Million Jahren für den Nachweis des sicheren Einschlusses radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen gefordert. In solchen Zeiträumen werden drastische klimatische Änderungen und damit Veränderungen des Deckgebirges erwartet, die die Sicherheit des Endlagersystems nicht beeinträchtigen dürfen. Ein wichtiger Punkt sind dabei subglaziale Rinnen, die sich tief in das Deckgebirge einschneiden können, wie S. Keller am Beispiel der hauptsächlich während der Elster-Kaltzeit gebildeten Rinnensysteme in Norddeutschland darstellte (s. Kap. 4 und Anhang G).

Für ein besseres Verständnis der Grundwasserbewegung und deren Auswirkung auf den Schadstofftransport wurden von verschiedenen Organisationen Modellrechnungen durchgeführt. K. Schelkes, P. Vogel & G. Schmidt stellten die Arbeiten der BGR, A. Schneider die der GRS und J. Wollrath die des BfS vor (s. Kap. 4 und Anhänge H, I und J).

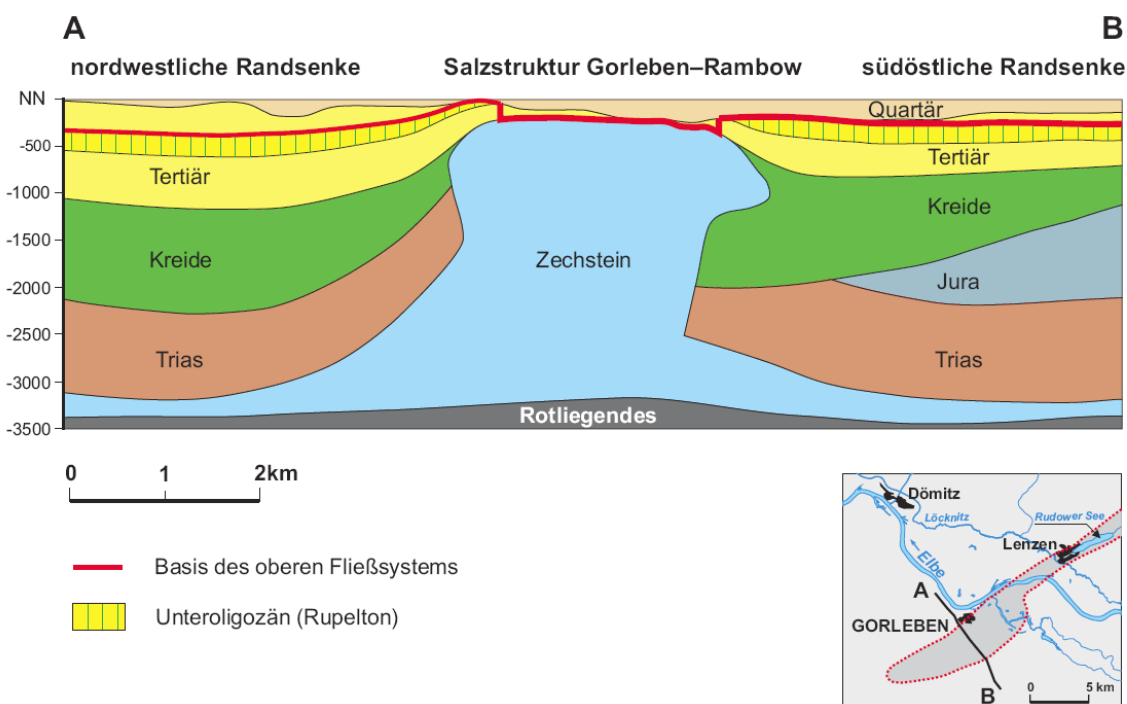


## 2 Geologie

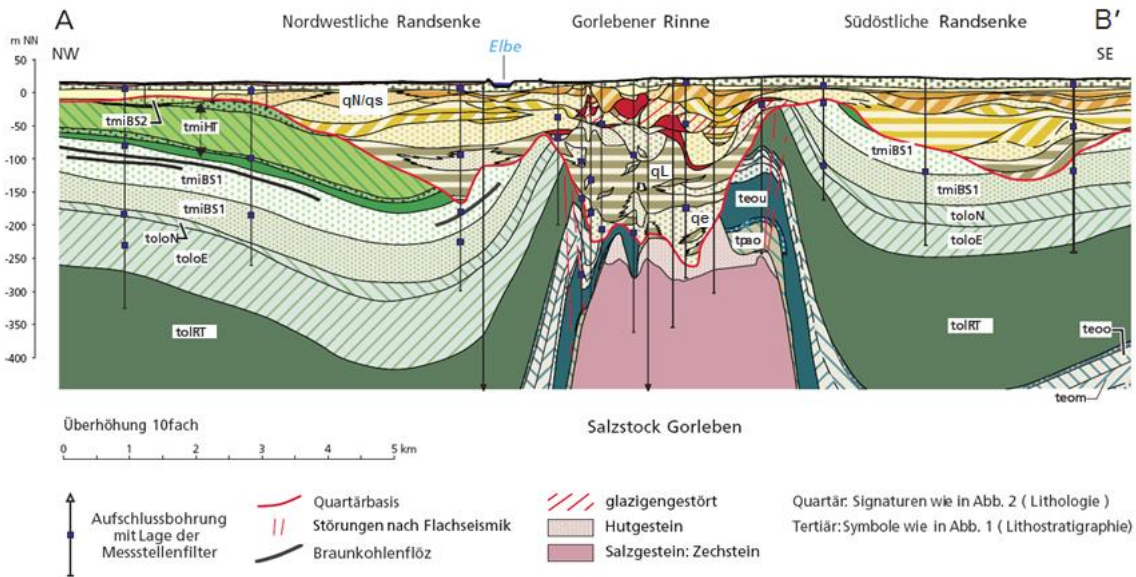
In diesem Kapitel wird die Geologie im Hinblick auf ihre Relevanz für die Hydrogeologie beschrieben. Die Geologie und Hydrogeologie Norddeutschlands sind geprägt durch die Lage in der Norddeutschen Tiefebene. Wichtige geologische Elemente der Norddeutschen Tiefebene sind die Salzstrukturen des Perm. Bedingt durch die Salzabwanderung in die Salzstrukturen kam es zur Bildung typischer Randsenken mit erhöhten Sedimentmächtigkeiten. Gleichzeitig führte der Aufstieg der Salzstrukturen häufig zu einer Aufschleppung der Sedimente. Weitere prägende Strukturelemente in der Norddeutschen Tiefebene sind elsterzeitliche Schmelzwasserrinnen, durch deren Bildung die unterlagernden Sedimente bis in Tiefen von einigen hundert Metern erodiert und in denen zu einem großen Teil glazigene Schmelzwassersande abgelagert wurden. Weit verbreitet ist in Norddeutschland der unteroligozäne Rupelton als Basis des regionalen Fließsystems. Darüber lagert meist ein System von mehreren Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern, die zu verschiedenen Grundwasserstockwerken zusammengefasst werden können. Wichtigste stratigraphische Einheiten für die Grundwasserbewegung in Norddeutschland sind die über dem Rupelton lagernden tertiären und quartären Grundwasserleiter. Im Folgenden werden daher nur noch die tertiären und quartären Sedimente behandelt.

Die geologischen Ergebnisse des Übertägigen Erkundungsprogramms des Deckgebirges am Standort Gorleben von 1979 bis 1999 sind in /KOE 07/ zusammengestellt. Aus einer Korrelation der Bohrprofile können Profilschnitte erstellt werden, die zur Konstruktion eines dreidimensionalen geologischen Strukturmodells herangezogen werden. Die Korrelation der Bohrungen erfolgte hier unter Zuhilfenahme der Ergebnisse seismischer Messkampagnen und geologischer Kenntnisse. Dabei basiert das dreidimensionale Strukturmodell immer auf einer geologischen Interpretation, die durch jede neue Bohrung vervollständigt oder ggf. revidiert wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sedimente des Quartärs auf kleinem Raum starke Schwankungen in ihrer Verbreitung und Mächtigkeit aufweisen können. Auf kurzen Distanzen können zudem große Versätze auftreten. So wurde z. B. beim Abteufen des ersten Schachtes des Erkundungsbergwerkes Gorleben mit einem Durchmesser von ca. 9 m ein Versatz der Schichtgrenze des Lauenburger-Ton-Komplexes um ca. 15 m von einer Seite des Schachtes zur anderen festgestellt. Das vorgestellte dreidimensionale strukturgeologische Modell dient als Basis für eine aktualisierte hydrogeologische Strömungsmodellierung.

Die Geologie im Raum Gorleben ist durch die Salzstruktur Gorleben–Rambow geprägt, die während der Kreidezeit ihr Diapirstadium erreichte. Bedingt durch Abwanderung von Salz in die Salzstruktur kam es zur Ausbildung von Randsenken im Nordwesten und Südosten des Salzstocks (s. Abb. 2.1). Der oligozäne Rupelton bildet die Basis des oberen Grundwasserfließsystems (s. Abb. 2.1, rote Linie), das sich aus den hangenden, bis zu ca. 400 m mächtigen Sedimenten zusammensetzt. Der detaillierte Profilschnitt (s. Abb. 2.2) zeigt den geologischen Aufbau des oberen Fließsystems. Für die über dem Rupelton (s. Abb. 2.2, toIRT) lagernden Schichten ergibt sich eine Grobgliederung in einen unteren Grundwasserleiter, einen zwischenlagernden Grundwassergeringleiter und einen oberen Grundwasserleiter. Der untere Grundwasserleiter besteht hauptsächlich aus tertiären Eochatt-Schichten (toloE), tertiären Braunkohlesanden (tmiBS1) oder elsterzeitlichen Schmelzwassersanden (qe), der Grundwassergeringleiter aus Hamburg-Ton (tmiHT) oder Lauenburger-Ton-Komplex (qL). Der obere Grundwasserleiter setzt sich zu einem großen Teil aus inhomogenen glazigenen Ablagerungen der Saale- und Weichselkaltzeit (qN/qS) mit großen Anteilen gut durchlässiger Schmelzwassersande zusammen (s. Abb. 2.2). Ein wichtiges Strukturelement ist die elsterzeitliche Gorlebener Rinne, die zu einem großen Teil die ursprünglich vorhandenen tertiären Deckschichten über dem Salzstock bis zum Kontakt zum Salinar erodierete. Als Folge stehen die quartären Rinnensande des unteren Grundwasserleiters an der Basis der Gorlebener Rinne stellenweise in direktem Kontakt zum Salinar.



**Abb. 2.1** Vereinfachter geologischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben /LUD 02/



**Abb. 2.2** Detaillierter geologischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben nach /KLI 02/ (Lokalität des Profils s. Abb. 3.1)

Für die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen ist eine genaue Kenntnis des hydrogeologischen Aufbaus des darüber liegenden Deckgebirges notwendig. Wichtige Aspekte sind dabei die Existenz eventueller hydraulischer Fenster zwischen verschiedenen Grundwasserleitern sowie deren Lage und Größe, da es über solche hydraulischen Fenster zu einem effektiven Grundwasseraustausch zwischen den Grundwasserleitern kommen kann. Ein geologisches Strukturmodell ist für die Klärung dieser Fragen Voraussetzung. Wie detailliert diese Informationen vorliegen müssen, hängt vom Sicherheits- und Endlagerkonzept ab.

Am Standort Gorleben wurde eine Vielzahl von Bohrungen in einem engen Bohrraster abgeteuft und zahlreiche hydrogeologische und geophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei in der Erkundung der Gorlebener Rinne. Der die Grundwasserstockwerke trennende Geringleiter wird am Standort Gorleben im Allgemeinen aus Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex gebildet, teilweise wird aber die geringleitende Funktion der Trennschicht auch durch quartäre Saalesedimente übernommen. Die Verbreitung und die Mächtigkeit des Hamburg-Tons (max. Mächtigkeit 102 m in den Randsenken und 66 m über dem Salzstock) und des Lauenburger-Ton-Komplexes (max. Mächtigkeit 149 m) sind durch die umfangreichen Bohrergergebnisse gut bekannt /KLI 02/. Der Lauenburger-Ton-Komplex ist im Bereich der Gorlebener Rinne lückenlos verbreitet /KLI 07/. Teilweise ist er in den oberen Partien stark eistektonisch gestört. Im Bereich der Randsenken bestehen grö-

ßere Verbreitungslücken der Geringleiter, so dass der obere und der untere Grundwasserleiter in direktem Kontakt stehen /KLI 07/. Im Gegensatz zum Hamburg-Ton und zum Lauenburger-Ton-Komplex schreibt man den saalezeitlichen Sedimenten keinen stockwerkstrennenden Charakter zu. Eine weitere Möglichkeit des Austausches zwischen oberem und unterem Grundwasserleiter besteht durch das Auftreten sandiger (glazilimnischer) Partien im Lauenburger-Ton-Komplex. Diese Partien sind meist in Form von Linsen ausgebildet. Sie könnten jedoch an dezidierten Stellen im Kontakt mit den Grundwasserleitern als hydraulische Fenster fungieren und damit ein potenzieller Ausbreitungspfad für Schadstoffe sein.

Durch die geringere Dichte von Salzgestein gegenüber Sedimentgesteinen zeigen Salzstrukturen im Allgemeinen die Tendenz, in geringere Teufen aufzusteigen. Aufstiegsraten des Salzstocks Gorleben wurden durch salztektonische Untersuchungen bestimmt und in der Vergangenheit kontrovers diskutiert /DUP 83/. Mit Hilfe einer quantitativen Randsenkenanalyse wurden durchschnittliche Werte von  $0,017 \text{ mm a}^{-1}$  für den Zeitraum von Miozän bis Quartär und bis zu  $0,085 \text{ mm a}^{-1}$  für die Oberkreide ermittelt /ZIR 91/. /JAR 94/ geht davon aus, dass der Salzaufstieg am Standort Gorleben für mindestens die nächsten eine Million Jahre ohne wesentliche Veränderungen der heutigen durchschnittlichen Aufstiegsrate von ca.  $0,01 \text{ mm a}^{-1}$  erfolgen wird.

### 3 Hydrogeologie und Hydrochemie

Die wichtigsten hydrogeologischen Einheiten der Norddeutschen Tiefebene setzen sich aus einer Wechsellagerung von unterschiedlich durchlässigen tertiären und quartären Sedimenten zusammen. Es können verschiedene Grundwasserstockwerke identifiziert werden. Oberflächennahes Grundwasser ist durch Süßwasserbedingungen charakterisiert, während das tiefere Grundwasser meist durch einen Kontakt des Grundwassers zum Salinar höher mineralisiert ist. Lokal findet man Salzwasserhochlagen. In großen Teilen Norddeutschlands treten glaziale Rinnen auf, die sich bis zu mehrere hundert Meter tief in den Untergrund eingeschnitten haben. Meist wurden in diesen Rinnen Schmelzwassersande und andere Sedimenten abgelagert. Je nach Art des Sedimentes in der Rinne haben diese Rinnen einen großen Einfluss auf die lokale Grundwasserströmungsrichtung und die Ausbreitung von Grundwasserinhaltsstoffen. In Anbetracht der Häufigkeit von Salzstrukturen in Norddeutschland und der Ausbildung der elsterzeitlichen Rinnensysteme ist es nicht ungewöhnlich, dass eine Salzstruktur und eine Rinne an der gleichen Lokalität auftreten. Diese hydrogeologische Situation könnte wie in Gorleben auch an anderen hypothetischen Endlagerstandorten in Norddeutschland vorkommen. Viele der eiszeitlichen Rinnen in Norddeutschland erreichen jedoch nur Tiefen von ca. -100 m NN.

Im Folgenden wird die hydrogeologische Situation am Beispiel des Standortes Gorleben diskutiert. Details sind in den Beiträgen von H. Klinge und R.-R. Ludwig aufgeführt (Anhänge B, C und F).

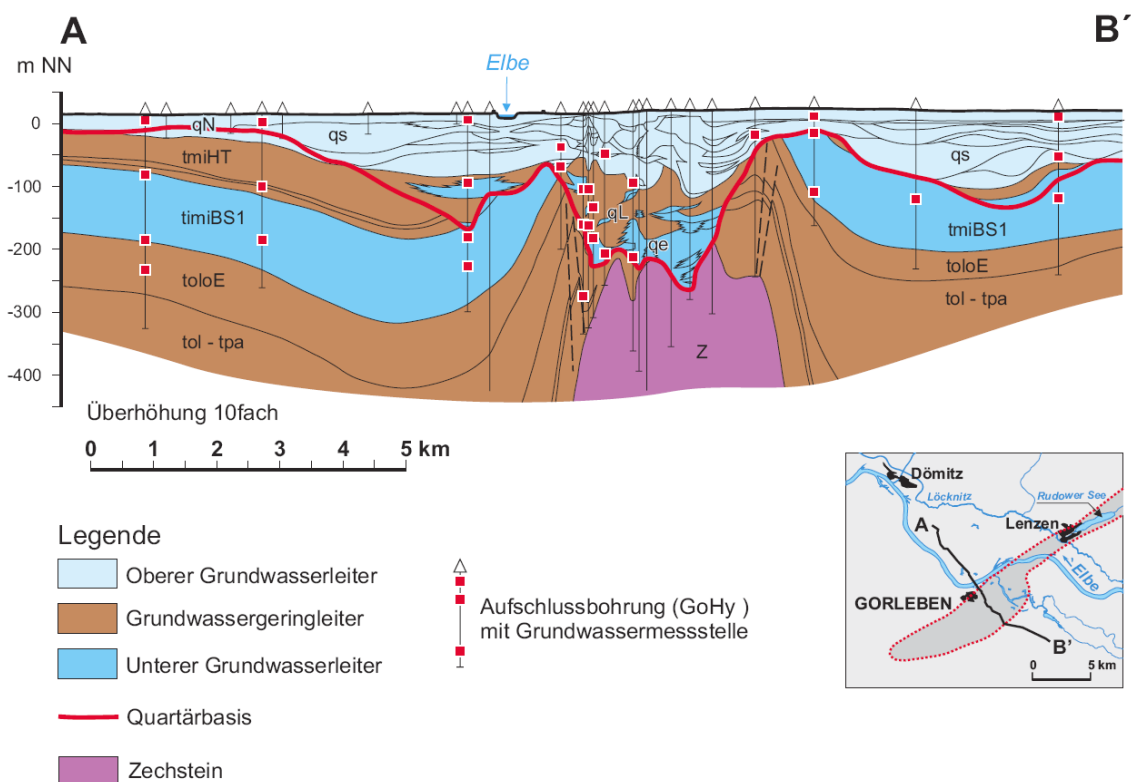
#### 3.1 Salz-/Süßwasserverteilung

Im Raum Gorleben sind – vereinfachend betrachtet – ein oberer Grundwasserleiter, ein Grundwassergeringleiter und ein unterer Grundwasserleiter ausgebildet (vgl. Kap. 2, s. Abb. 3.1). Der obere Grundwasserleiter ist aufgrund der Grundwasserneubildung durch Süßwasserbedingungen<sup>1</sup> geprägt. Ein Teil des neugebildeten Grundwassers fließt als Zwischenabfluss den Vorflutern zu. Die größten Süßwassermächtigkeiten

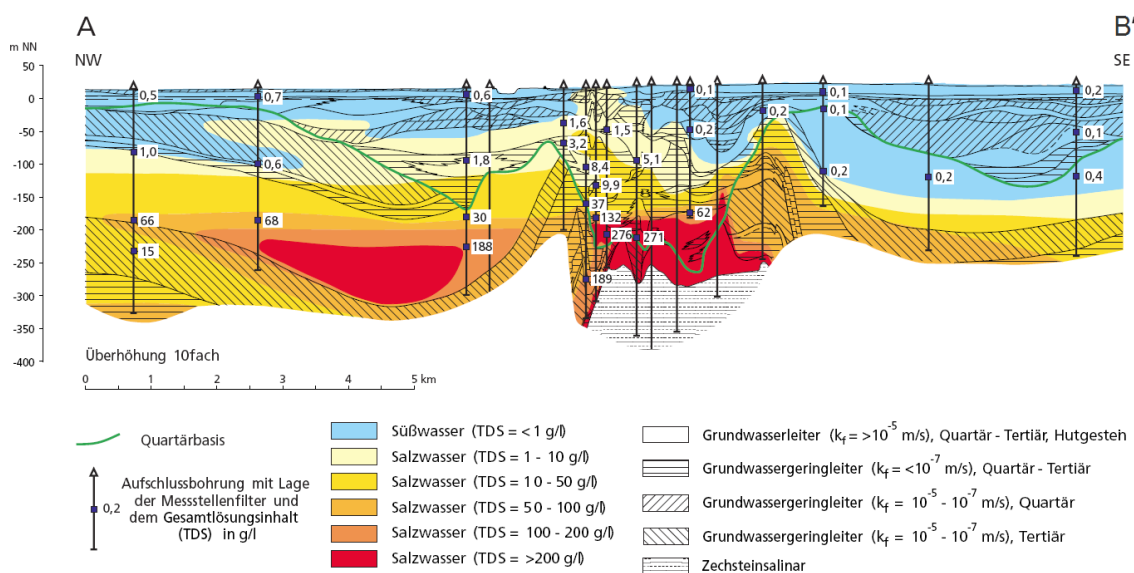
---

<sup>1</sup> Im Folgenden wird Grundwasser mit einem Gesamtlösungsinhalt (TDS) von  $< 1 \text{ g l}^{-1}$  als Süßwasser und mit einem Gesamtlösungsinhalt von  $> 10 \text{ g l}^{-1}$  als Salzwasser bezeichnet. Grundwasser mit einem Gesamtlösungsinhalt von  $1 - 10 \text{ g l}^{-1}$  wird der Übergangsschicht zugerechnet (siehe Text).

werden in der Nordwestlichen und in der Südöstlichen Randsenke angetroffen (s. Abb. 3.2).



**Abb. 3.1** Hydrogeologischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben /KLI 07/



**Abb. 3.2** Hydrogeochemischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben /KLI 02/, Lokalität des Profils s. Abb. 3.1 (Grundwasser der Übergangsschicht mit 1 – 10 g l<sup>-1</sup> wird hier als Salzwasser bezeichnet)

Der untere Grundwasserleiter ist durch Ablaugungsvorgänge am Salinar, hier vor allem am Kontaktbereich der quartären Rinnensande des unteren Grundwasserleiters zum Salzstock durch Salzwasserbedingungen gekennzeichnet. Die höchsten Salzkonzentrationen werden im unteren Grundwasserleiter am Kontakt zum Salzstock und in der Nordwestlichen Randsenke angetroffen (s. Abb. 3.2).

Die Süß-/Salzwassergrenze verläuft überwiegend in den Grundwasserleitern. Die Bestimmung des spezifischen elektrischen Formationswiderstandes und weitere geophysikalische Messungen belegten die Existenz einer nur geringmächtigen Übergangsschicht ( $1 - 10 \text{ g l}^{-1}$ ) von wenigen Metern bis Zehnermetern. Die Süß-/Salzwassergrenze weist eine ausgeprägte Morphologie auf. /KLI 07/. Demgegenüber verläuft die Grenzfläche zwischen hochmineralisierten Wässern und nahezu gesättigten Lösungen (hier  $\text{TDS} > 200 \text{ g l}^{-1}$ ) im Allgemeinen eher horizontal. Wässer mit einem Lösungsinhalt über  $200 \text{ g l}^{-1}$  treten im Untersuchungsgebiet aber nur in bestimmten Bereichen auf.

Vor allem südwestlich und südöstlich des Kontaktbereiches des Zechsteinsalinars zu den quartären Sedimenten der Gorlebener Rinne mit einer Fläche von einigen  $\text{km}^2$  wurden Verbreitungslücken des Grundwassergeringleiters identifiziert. Hier stehen der untere Grundwasserleiter und der obere Grundwasserleiter in direktem hydraulischem Kontakt.

Oberflächennahe Salzwässer treten in der Umgebung des Salzstocks Groß Heide-Siemen, über dem Salzstock am westlichen Rand der Gorlebener Rinne sowie in der Elbe-Löcknitz-Niederung auf. Im Bereich dieser Aufstromgebiete kann es zur Überlagerung von Süßwasser mit Salzwasser kommen. So befindet sich z. B. nördlich der Elbe im Bereich des Rhinow-Kanals eine Salzwasserhochlage im oberen Grundwasserleiter, während im oberen Bereich des unteren Grundwasserleiters artesisches Süßwasser auftritt. Der Ursprung dieser Hochlagen ist in dem Zusammenwirken der generellen Strömungsrichtung des Grundwassers, der Ausprägung hydraulischer Fenster und der Morphologie der Basis des Grundwasserstockwerkes, die als Schwelle dienen kann, begründet (s. Kap. 3.4). Generell sind die Ursachen für Salzwasserhochlagen wie am Standort Gorleben separat zu betrachten.

Für ein Verständnis der Grundwasserbewegung an einem Standort ist eine detaillierte Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit und der Salz-/Süßwasserverteilung ausgesprochen wichtig. Zur Klärung von Detailfragen können z. B. kleinräumige Untersuchungen des Grundwassers mit isotopehydrogeologischen Methoden zusätzlich zu

der großräumigen Anwendung dieser Methoden für das gesamte Untersuchungsgebiet durchgeführt werden. Für den Standort Gorleben wurden alle verfügbaren Daten ausgewertet und darauf aufbauend die vorhandenen oberflächennahen Salzwässer und ihre Herkunft beschrieben und diskutiert /KLI 07/.

### 3.2 Die Beschaffenheit des Grundwassers

Im Verlauf des Untersuchungsprogramms für den Standort Gorleben wurden zahlreiche Wasseranalysen von verschiedenen Institutionen durchgeführt. Anhand der vorliegenden Daten konnten die Grundwässer typisiert und die verschiedenen geochemischen Wechselwirkungen zwischen den Grundwässern und den Sedimenten identifiziert werden, die ausführlich in dem Beitrag von H. Klinge und R.-R. Ludwig wiedergegeben sind (Anhang C). Dabei wurden keine jahreszeitlichen Schwankungen der Grundwasserbeschaffenheit festgestellt.

Oberflächennah treten bevorzugt Ca-SO<sub>4</sub>-Wässer auf, in einer Tiefe ab ca. 25 m Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer, darunter Na-HCO<sub>3</sub>-Wässer und an der Basis des Grundwasserfließsystems Na-Cl-Wässer. Wichtigste geochemische Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Gesteinsmineralen sind die Silikatverwitterung (Erdalkalisierung), die Karbonatlösung, der Kationenaustausch (Alkalisierung) und die Salzablaugung. Daneben kann die mikrobielle Sulfatreduktion die ursprüngliche Zusammensetzung der Grundwässer sekundär verändern. Die verschiedenen Grundwassertypen, die Prozesse ihrer Entstehung und ihre Vorkommen sind ausführlich in /KLI 07/ beschrieben.

Zur Klärung des Einflusses der Hydrostratigrafie auf die Grundwasserbeschaffenheit können generell inverse geochemische Modellrechnungen eingesetzt werden. Am Standort Gorleben weisen die hydrostratigrafischen Formationen keine eindeutig zuzuordnende Grundwasserbeschaffenheit auf. Unterschiede in der Grundwasserbeschaffenheit ergeben sich nur zwischen den Braunkohlesanden und den anderen Sedimenten, die auf die Genese der jeweiligen Sedimente zurückzuführen sind /KLI 94/. Geochemische Modellrechnungen für den Standort Gorleben sind bereits z. B. von /BAU 89/ durchgeführt worden.

Die mikrobielle Sulfatreduktion ist ein wichtiger hydrochemischer Prozess im betrachteten Gebiet, da praktisch alle Sedimente organische Substanz enthalten und die Sulfatgehalte überall hoch genug sind. Anhand der Verteilung der Hydrogencarbonatkon-



zentration und der Schwefelisotope zeigt sich, dass der Prozess ab einer Tiefe von 20 m insbesondere in Bereichen von 500 bis 10 000 mg/l TDS auftritt, aber auch in stark mineralisierten Bereichen noch nachzuweisen ist.

### 3.3 Isotopenuntersuchungen und Grundwasseralter

In der Isotopenhydrogeologie wird das Vorkommen von natürlichen und anthropogenen Umweltisotopen im Grundwasser untersucht, die entweder stabil sind, wie z. B. das Wasserstoffisotop Deuterium oder die Sauerstoffisotopen  $^{16}\text{O}$  und  $^{18}\text{O}$ , oder radioaktiv, wie z. B. Radiokohlenstoff  $^{14}\text{C}$  oder Tritium  $^3\text{H}$ . Isotopenuntersuchungen werden zur Bestimmung der Grundwasserneubildung und Grundwasserdynamik als auch zur genetischen Charakterisierung und Abschätzung von Mischungsverhältnissen verschiedener Grundwässer herangezogen. Durch isotopenhydrogeologische Untersuchungen ermittelte Grundwasseralter können häufig nicht als absolute Alter angegeben werden, sondern müssen im hydrogeologischen Kontext interpretiert werden. Vorzugsweise sollten im Rahmen von Standorterkundungen verschiedene Isotopentracer betrachtet werden, um Fehlinterpretationen durch methodische Schwierigkeiten bei der Anwendung einzelner Tracer zu vermeiden.

Für den Raum Gorleben wurden verschiedene Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung von Grundwasseraltern durchgeführt. Grundlagen von Isotopenuntersuchungen werden im Anhang im Beitrag von A. Rübel (Anhang D) behandelt. Die Untersuchungsergebnisse am Standort Gorleben zeigen ein komplexes Bild der Isotopensignaturen und Grundwasseralter. Als generelle Tendenz kann festgehalten werden, dass oberflächennahes Grundwasser warmzeitliche Signaturen und geringe Grundwasseralter zeigen. Mit der Tiefe nimmt das Grundwasseralter zu. Insgesamt haben die Isotopenmessungen substantiell zum Verständnis und zur Charakterisierung der Grundwasserbewegung beigetragen. Vereinzelt gibt es jedoch Untersuchungsergebnisse, die kontrovers diskutiert werden. Auf diese wird im Folgenden kurz eingegangen.

Von G. Buckau, M. Wolf und S. Geyer durchgeführte Isotopenmessungen zeigten Widersprüche zwischen den gemessenen Isotopenkonzentrationen im Grundwasser und den erwarteten Werten aufgrund der hydrogeologischen Situation auf. So wurden z. B. in tritiumreichem Neubildungswasser Grundwasseralter zwischen 1 und 10 ka durch  $^{14}\text{C}$ -Messungen festgestellt, ein Alter von 31 ka für Grundwasser, das holozäne Isotopensignaturen aufweist und ein Alter von 6 bis 10 ka für Grundwasser in 35 m Tiefe

/BUC 00/. Als Gründe hierfür werden die Annahme eines zu hohen  $^{14}\text{C}$ -Quellterms und die Vernachlässigung der Verdünnung der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration durch alten  $^{14}\text{C}$ -freien Kohlenstoff angenommen. Als Konsequenz wird von den Autoren die Bestimmung eines lokalen  $^{14}\text{C}$ -Quellterms vorgeschlagen, der sowohl den Landschaftstyp, die Landnutzung und die historischen Klimaveränderungen, als auch die geochemischen Veränderungen abbildet.

$^{14}\text{C}$ -freier Kohlenstoff wird bei der Bodenpassage des Regenwassers aus aufgearbeiteter Braunkohle aus den Braunkohlesanden gelöst, die in allen quartären Sedimenten enthalten ist, was zu einer Verdünnung des rezenten organischen Kohlenstoffs führt. /SUC 93/ kommt zu dem Schluss, dass  $^{14}\text{C}$ -Messungen in Gorleben nicht zu Altersdatierungen herangezogen werden können.  $^{14}\text{C}$ -Daten werden daher nur unterstützend bei der Interpretation anderer Methoden herangezogen /KLI 07/.

Grundwasserproben aus dem unteren Grundwasserleiter in der Gorlebener Rinne zeigten ähnliche  $^{14}\text{C}$ -Gehalte in Fulvinsäuren und vergleichbare Fulvinsäurekonzentrationen wie Proben des oberflächennahen Grundwassers /SCH 05/. Aus diesen und weiteren isopenhydrogeologischen Ergebnissen wurde geschlossen, dass im Bereich des Salzstocks und östlich des Salzstocks keine großflächig ausgebildete grundwassergeringleitende Trennschicht vorhanden ist, die das Eindringen des infiltrierenden Grundwassers in den unteren Grundwasserleiter verhindert. Daneben wurde im südöstlichen Bereich des Gebietes Grundwasser bis in Tiefen von 170 m festgestellt, das die Signatur eines Feuchtgebietes aufweist /BUC 00/. Dieses Gebiet war bis zur Trockenlegung im 18. Jahrhundert ein Sumpfgebiet. Dies interpretieren die Autoren als Beweis für hohe Austauschraten zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasserleiter und damit einen schnellen Transport, was die Annahme eines großflächigen Fehlens des Grundwassergeringleiters voraussetzt.

Es wurden von verschiedenen Institutionen umfangreiche hydrochemische Untersuchungen durchgeführt. Diese belegen einen Grundwasseraustausch zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasserleiter und den Salzwatertransport aus der Gorlebener Rinne in die Nordwestliche Randsenke. Bei der Interpretation der Ergebnisse wurde die Variabilität der Grundwasserneubildung und des Grundwasserspiegels, z. B. die verringerte Neubildungsrate während der Kleinen Eiszeit, bisher nur eingeschränkt betrachtet.

Generell ist für eine Bestimmung der Grundwasseralter in Norddeutschland eine genaue Untersuchung der Genese der Grundwässer, eine detaillierte isotopengeochemische Untersuchung und eine Betrachtung der Variabilität der Landnutzung und der Klimabedingungen, z. B. in Form inverser Modellierung, für die Interpretation der hydrogeochemischen und der isotopengeochemischen Ergebnisse hilfreich.

### **3.4 Süß-/Salzwasserbewegung**

Im Raum Gorleben ist das oberflächennahe Grundwasser im oberen Grundwasserleiter durch Süßwasserbedingungen, das Grundwasser im unteren Grundwasserleiter, der Gorlebener Rinne und angrenzenden Bereichen derzeit hauptsächlich durch Salzwasserbedingungen gekennzeichnet (vgl. Kap. 3.1). Grundwasserneubildung findet zum großen Teil auf den morphologischen Hochflächen im Süden wie z. B. den Dünengebieten der Gartower Tannen statt. Daneben ist Grundwasserneubildung durch die anthropogene Beeinflussung in Form von Landwirtschaft auf den Niederungsgebieten im Norden zu verzeichnen. Von den Hochlagen im Süden fließt ein großer Teil des neugebildeten Grundwassers radial zu den Vorflutern ab. Der Abfluss im Norden erfolgt etwa parallel zur Elbe in ESE-WNW-Richtung /KLI 07/.

Salzablaugung findet im Bereich des Kontaktes zwischen den elsterzeitlichen Rinnensanden an der Basis der Gorlebener Rinne und dem Zechsteinsalinar statt. Von dort aus fließt das Salzwasser entlang der Gorlebener Rinne nach Norden und sinkt aufgrund seiner höheren Dichte in der nordwestlichen Randsenke ab. Daneben werden verschiedene Vorkommen von Salzwasser an der Oberfläche beobachtet, z. B. in der Elbe- und in der Löcknitzniederung. Das Auftreten von Salzwasser in der Elbe-Löcknitz-Niederung resultiert aus dem Übertritt von Grundwasser vom unteren in den oberen Grundwasserleiter im Bereich der Salzstruktur Gorleben–Rambow aufgrund eines direkten hydraulischen Kontaktes /KLI 07/. Diese Wässer gelangen dann in verdünnter Form bis an die Oberfläche. Eine zweite Hochlage existiert am Westrand der Gorlebener Rinne. Es ist wahrscheinlich, dass diese hochsalinen Wässer aus dem unteren Rinnengrundwasserleiter über ein hydraulisches Fenster am Westrand der Rinne in den oberen Grundwasserleiter gelangen und sich mit dem Grundwasserabstrom zur Elbe ausbreiten (siehe Anhang F und /KLI 07/). Ein weiteres oberflächennahes Salzwasservorkommen im Westen wird als Versalzungsgebiet des Salzstocks Groß Heide–Siemen interpretiert /KLI 07/.

Rückschlüsse auf die Grundwasserbewegung können am Standort Gorleben auch aus der Temperaturverteilung im Grundwasser gezogen werden. Diese Möglichkeit ist darauf zurückzuführen, dass durch die höhere Wärmeleitfähigkeit von Salz die Bereiche über dem Salzstock eine größere Wärmestromdichte aufweisen als über den Randbereichen. Der erhöhte Wärmeeintrag über dem Salzstock kann damit wie ein Tracer betrachtet werden. Messungen der Wärmestromdichte und der Grundwassertemperatur werden ausführlich in /KLI 07/ behandelt. Im unteren Grundwasserleiter über dem Salzstock und teilweise im nördlichen Teil des unteren Grundwasserleiter werden gegenüber dem geothermischen Gradienten relativ erhöhte Temperaturen festgestellt. In den anderen Teilen des unteren Grundwasserleiters und in der nordwestlichen Randsenke werden dagegen relativ niedrige Temperaturen beobachtet. Die Temperaturverteilung im Grundwasser der Gorlebener Rinne und der angrenzenden Nordwestlichen Randsenke stützt die Modellvorstellung des Salzwassertransportes aus der Gorlebener Rinne in die Nordwestliche Randsenke.

Neben dem heute weitgehend abgeschlossenen Aufstieg des Salzstocks /JAR 94/ erfolgt in Gorleben durch den stellenweisen Kontakt der Salzstockoberfläche mit Grundwasserleitern eine Subrosion des Salzstocks, die zu einer Verringerung der Salzstockmächtigkeit führt. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagers muss gezeigt werden, dass die Subrosionsvorgänge im Mittel so langsam sind, dass es während des gesamten Betrachtungszeitraums zu keiner Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kommen kann. Aus diesem Grund ist eine genaue Kenntnis der Aufstiegs- und Subrosionsraten erforderlich. Die Ablaugungsrate im oberen Bereich des Salzstocks Gorleben war Gegenstand vieler Untersuchungen und wurde kontrovers diskutiert. Während z. B. /DUP 86/ von einer großflächigen post-elsterzeitlichen Subrosion mit einer Rate von bis zu  $1,5 \text{ mm a}^{-1}$  während der Saale-Kaltzeit ausgeht, nimmt /JAR 94/ hingegen an, dass nur eine geringe nacheiszeitliche Subrosion stattgefunden hat und stattfindet. In /ZIR 91/ ist eine detaillierte Darstellung der Ablaugungsraten gegeben. Prä- und postelsterzeitliche quartäre Subrosionsraten liegen demnach zwischen  $0,1 \text{ mm a}^{-1}$  und  $0,2 \text{ mm a}^{-1}$  mit einem Maximum während der Elster-Kaltzeit. Für diesen Zeitraum können keine Werte angegeben werden, da die fluvioglaziale Subrosion nicht von der glazialen Erosion differenziert werden kann. In engem Zusammenhang mit der Subrosionsrate steht die Frage nach der Salzaustragsbilanz. Ist die Ablaugungsrate bekannt, so kann auch der Salzaustrag bestimmt und für die hydrogeologische Modellierung verwendet werden. Eine zusammenfassende Arbeit zur Abschätzung der möglichen zukünftigen Subrosi-

onsrate unter Einbezug aller vorliegenden Daten ist ein wichtiger Bestandteil eines Sicherheitsnachweises. Ein möglicher Ansatzpunkt wäre eine inverse hydrogeologische Modellierung des Salzaustrages aus der Gorlebener Rinne in der Vergangenheit und eine Übertragung der Ergebnisse zur Prognose der zukünftigen Entwicklung. Eine besondere Herausforderung liegt dabei in der Festlegung der Randbedingungen während der pleistozänen Kaltzeiten.

Generell werden Süß-/Salzwasserbewegungen im Untergrund durch die Grundwasserneubildung an der Oberfläche, die hydraulischen Potenziale, die Morphologie und die Salzablaugung an Salzstöcken geprägt. Im Großen und Ganzen sind die Grundwasserfließrichtungen und die Grundwasserfließgeschwindigkeiten in den Aquiferen in Norddeutschland bekannt. Die sich standortspezifisch ergebenden Detailfragen aufgrund eines unter Umständen komplexen geologischen Aufbaus sind jeweils zu klären.



## 4 Klimatische Veränderungen

In Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager für radioaktive Abfälle wird ein Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren zu Grunde gelegt. In solch langen Zeiträumen können drastische klimatische Änderungen auftreten, die die Sicherheit des Endlagers nicht negativ beeinflussen dürfen.

Das Klima wird durch verschiedene primäre und sekundäre Faktoren bestimmt. Primäre Faktoren sind z. B. die orbitalen Parameter der Erde oder die Plattentektonik. Diese bestimmen den Klimatrend und seine langzeitlichen Auswirkungen, während die sekundären Klimafaktoren die komplexen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre und Biosphäre beschreiben. Für die langzeitliche Klimaentwicklung spielen vor allem die primären Faktoren eine Rolle. Ein wichtiger primärer Klimafaktor ist die Plattentektonik, die das Klima z. B. durch die Öffnung und Schließung von Ozeanpassagen beeinflusst. So schloss sich am Ende des Tertiärs der Isthmus von Panama als Verbindung zwischen dem Atlantik und dem Pazifik, was zu einer veränderten Meeresströmung führte und nach /HAU 05/ als Auslöser für die großen Vereisungen des Quartärs gilt. Die Klima bestimmenden Veränderungen durch die Plattentektonik wirken langsamer als die durch Variation der orbitalen Parameter ausgelöst. Die Milankovitch-Theorie besagt, dass das Klima der vergangenen ca. 2,6 Millionen Jahre mit den glazialen Zyklen durch die orbitalen Parameter Exzentrizität, Schiefe der Ekliptik und Präzession kontrolliert wurde und in der Zukunft kontrolliert wird /MIL 30/.

Das Quartär in Norddeutschland ist durch extreme Klimaänderungen mit der Folge sich wiederholender Vorstöße von Inlandeisdecken oder Meerestransgressionen gekennzeichnet /BEN 95/. Die Wechsel zwischen den Glazialen und Interglazialen haben seit etwa 800 ka eine Zyklizität von ungefähr 100 ka.

Eine der wichtigsten Auswirkungen auf die Hydrogeologie eines Standorts ist die potenzielle Bildung von Rinnenstrukturen unterhalb des Inlandeises im Laufe einer Eiszeit. Unter welchen genauen Bedingungen es zu einer Rinnenbildung durch Schmelzwasser kam und damit auch in zukünftigen Glazialen kommen kann, ist nicht abschließend geklärt. Sollten sich zukünftig Rinnen in der Region eines Endlagerstandortes bilden, geht man davon aus, dass diese analog zu jenen der Elster-Kaltzeit Tiefen von bis zu 500 m erreichen können. Dies muss bei der Wahl der Endlagertiefe beachtet werden.

Da die Randbedingungen für die Ausbildung von subglazialen Schmelzwasserrinnen bisher nicht näher bekannt sind, ist in den Modellrechnungen die zukünftig mögliche Konfiguration des Deckgebirges, die die Grundwasserströmung und den Transport von Schadstoffen bestimmt, entsprechend variabel anzulegen. Da das nächste Glazial mit einer signifikanten Eisüberlagerung in Norddeutschland und damit auch die Ausbildung einer glazialen Rinne an einem potenziellen Endlagerstandort nach 100 ka möglich ist, kann für den Zeitraum danach keine gesicherte Aussage zum Zustand des Deckgebirges erfolgen. Sollte sich z. B. eine Rinne erneut über der Gorlebener Salzstruktur bilden, so würden die bestehenden Schichten erodiert und durch neue ersetzt. Ein Endlagerkonzept muss am Standort Gorleben daher zwingend vorsehen, dass der sichere Einschluss der Radionuklide durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich innerhalb der Salzstruktur in Verbindung mit technischen Maßnahmen gewährleistet wird. Einen Beitrag zur Langzeitsicherheit hat das Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben daher nicht zu leisten.

Während der Kaltzeiten ist das Norddeutsche Tiefland durch die Ausbildung von Permafrost mehrfach unterschiedlich lange und bis in unterschiedliche Tiefen abgekühlt worden. Steinsalz reagiert wie die meisten Gesteine auf eine Abkühlung mit Kontraktion. /BAU 91/ stellt aufgrund seiner Befunde in Salzbergwerken die Hypothese auf, dass bestimmte Klüfte eiszeitlich entstanden sind und bezeichnet die bei einem solchen Abkühlungsvorgang vom Salzspiegel zur Teufe hin aufreißenden Klüfte als kryogene Kontraktionsklüftung. Zurzeit laufen Untersuchungen, um die Genese solcher Klüfte zu erklären und ihre sicherheitliche Relevanz für Endlagerstandorte abschätzen zu können.

Für eine zukünftige Klimaentwicklung entsprechend der Milankovitch-Theorie, mit gleichbleibenden dominierenden Zyklen und ohne Berücksichtigung des anthropogenen Einflusses durch die Treibhausgasemissionen, sind innerhalb der nächsten Million Jahre bis zu zehn Kaltzeiten möglich. Dabei wird die Ausbildung von mindestens einer Kaltzeit erwartet, bei der die Rinnenbildung ein mit der Elster-Kaltzeit vergleichbares Ausmaß aufweist. Entsprechend der Milankovitch-Theorie und einer Extrapolation von Paläodaten können mögliche Szenarien der zukünftigen Klimaentwicklung in Norddeutschland hergeleitet werden, die folgende Entwicklungen beinhalten: eine Ausbildung von bis zu 200 m mächtigem Permafrost, eine Inlandeisbedeckung von bis zu 700 m Mächtigkeit, eine Meerwasserüberdeckung von bis zu ca. 60 m Höhe und eine Erosion durch eiszeitliche Rinnen in eine Tiefe von ca. 500 m. Der Einfluss der anthro-



pogenen Treibhausgasemissionen auf das Klima könnte die klimatische Entwicklung entsprechend der Milankovitch-Theorie durch eine Temperaturerhöhung hinauszögern. Dementsprechend wäre dann im Zeitraum von einer Million Jahren eine geringere Anzahl von Kaltzeiten zu erwarten.



## 5 Modelluntersuchungen

Hydrogeologische Strömungs- und Transportmodelle werden eingesetzt, um anhand von Messdaten die Vergangenheit oder den Ist-Zustand eines hydrogeologischen Systems nachzuvollziehen und aufbauend darauf das zukünftige Verhalten des Systems zu prognostizieren. Es existieren verschiedene kommerzielle Programme zur hydrogeologischen Modellierung. Für die speziellen Anforderungen in der Langzeitsicherheitsanalyse wurden in der Vergangenheit von verschiedenen Institutionen Programme entwickelt, mit denen berechnet werden kann, wie sich das Grundwasserfließsystem über sehr lange Zeiträume entwickelt. Die meisten dieser Programme sind auf spezielle Fragestellungen zugeschnitten, z. B. die Simulation der Grundwasserströmung unter Betrachtung variabler Dichte.

Seit den achtziger Jahren wurden von verschiedenen Institutionen Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung durchgeführt. Vorgestellt wurden auf dem Workshop Arbeiten der BGR, der GRS und des BfS zur Grundwasserbewegung allgemein und zur Grundwasserbewegung am Standort Gorleben. Welche Institution welche Codes verwendet, ist in den jeweiligen Fachbeiträgen im Anhang (Anhänge H, I und J) angeführt.

Von der BGR wurden in den 80er Jahren verschiedene zwei- und dreidimensionale Süßwassermodelle auf der Basis des hydrogeologischen Untersuchungsprogramms von 1986 berechnet /SCH 87/. Es handelt sich um grundlegende Arbeiten mit Hilfe stationärer Modelle für ein ca. 350 km<sup>2</sup> großes Untersuchungsgebiet. Zwei Austrittsgebiete des Grundwassers wurden festgestellt. Ein Austrittsgebiet befindet sich am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes im Bereich des Salzstocks Groß Heide-Siemen und das zweite nördlich der Elbe in den Niederungsgebieten. Für die Fließpfade ergeben sich Fließzeiten von 4 bis max. 17 ka ausgehend von der Rinnenbasis. Für die Süßwasserbewegung wurden mit dreidimensionalen Modellen Erkenntnisse in Bezug auf Fließzeiten und Fließwege im süßen, bzw. leicht salinen Grundwasser gewonnen. Rechnungen auf zweidimensionalen Modellschnitten ergeben ein von lokalen Grundwasserströmungen geprägtes Bild /GIE 85/. Mit dem Code SUTRA wurden zudem Strömungsrechnungen auf vereinfachten Profilschnitten unter Berücksichtigung des Dichteeinflusses durchgeführt /VOG 93/. Anhand dieser Rechnungen sollte vor allem geklärt werden, ob sich das System im stationären Zustand befindet und wie die Anfangsbedingungen definiert sind. Nachfolgend wurden Rechnungen auf einem realitätsnäheren Schnitt mit dem Ziel durchgeführt, die gemessene lokale Dichteverteilung zu reproduzieren /VOG 96/. Dabei wurde unter anderem festgestellt, dass das System

noch keinen stationären Zustand erreicht hat. Die Salzverteilungen konnten zufriedenstellend nachvollzogen werden, wobei fraglich ist, welche eindeutigen Kriterien zur Bewertung der Übereinstimmung der Ergebnisse von Modellrechnungen mit den Ergebnissen aus Feldmessungen anzuwenden sind.

Weitere zweidimensionale Modellrechnungen sollten dazu dienen, den Einfluss des Paläoklimas und den für den heutigen hydrogeologischen Zustand bestimmenden Zeithorizont festzulegen. Es wurden verschiedene Modellvariationen zur Lage des Vorfluters Elbe, zur Höhe des Rinnenausganges in die Nordwestliche Randsenke und zur Ausbildung eines Gletschersees über den Permafrostgebieten während einer Kaltzeit durchgeführt /KOE 00/. Nach diesen Modellrechnungen hängt die Grundwasserbewegungsrichtung stark von den Klimabedingungen ab (Stadiale oder Interstadiale), wobei ein Gletschervorstoß mit starkem Schmelzwasserzstrom einen kompletten Austausch des salinen Grundwassers in der Gorlebener Rinne bewirken kann. Die geometrische Konfiguration spielt eine weitaus geringere Rolle für die Einstellung der rezenten Bedingungen als die klimatischen Bedingungen. Diese Aussagen wurden mit einem dreidimensionalen Modell überprüft und bestätigt /KOE 01/. In diesem dreidimensionalen Modell konnten auch die lateralen Zu- und Abströme berücksichtigt werden. Generell ist die Verwendung eines komplexen dreidimensionalen Modells zu bevorzugen.

Bei Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager für radioaktive Abfälle werden Transportmodelle für das Fernfeld herangezogen. Zweidimensionale Strömungs- und Transportrechnungen für ein heterogenes Deckgebirge wurden von der GRS im Jahr 2005 für das Deckgebirge des Salzstocks Gorleben durchgeführt /KES 05/, wobei ein hypothetisches Szenario für eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Salzkörper unterstellt wurde. Auf der Basis eines komplexen geologischen Modells der BGR von 1995 /SCH 95/ wurden auf einem Profilschnitt die Dichteströmung und der Transport von Radionukliden berechnet. Der bevorzugte Transportweg der Radionuklide, der Ort der maximalen Konzentration an der Oberfläche, der Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Konzentration an der Oberfläche und die daraus resultierende maximale Strahlenexposition hängen dabei nicht nur von Strömungsrichtung und -geschwindigkeit ab, sondern auch von den unterschiedlichen Sorptionseigenschaften und Halbwertszeiten der Radionuklide. Mehrdimensionale Modelle, die Heterogenitäten im hydrogeologischen Aufbau und die unterschiedlichen Eigenschaften der einzelnen Radionuklide berücksichtigen, sind demzufolge die Basis für ein besseres Verständnis der Vorgänge im Grundwasser. Forschungsbedarf besteht in einer Anpassung der hydrogeologischen Modelle (zwei- oder dreidimensional) an die aktuelle Datenlage und den Stand der

Technik in der Modellierung. Daraus können dann eindimensionale Modelle, die sich gegebenenfalls für einzelne Nuklide oder Nuklidgruppen unterscheiden, abstrahiert werden.

Das BfS hat Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines potenziellen Endlagers am Standort Gorleben von der Firma Colenco Power Consulting AG auf der Basis des hydrogeologischen Strukturmodells der BGR mit dem Kenntnisstand von 1994 durchführen lassen /GEN 96/. Ziel der Modellrechnungen war es unter anderem, die Strömungsrichtungen über dem Salzstock, Verdünnungsfaktoren für aus dem Salzstock austretende Lauge und potenzielle Ausbreitungspfade für Radionuklide zu analysieren. Diese Rechnungen ergänzen die Rechnungen der BGR vor allem in Bezug auf die ermittelten Transportpfade und die berechneten Transportzeiten zwischen dem Kontakt zum Salzstock und der Oberfläche. Mit Hilfe der Süßwassermodelle sind vier wichtige Fließpfade identifiziert worden: (i) vom Salzstock nach Norden und von dort nach Südwesten in die Nordwestliche Randsenke, (ii) nach Nordwesten an die Oberfläche in der Umgebung des Salzstocks Groß Heide–Siemen, (iii) nach Norden an die Oberfläche und (iv) nach Nordosten in den Bereich der Elbe-Niederung. Diese Rechnungen bestätigen in vielen Teilen die Ergebnisse der BGR. Dreidimensionale Rechnungen zur Salzwasserbewegung zeigen ähnliche generelle Fließpfade wie die Rechnungen der BGR /KLE 98/. Vorherrschend ist ein advektiver Transport vom Hutgestein in die Gorlebener Rinne mit Bildung einer Zirkulationszelle quer zur Rinne. Im Norden sinkt das Grundwasser in die Nordwestliche Randsenke ab. An der Oberfläche treten Salzwasseraufstromgebiete im Bereich von Siemen, in der Elbeniederung und, bedingt durch Diffusionsprozesse durch die geringleitenden Trennschichten, ebenfalls im Bereich der Elbe-Niederung auf. In den vorgestellten Arbeiten des BfS haben sich folgende Einflussfaktoren als besonders wichtig für die Grundwasserströmung in der Gorlebener Rinne herausgestellt: Geometrie, Mächtigkeit und Durchlässigkeit des Hutgesteins, seine Anbindung an die Rinnensande und die Topographie der Rinne mit ihren Ein- und Ausgängen, vor allem wegen ihres Einflusses auf den Salztransport. Diese Faktoren sollten in zukünftigen Modellrechnungen differenzierter betrachtet werden. Für zukünftige Modellrechnungen sollte laut BfS entsprechend dem heutigen Stand der Technik ein verfeinertes Modell mit einer größeren flächigen Ausdehnung verwendet werden, welches die benachbarten Salzstöcke Siemen und Rambow einbezieht und welches die geologische Ausbildung sowohl des Hamburg-Tons und des Lauenburger-Ton-Komplexes als auch die tertiären Braunkohlensande detaillierter abbildet.



## 6 Offene Fragen und weiteres Vorgehen

Im Rahmen des Workshops „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ wurden Ergebnisse unterschiedlicher Arbeiten zur Geologie, Hydrogeologie, hydrogeologischen Modellierung und zu den Auswirkungen von Klimaänderungen in Norddeutschland von verschiedenen Institutionen vorgestellt und diskutiert. Im Hinblick auf die Hydrogeologie Gorlebens sind bis zum Moratorium im Jahr 2 000 umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Modellrechnungen, die im gleichen Zeitraum durchgeführt wurden, konnten teilweise nicht alle Untersuchungsergebnisse berücksichtigen, da sie oftmals zeitgleich mit den laufenden Erkundungen durchgeführt wurden. Anhand einer Aufarbeitung der vorliegenden Daten sollten offene Fragen geklärt und Inkonsistenzen in der Interpretation von Ergebnissen diskutiert werden. Dies ist für eine möglichst realitätsnahe Beschreibung der Strömungs- und Transportvorgänge im Deckgebirge von großer Bedeutung. Bisher erhobene Daten der BGR sind in den Berichten der BGR /u. a. KLI 07, KOE 07/ umfassend dargestellt. Das aktualisierte dreidimensionale geologische Modell wird ca. 2011 vorliegen.

Sowohl die BGR als auch das BfS sehen keinen substanziellen Forschungsbedarf bezüglich des Deckgebirges im Hinblick auf die Langzeitsicherheitsanalyse eines Endlagers für den Standort Gorleben. Folgende generelle Fragestellungen wurden aufgeworfen:

- **Lage und Dimension hydraulischer Fenster**

Für die Modellierung der Grundwasserströmung sind die Lage und Dimension hydraulischer Fenster entscheidende Randbedingungen.

In Bezug auf den Standort Gorleben wird derzeit ein aktualisiertes, geologisches Modell erstellt (s. o.), das als Grundlage für eine standortspezifische Strömungsmodellierung dienen wird.

- **Wärmetransport**

Eine Berücksichtigung des Wärmetransportes bei der hydraulischen Modellierung des Salzwassertransportes über Salzstrukturen kann zusätzliche wichtige Hinweise zu Transport- und Ablaugungsraten liefern. Um die Voraussetzungen zu schaffen, sind weiterführende F&E-Arbeiten erforderlich.

- **Hydrogeologische Modellierung**

Für eine möglichst realistische Bewertung der zukünftigen Entwicklung ist das Verständnis der Prozesse und Bedingungen in der Vergangenheit sehr wichtig. Auf-

grund der oben aufgeworfenen Fragen zur Geologie und der Geometrie des Modells ist die Bewertung der Paläohydrogeologie und damit auch die Auswahl von realistischen Anfangs- und Randbedingungen bei der hydrogeologischen Modellierung sehr schwierig. Bisher gibt es keine umfassenden dreidimensionalen hydrogeologischen Modelle für das gesamte Gebiet, die die Erkundungsergebnisse nördlich der Elbe berücksichtigen. Mit weiteren dreidimensionalen Modellrechnungen sollten die bisher existierenden Modelle überprüft werden. Inverse Modellrechnungen könnten dazu dienen, das geologische Strukturmodell, vor allem im Hinblick auf die Lage und Verbreitung von Grundwassergeringleitern im Deckgebirge des Salzstocks, zu überprüfen. Es stellt sich die Frage, welche Änderungen der bisherigen Modelle eventuell nötig sind, um eine Übereinstimmung der Salz-/Süßwasserverteilung und -bewegung mit dem rezenten hydrogeologischen Zustand zu erhalten. Für die hydrogeologische Modellierung muss außerdem geprüft werden, welche weiteren Annahmen und Vereinfachungen zulässig sind und welche überarbeitet werden müssen.

- **Paläohydrogeologie; Genese der Grundwässer**

An den vorangegangenen Punkt schließt die Frage nach der Genese der Grundwässer an. Insgesamt sind die paläohydrogeologische Situation und die Genese der Grundwässer für den Standort Gorleben geklärt. Insbesondere bei der Interpretation der Messwerte für  $^{14}\text{C}$  gibt es jedoch offene Fragen, die durch zusätzliche Modellrechnungen beantwortet werden könnten.

Generell können offene Fragen bei der Interpretation isotopehydrogeologischer Daten durch detailliertere isotopegeochemische Modellrechnungen für das Grundwasser unter Betrachtung der Landnutzung, der Klimabedingungen und kurzfristiger Änderungen geklärt werden.

- **Klima, Rinnenbildung und ihre Behandlung in der Langzeitsicherheitsanalyse**

Die Bildung eiszeitlicher Rinnen in Norddeutschland würde die Hydrogeologie eines Deckgebirges in erheblichem Maße beeinflussen, da sich die Rinnen bis zu 500 m tief in den Untergrund einschneiden und Sedimente des Deckgebirges und Teile der Wirtsgesteinsformation erodieren können. Die Bildung der Rinnen ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand unabhängig von der Ausbildung des Deckgebirges oder der Existenz einer älteren Rinne am betrachteten Standort. Nicht nur am Standort Gorleben, sondern auch an anderen potenziellen Endlagerstandorten in Norddeutschland ist eine zukünftige Rinnenbildung möglich. Für die Bewertung der zukünftigen Entwicklung eines Standortes ist eine Aussage über zukünftig



mögliche Klimaentwicklungen mit realistischen Zeiträumen und Abfolgen verschiedener Zustände von besonderem Interesse. Die Relevanz von Rinnenbildungen für die Langzeitsicherheit ist abzuschätzen, wobei untersucht werden muss, welche Auswirkungen bis zu welcher Tiefe die Rinnenbildung auf das Wirtsgestein haben kann.

- **Kryogene Risse**

Die Bildung und die Auswirkungen kryogener Risse im Salinar erfordern weitere grundlegende Forschungsarbeiten. Mit den Untersuchungen zur Entstehung und zur Ausdehnung kryogener Risse ist begonnen worden.

- **Aufstiegsrate, Ablaugungsrate, Salzaustragsbilanz**

Es ist zu prüfen, ob die Bilanzierung des Salzaustrags auf der Basis hydraulischer Modellrechnungen als Methode zur Abschätzung zukünftiger Ablaugungsraten herangezogen werden kann.



## 7 Literaturverzeichnis

- /BAU 91/ Bauer, G., Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren?, Zbl. Geol. Paläontol., Teil 1, Heft 4 (1991) 1247-1261.
- /BAU 89/ Baumann, J., Geochemische Auswertung ausgewählter Wasseranalysen aus dem hydrogeologischen Untersuchungsprogramm Gorleben. Mischung von hochkonzentrierten Solen mit karbonatischen Süßwässern, unveröff. Bericht, BGR, Archiv Nr. 103482, Hannover: BGR, 1989, 42.
- /BEN 95/ Benda, L., Das Quartär Deutschlands, Berlin, Stuttgart: Gebrüder Bornträger, 1995, 408.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M., Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars, Geol. Jb., C 73 (2008) 211.
- /BUC 00/ Buckau, G., Artinger, R., Geyer, S., Wolf, M., Fritz, P., Kim, J. I., <sup>14</sup>C dating of the Gorleben groundwater, Appl. Geochem. 15 (2000) 283-597.
- /DUP 86/ Duphorn, K., Das subrosive Sicherheitsrisiko bei der geplanten Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzstock Gorleben aus quartärgeologischer Sicht, Z. dt. geol. Ges. 137 (1986) 105-120.
- /DUP 83/ Duphorn, K. & Schneider, U., Zur Geologie und Geomorphologie des Naturparks Elbufer-Drawehn, Abh. Naturwiss. Hamburg (NF), 40 (1983) 9-40.
- /GEN 96/ Genter, M., Klemenz, W., Schindler, M., Projekt Gorleben: 3D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen – Modellaufbau und -kalibrierung, Bericht 4073/09 (unveröff.), Baden/CH: Colenco Power Consulting AG, 1996.

- /GIE 85/ Giesel, W., Delisle, G., Fielitz, K., Schelkes, K., Schildknecht, F., Schmidt, G., Boehme, J., Keller, S., Ludwig, R., Vierhuff, H., Grundwasserbewegung im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben - Datenermittlung, Interpretation und Modellrechnungen, Fachband 17 des Abschlussberichtes "Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung", Berlin, 1985, 125.
- /HAU 05/ Haug, G., Ganopolski, A., Sigman, D. M., Rosell-Mele, A., Swann, G. E. A., Tiedemann, R., Jaccard, S. L., Bollmann, J., Maslin, M. A., Leng, M. J., Eglinton, G., North Pacific seasonability and the glaciation of North America 2.7 million Years ago, *Nature* 433 (2005) 821-825.
- /JAR 94/ Jaritz, W., Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Analogon für das Langzeitverhalten eines Barrieresystems, *Z. Dt. Geol. Ges.* 145 (1994) 192-206.
- /KES 05/ Keesmann, S., Noseck, U., Buhmann, D., Fein, E., Schneider, A., Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen, GRS 206, Braunschweig: GRS, 2005, 75.
- /KLE 98/ Klemenz, W., Rivera, A., Wollrath, J., Genter, M., Three-dimensional Coupled Groundwater Movement and Salt Transport Calculations as Part of the Safety Assessment of the Gorleben Repository, Germany, in: *Proc. DisTec '98 - Disposal Technologies and Concepts, Int. Conf. on Radioactive Waste Disposal, Hamburg, 9-11 September 1998*, (Roth, A., Hrsg.), Hamburg: Kontec, 1998, pp. 591-596.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A., Standortbeschreibung Gorleben, Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben, *Geol. Jb.*, C 71 (2007) 199.
- /KLI 02/ Köthe, A., Ludwig, R.-R., Zwirner, R., Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben, *Z. Angew. Geol.* 2 (2002) 7-15.

- /KLI 94/ Klinge, H., Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isoto-  
pen-geochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge  
des Salzstockes Gorleben und seiner Randsenken – Projektgebiet Gorle-  
ben-Süd, unveröff. Bericht, BGR, Archiv-Nr. 111 699, Hannover: BGR,  
1994.
- /KOE 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R., Standortbe-  
schreibung Gorleben, Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges  
des Salzstocks Gorleben, Geol. Jb. C 72 (2007) 147.
- /KOE 01/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., 3D-Modellierung der paläohydrogeo-  
logischen Entwicklung des Grundwassersystems im Elberaum zwischen  
Burg und Boitzenburg, unveröff. Bericht, BGR, Archiv Nr. 0121964, Han-  
nover: BGR, 2001, 37.
- /KOE 00/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., 2D-Modellierung der paläohydrogeo-  
logischen Entwicklung des Grundwassersystems im Elberaum zwischen  
Burg und Boitzenburg, unveröff. Bericht, BGR, Archiv Nr. 0120315, Han-  
nover: BGR, 2000, 61.
- /LUD 02/ Ludwig, R., Kösters, E., Hydrogeologisches Modell Gorleben – Entwick-  
lung bis zum paläohydrogeologischen Ansatz. In: Hydrogeologische Mo-  
delle – Ein Leitfaden mit Fallbeispielen (Arbeitskreis “Hydrogeologische  
Modelle und Grundwassermanagement” der Fachsektion Hydrogeologie  
der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Hrsg.), Hannover, Schriftenrei-  
he der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 24 (2002) 69-77.
- /MIL 30/ Milankovitch, M., Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie  
der Klimaschwankungen, in: Handbuch der Klimatologie in fünf Bänden.  
Vol. I: Allgemeine Klimalehre, Part A. (Köppen, W., Geiger, R., Hrsg.), Ber-  
lin: Gebrüder Bornträger, 1930, 176.
- /SCH 05/ Schäfer, T., Buckau, G., Artinger, R., Kim, J.I., Geyer, S., Wolf, M., Blead,  
W. F., Wirick, S., Jacobsen, C., Origin and Mobility of Fulvic acids in the  
Gorleben Aquifer system: Implications from Isotopic Data and Car-  
bon/Sulfur XANES, Org. Geochem., 36 (2005) 567–582.

- /SCH 95/ Schelkes, K., Modelluntersuchungen zur Bewegung des Grundwassers bei vom Salzgehalt anhängiger Wasserdichte - Fallstudien und Modellvalidierung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 02 E 8301. Hannover BGR, 1995.
- /SCH 87/ Schmidt, G., Die Bewegung des Grundwassers im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben – Untersuchungen mit einem numerischen Modell, unveröff. Bericht, BGR, Archiv Nr. 102396, Hannover: BGR, 1987.
- /SUC 93/ Suckow, A., Isotopenhydrologische und Edelgaspaläotemperaturenuntersuchungen im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben, unveröff. Dissertation, Heidelberg, 1993, 147.
- /VOG 96/ Vogel, P., Schelkes, K., Modelling of brine transport in an aquifer crossing the Gorleben salt dome - Influence of initial conditions and hydrogeological setting, in: Proc. 14th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM 96), 17-21 June 1996, Malmö, Sweden, Rapporter och meddelanden nr. 87, Uppsala, 1996, pp. 61-70.
- /VOG 93/ Vogel, P., Schelkes, K., Giesel, W., Modeling of Variable-Density Flow in an Aquifer Crossing a Salt Dome - First Results, in: E. Custodio & A. Galofre (ed.): Study and Modelling of Salt Water Intrusion, Proc. 12th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), CIMNE, Barcelona, 1993, pp. 359-369.
- /ZIR 91/ Zirngast, M., Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben – Ergebnis einer Strukturgeologischen Bearbeitung, Geol. Jb. A 132 (1991) 3-31.

# **A Hydrostratigraphische Gliederung und hydrogeologischer Bau des Känozoikums im Raum Gorleben**

R.-R. Ludwig<sup>1</sup>, H. Klinge<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

## **A.1 Zusammenfassung**

Im Rahmen der Standortuntersuchungen für ein potenzielles atomares Endlager im Salzstock Gorleben richtete sich das Augenmerk nicht nur auf den Salzstock selbst, sondern auch auf das überlagernde Deckgebirge. Ziel der Deckgebirgsuntersuchungen war das Verständnis der Grundwasserdynamik innerhalb der quartären und tertiären Sedimente.

Das Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben weist 32 hydrogeologische Einheiten auf, die zusammen mit einer dreistufigen Klassifikation der Durchlässigkeit vorgestellt werden. Die tertiärzeitlichen Einheiten (Paläozän bis Miozän) sind als überwiegend durchgehende Schichten ausgebildet. In diese haben sich Rinnen eingeschnitten, in die ältere quartärzeitliche Einheiten abgelagert wurden (elsterzeitlich). Die jüngeren quartärzeitlichen Einheiten füllen die Rinnen nach oben hin auf (überwiegend saalezeitlich) und sind darüber im gesamten Untersuchungsgebiet verbreitet (überwiegend weichselzeitlich und holozän).

Hydrogeologisch ergibt sich eine Grobgliederung in einen oberen und einen unteren Grundwasserleiter. Diese werden großflächig von einem Grundwassergeringleiter getrennt, der sowohl aus tertiären (Ton/Schluff-Unterbau des Hamburg-Ton-Komplexes) als auch quartären Schluffen und Tonen (Lauenburger-Ton-Komplex) besteht. In Teilbereichen der Randsenken fehlen diese Geringleiter, so dass oberer und unterer Grundwasserleiter in direktem Kontakt stehen.

## **A.2 Einleitung**

Im Rahmen der Standortuntersuchungen für ein potenzielles atomares Endlager im Salzstock Gorleben richtete sich das Augenmerk nicht nur auf den Salzstock selbst als Aufnahmeort für den radioaktiven Abfall, sondern auch auf das den Salzstock überla-

gernde Deckgebirge, das ebenfalls intensiv unter geologischen und hydrogeologischen Gesichtspunkten untersucht wurde.

### **A.2.1 Geschichte der Deckgebirgserkundung**

Anfang der 60er Jahre erfolgte die Festlegung auf Salz als Endlagermedium für radioaktive Abfälle. Auf der Suche nach einem geeigneten Standort benannte die niedersächsische Regierung im Jahr 1977 den Salzstock Gorleben.

Die Deckgebirgserkundung erfolgte im Teilgebiet Gorleben-Süd parallel zur Salzstockuntersuchung in den Jahren von 1979 bis 1986. In einem Gebiet über dem Salzstock und über den Randsenken, das 390 km<sup>2</sup> umfasst, wurden 219 Bohrungen überwiegend in das Quartär und Tertiär abgeteuft. 44 Bohrungen erreichten das Hutgestein bzw. den Salzspiegel, weitere Bohrungen dienten der Erkundung des Salzstocks. Nach der Wende konnte in den Jahren 1996 bis 1999 auch der 90 km<sup>2</sup> umfassende Teil nördlich der Elbe in der Elbe-Löcknitz-Niederung mit 27 Aufschlussbohrungen erkundet werden. Weitere 22 Flachbohrungen unterstützten die quartärgeologische Kartierung dieses Gebiets. Insgesamt wurde das Deckgebirge von 281 Bohrungen erfasst. Die Bohrprofile wurden sedimentpetrographisch, lithostratigraphisch, mikropaläontologisch, palynologisch und hydrogeologisch bewertet. Aus bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen lagen Gamma-Ray-Logs und z. T. Density-Logs vor. Zusätzlich wurden weitere 175 Bohrprofile aus für andere Zwecke (Erdöl-, Erdgas- bzw. Braunkohleexploration, Grundwassererkundung sowie Baugrunduntersuchungen) abgeteuften Bohrungen im Rahmen der Deckgebirgserkundung ausgewertet. /BAH 02/ beschreiben die Bohrprofile zusammenfassend.

Als Folge der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den Energieversorgern wurden im Jahr 2000 die Arbeiten am Standort Gorleben unterbrochen. Dieses Moratorium gilt für die Dauer von drei bis maximal zehn Jahren. Zu diesem Zeitpunkt waren die Untersuchungen des Deckgebirges bereits abgeschlossen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen konnten daher trotz des Moratoriums abschließend dargestellt werden (/KLI 04/, /LUD 02/, /ZIR 03/). Darüber hinaus sind diese Informationen in der Zwischenzeit in zwei Bänden des Geologischen Jahrbuchs (/KLI 07/ und /KÖT 07/) der Öffentlichkeit zugänglich gemacht worden.



### **A.2.2 Ziel der Deckgebirgserkundung**

Ziel der Deckgebirgsuntersuchungen war das Verständnis der Grundwasserdynamik innerhalb der quartären und tertiären Sedimente. Neben der Kenntnis der hydraulischen Parameter interessierten besonders Fließwege im Hinblick auf die mögliche Ausbreitung von Schadstoffen von der Salzstockoberfläche an die Erdoberfläche, d. h. in die oberflächennahe, vom Menschen genutzte Hydrosphäre und in die Biosphäre. Das komplexe Zusammenspiel quartärzeitlicher und tertiärzeitlicher Grundwasserleiter und -geringleiter konnte zweidimensional nicht umfassend und räumlich konsistent wiedergegeben werden. Deswegen wurde ein hydrogeologisches 3D-Strukturmodell geschaffen, das der räumlichen Komplexität der Deckschichten, insbesondere innerhalb der eiszeitlichen Sedimente, am ehesten gerecht werden kann. Das Modell bildet eine wesentliche Grundlage für hydraulische Modellierung der Wasserbewegung im Deckgebirge.

Das hydrogeologische 3D-Strukturmodell wurde aus den bereits erwähnten 456 Bohrungen /BAH 02/ sowie weiteren geologischen Daten konstruiert. Diese setzen sich aus 10 geologischen Schnitten und 18 Tiefenlinienplänen der Basis geologischer Einheiten einschließlich deren Verbreitungsgrenzen zusammen /ZIR 03/. Als Modellierungssoftware kam openGEO zum Einsatz, das unter AutoCAD als Anwendungsumgebung läuft. Die Modellkonstruktion ist linienbasiert, so dass auch die komplexen eiszeitlichen, z. T. glaziotektonischen Strukturen sowie das salztektonisch überprägte Gebiet im Übergangsbereich der Salzstöcke Gorleben und Rambow in der Elbeniederung modelliert werden konnten. Erster Schritt war die Definition von 32 hydrogeologischen Einheiten, in die die lithostratigraphischen Einheiten des Deckgebirges unterteilt wurden. 1697 Modellschnitte bilden ausgehend von den nun hydrogeologisch definierten Bohrungen das Gerüst für hydrogeologische Körper.

### **A.3 Hydrostratigraphische Gliederung**

Abb. A. 3.1 zeigt die 32 hydrogeologischen Einheiten des 3D-Modells, in die sich das Deckgebirge im Bereich des Salzstocks Gorleben unterteilen lässt, basierend auf der geologischen Gliederung von /ZIR 03/. Angegliedert ist eine dreistufige Klassifikation der hydraulischen Durchlässigkeit, die eine grobe Einteilung der Einheiten in Grundwasserleiter ( $k_f > 10^{-5}$  m/s) und Geringleiter ( $k_f = 10^{-5} - 10^{-7}$  m/s bzw.  $k_f < 10^{-7}$  m/s) wie-

dergibt. Einen räumlichen Bezug vermittelt die 3D-Darstellung in Abb. A. 3.2 mit dem Salzstock im unteren Bereich und den tertiärzeitlichen Einheiten teils auf gleichem Tieffenniveau wie den älteren quartärzeitlichen Einheiten, die in Rinnen abgelagert wurden (elsterzeitlich), wogegen die jüngeren quartärzeitlichen Einheiten die Rinnen nach oben hin auffüllen (überwiegend saalezeitlich) und darüber im gesamten Gebiet verbreitet sind (überwiegend weichselzeitlich und holozän).

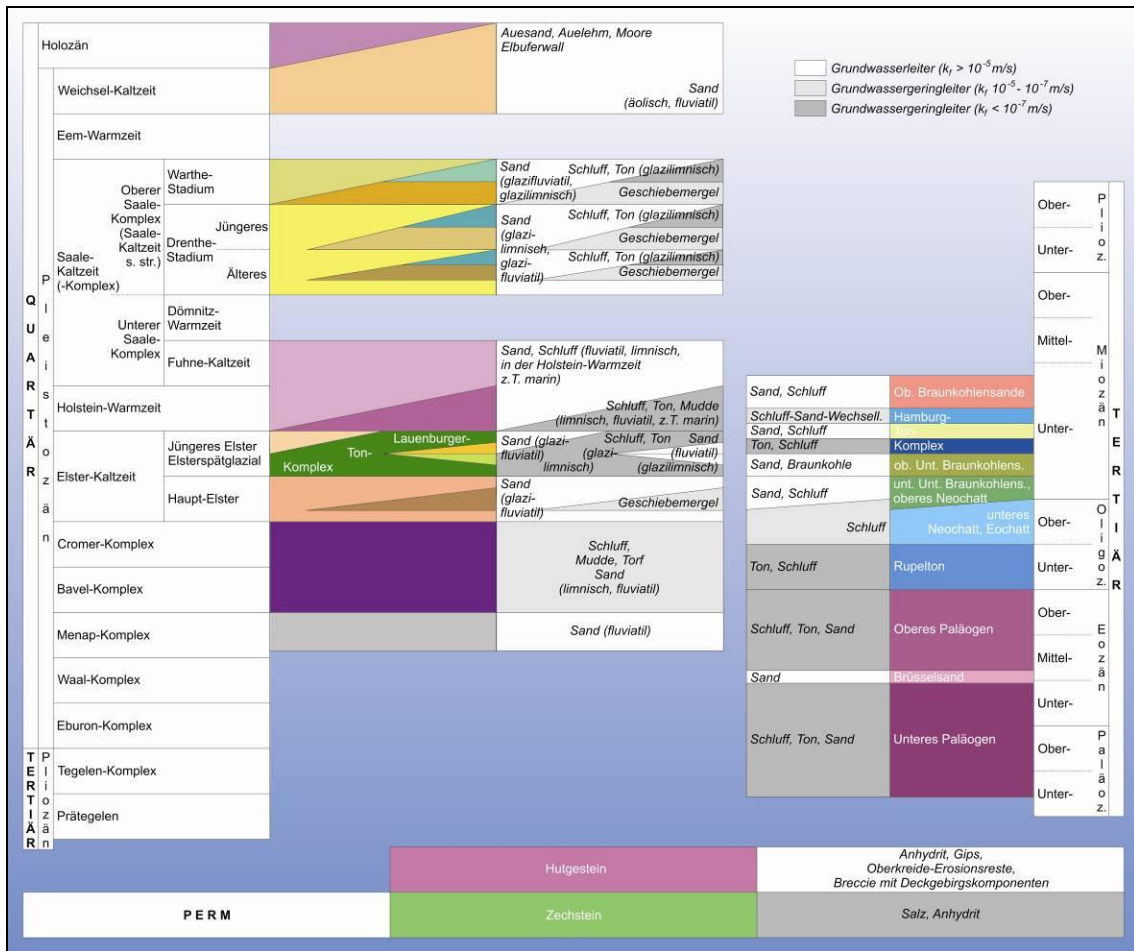
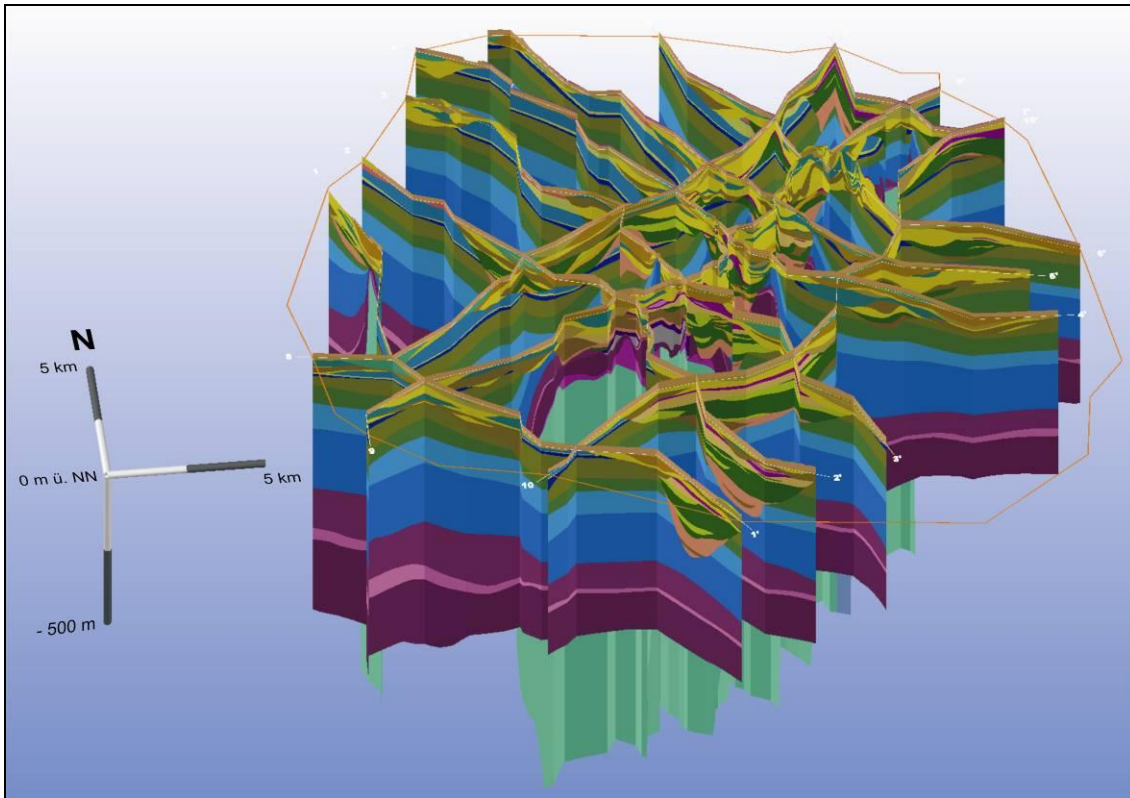


Abb. A. 3.1 Hydrogeologische Gliederung des Deckgebirges von Gorleben /WIL 09/



**Abb. A. 3.2** Hydrogeologisches 3D-Strukturmodell, aufgebaut aus zehn Schnitten (Modellumrandung und Schnittspuren auf 0 m ü. NN, Farben der hydrogeologischen Einheiten wie in Abb. A. 3.1, Überhöhung 12,5x, /WIL 09/)

### **A.3.1 Salzstock, Paläozän bis Unteroligozän und Basis des oberflächennahen Grundwassersystems**

Der Salzstock besteht überwiegend aus permzeitlichem Salz und Anhydrit. Seine Untersuchung sowie die Schichtenfolge und Struktur werden in /BOR 08/ zusammenfassend beschrieben. Der Salzstock wird überlagert vom Hutgestein, einer heterogenen Einheit, die durch Salzlösung im Scheitelbereich des Salzstocks gebildet wurde. Sie kann als Breccie mit Anhydrit, Gips und Deckgebirgskomponenten beschrieben werden. Reste von Oberkreide werden ebenfalls dem Hutgestein zugeordnet.

Der untere Teil des Tertiärs (Paläozän und Eozän) besteht aus marinen Schluffen, Tonen und untergeordnet Feinsanden, die als Schelfablagerungen, teilweise auch als ästuarine bis lagunäre Bildungen interpretiert werden. Im unteren Miozän wird diese Folge vom Brüsselsand, einem kalkhaltigen Feinsand, vereinzelt auch Grobsand bis

Feinkies, unterbrochen. Im Unteroligozän wird die Schichtenfolge vom Rupelton, der sich aus marinen Tonen und Schluffen zusammensetzt, abgeschlossen.

Im unmittelbaren Salzstockbereich bildet der Salzstock selbst die Basis des oberflächennahen Grundwassersystems. Das Hutgestein stellt einen heterogenen Grundwasserleiter dar. Paläozän und Eozän setzen sich aus einer Folge von Grundwassergeringleitern zusammen, der Brüsselsand ist wegen seiner geringen Mächtigkeit zwischen mächtigen Grundwassergeringleitern als Grundwasserleiter von untergeordneter Bedeutung. Der Rupelton kann als Grundwassergeringleiter eingestuft werden. Er stellt außerhalb des Salzstockbereichs weitflächig die Basis des Grundwassersystems im Deckgebirge dar.

### **A.3.2 Oberoligozän und Untermiozän**

Das Oberoligozän setzt sich aus Eochatt und Neochatt zusammen. Beide Einheiten wurden in einer ästuarinen Umgebung gebildet. Das Eochatt beginnt mit tonigen Sedimenten, die nach oben erst schluffig, dann zunehmend feinsandig werden. Innerhalb der Neochattschichten überwiegt der Feinsandanteil.

Im Untermiozän bewirken Deltaschüttungen eine Verflachung des Sedimentationsraums, was zur Ablagerung der marin-brackischen, aber auch lagunären bis limnisch-fluviatilen Sedimente der Unteren Braunkohlensande führte. Diese können in einen unteren, überwiegend feinsandigen und einen oberen, fein- bis mittelsandigen, untergeordnet auch grobsandigen Teil gegliedert werden. In letzteren sind nach oben bis zu drei Braunkohleflöze eingelagert.

Der darauf folgende Hamburg-Ton-Komplex setzt mit marinen, schluffig-tonig ausgebildeten Sedimenten ein. Das Ablagerungsmilieu wird nach oben hin zunehmend fluvial-terrestrisch, was durch sandige Einschaltungen dokumentiert ist. Es lassen sich von unten nach oben eine Ton/Schluff-Unterbank, eine Sandlage und eine Schluff/Sand-Wechselfolge (mit Kohleflözen) abgrenzen. In der nordwestlichen Randsenke ist lokal noch eine obere Sandfolge vorhanden. Im Bereich der südöstlichen Randsenke ist der gesamte Hamburg-Ton-Komplex nur lückenhaft vertreten.

In der nordwestlichen Randsenke kommen über dem Hamburg-Ton-Komplex noch die Feinsande, selten auch Mittel- bis Grobsande der Oberen Braunkohlensande vor.

Hydrogeologisch lässt sich der untere, überwiegend tonig-schluffige Bereich des Chatts als Grundwassergeringleiter charakterisieren. Der höhere, feinsanddominierte Teil kann mit dem unteren Teil der Unteren Braunkohlensande zu einer hydrogeologischen Einheit zusammengefasst und als Grundwasserleiter eingestuft werden. Der obere Teil der Unteren Braunkohlensande hat ebenfalls Grundwasserleitereigenschaften. Die Ton/Schluff-Unterbank des Hamburg-Ton-Komplexes stellt besonders in der nordwestlichen Randsenke einen wichtigen Grundwassergeringleiter im Grundwassersystem des Deckgebirges dar. Die darüberliegende Sandlage hat ebenso wie die nur lokal im höheren Bereich vertretene obere Sandfolge grundwasserleitende Eigenschaften, die Schluff/Sand-Wechselfolge kann insgesamt als Geringleiter eingestuft werden. Die Oberen Braunkohlensande stellen einen Grundwasserleiter dar.

### **A.3.3 Menap-, Bavel- und Cromer-Komplex**

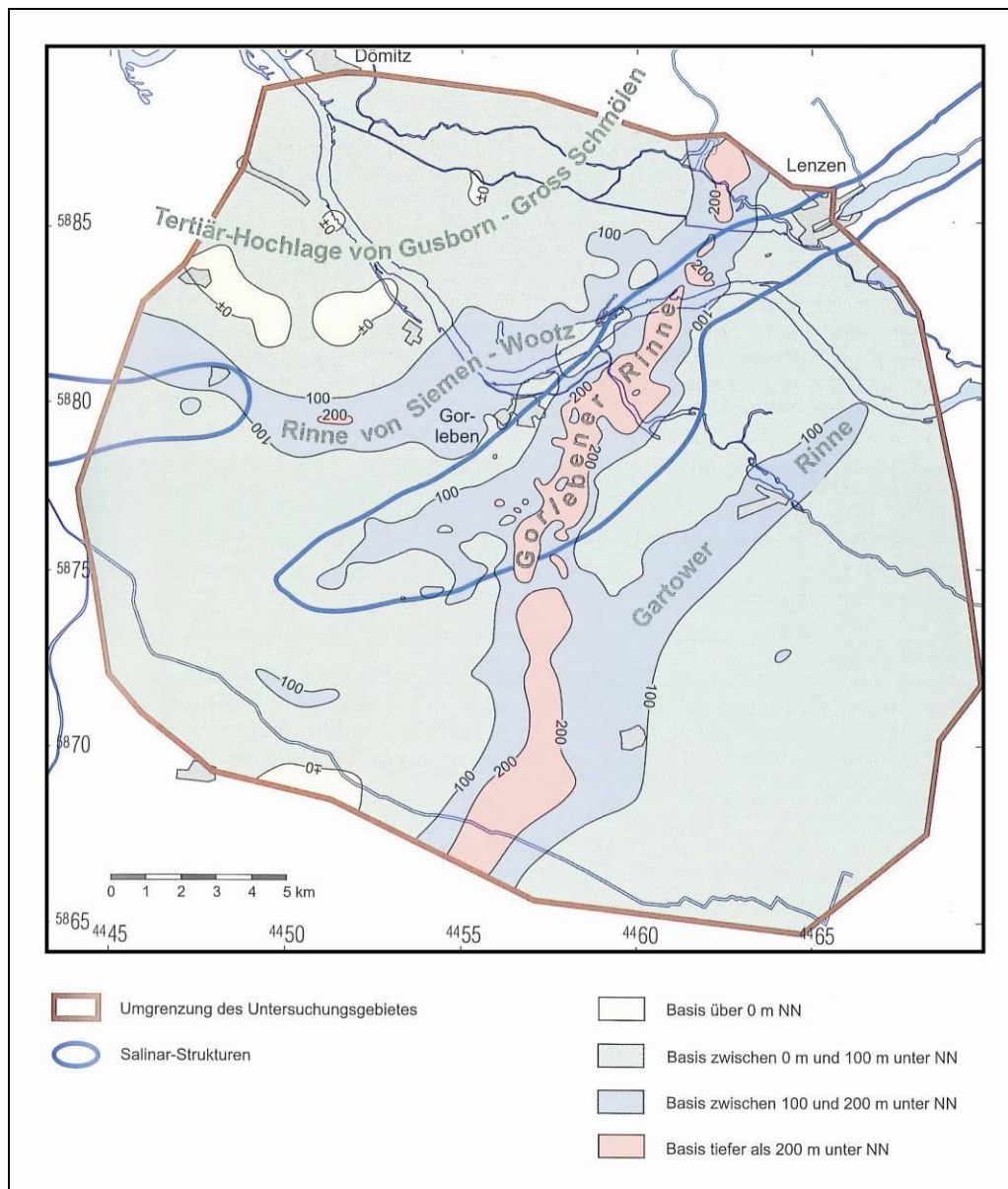
Aus der Zeit nach der Ablagerung der Oberen Braunkohlensande sind in dem Gebiet um den Salzstock Gorleben keine tertiären Sedimente vorhanden.

Die Klimaschwankungen im frühen Quartär haben sich als Wechsel von Kalt- und Warmzeiten ausgewirkt, der im Modellgebiet nur über dem südwestlichen Salzstockbereich durch fluviatile Sande aus der Menapzeit und limnische bis fluviatile Sedimente aus der Bavel- bis Cromerzeit dokumentiert ist. Letztere sind tonig-schluffig bzw. humos mit sandigen Zwischenlagen.

In hydrogeologischer Hinsicht stellen die Ablagerungen des Menap-Komplexes einen Grundwasserleiter, die des Bavel- und Cromer-Komplexes einen schichtig aufgebauten Grundwassergeringleiter dar.

### **A.3.4 Quartärbasis und Elster**

Das Relief der Quartärbasis ist geprägt von tiefen Rinnen, die in das unterlagernde Tertiär erodiert wurden (Abb. A. 3.3). Hervorragendes Strukturelement im Untersuchungsgebiet ist die Gorlebener Rinne, in der über dem zentralen Salzstockbereich die tertiären Schichten bis in das Hutgestein hinein ausgeräumt wurden.



**Abb. A. 3.3** Quartärbasis /KÖT 07/

Die elsterzeitlichen Rinnenfüllungen bestehen im unteren Teil aus glazifluvialen Sanden, wobei sich nur teilweise Vorschüttssande (unter den Geschiebemergeln) und Schmelzwassersande (über den Geschiebemergeln) unterscheiden lassen. Die Sande setzen sich unten überwiegend aus kiesigen Mittel- bis Grobsanden zusammen, nach oben nimmt die Korngröße über Mittelsande bis hin zu Feinsanden ab. Die Geschiebemergel werden als Grundmoränenüberreste betrachtet und bestehen aus einem Korngrößengemisch von der Ton- bis zur Steinfraktion. Sie sind in den Rinnen als Erosionsreste erhalten. Nach oben gehen die Sande in eine Folge aus Tonen und Schluffen mit unregelmäßig eingelagerten sandigen Partien über, dem Lauenburger-Ton-Komplex. Über diesem lokal auftretende Nachschüttssande sind Schmelz-

wasserablagerungen, die sich aus Fein- bis Mittelsanden, z. T. auch Grobsanden zusammensetzen. Sie sind besonders über dem zentralen und südwestlichen Salzstockbereich sowie in den Rinnen südlich und westlich des Salzstocks zu finden, wo sie in Tieflagen besonders mächtig werden können.

Die Vorschütt- und Schmelzwassersande der Elster-Kaltzeit sind gute Grundwasserleiter, die lokal von den Geschiebemergeln als Grundwassergeringleiter unterbrochen werden. Sie werden großflächig vom Lauenburger-Ton-Komplex abgedeckt, der einen wichtigen Grundwassergeringleiter in den Rinnen darstellt. Die Nachschüttsande treten nur lokal auf, daher sind sie für sich betrachtet als Grundwasserleiter unbedeutend.

### **A.3.5 Holstein und Unterer Saale-Komplex**

Die Verbreitung von Sedimenten der Holstein-Warmzeit beschränkt sich weitgehend auf die Gorlebener Rinne. Es handelt sich überwiegend um limnische Schluffe, die z. T. feinsandig sein können und humose Lagen aufweisen. Innerhalb der Holstein-Zeit fand ein letzter mariner Vorstoß statt, in dem brackische bis marine Fein- bis Mittelsande und Schluffe abgelagert wurden.

In der Fuhne-Kaltzeit (Unterer Saale-Komplex) findet ein Übergang von überwiegend limnischen Schluffen zu überwiegend fluviatilen Fein- bis Mittelsanden statt, in die Ton- bis Schlufflagen eingeschaltet sein können. Die Verbreitung beschränkt sich auf Bereiche, in denen Holsteinsedimente vorkommen.

In hydrogeologischer Hinsicht bilden die feinkörnigen Holsteinablagerungen einen Grundwassergeringleiter, die sandigen Partien und die Fuhnesedimente Grundwasserleiter. Die Verbreitung ist nur gering.

### **A.3.6 Oberer Saale-Komplex**

Die saalezeitlichen Ablagerungen bilden ein Mosaik aus vertikal und lateral kleinräumig wechselnden Sedimentkörpern. Dieser Wechsel ist sowohl faziell als auch erosiv bedingt. Während der Saale-Kaltzeit finden drei Eisvorstöße statt (Drenthe 1, Drenthe 2 und Warthe).

Die drenthezeitlichen Sande setzen sich aus fein- bis mittelsandigen, partienweise grobsandigen bis kiesigen Vorschüttsanden und fein- bis mittelsandigen, auch grobsandigen Schmelzwassersanden, die glazilimnische Schluffbänke enthalten können, zusammen. Vorschüttsande können nur lokal bei Überlagerung durch Geschiebemergel als solche abgegrenzt werden. Die drenthezeitlichen Geschiebemergel weisen ein Korngrößenspektrum von Ton bis Steinen auf, wobei Sand dominiert. Es treten Schollen und Linsen von Schmelzwassersanden sowie von älteren Sedimenten aus dem Lauenburger-Ton-Komplex oder dem Hamburg-Ton-Komplex auf. In den Drenthe 2-Geschiebemergeln ist eine Häufung von Holstein-Schollen zu beobachten. Glazilimnische Sedimente der Drenthezeit setzen sich aus feinsandigen Schluffen und schluffigen Tonen zusammen.

Die warthezeitlichen Ablagerungen sind insgesamt geringmächtiger. Die Schmelzwassersande sind als Mittel-, selten als Grobsande ausgebildet. Die Geschiebemergel sind tonreicher als die entsprechenden Drentheablagerungen. In ihnen enthaltene Schollen bestehen überwiegend aus saalezeitlichen Schmelzwassersanden oder Beckenschluffen, Schollen mit älteren Sedimenten sind dagegen selten. Glazilimnische Sedimente sind in der Warthezeit eher von untergeordneter Bedeutung. Sie setzen sich aus Schluffen und z. T. Feinsanden zusammen und bilden eine Vielzahl kleiner Areale.

In hydrogeologischer Hinsicht bilden die glazilimnischen Beckensedimente und die Geschiebemergel Grundwassergeringleiter, die Sande dagegen sind gute Grundwasserleiter.

Sedimente aus der Eem-Warmzeit wurden nur in zwei Bohrungen angetroffen. Deswegen wurden sie in der hydrostratigraphischen Gliederung nicht als eigenständige Einheit berücksichtigt.

### **A.3.7 Weichsel und Holozän**

Im Weichsel-Frühglazial wurden fluviatile Mittel- bis Grobsande als ältere Niederterrasse abgelagert. Die jüngere Niederterrasse mit fluviatilen/glazifluviatilen Sanden, die im oberen Teil überwiegend als Fein- bis Mittelsande ausgebildet sind, stammt aus dem Weichsel-Hochglazial. Neben Lignitlagen treten Lagen von Fein- bis Mittelkiesen auf, deren Häufigkeit nach oben hin abnimmt. Zwischen älterer und jüngerer Niederterrasse können geringmächtige Schluffe vorkommen.



Im Weichsel-Spätglazial und im Holozän wurden aus Fein- bis Mittelsanden bestehende Flugsande vor allem im Bereich der Gartower Tannen abgelagert.

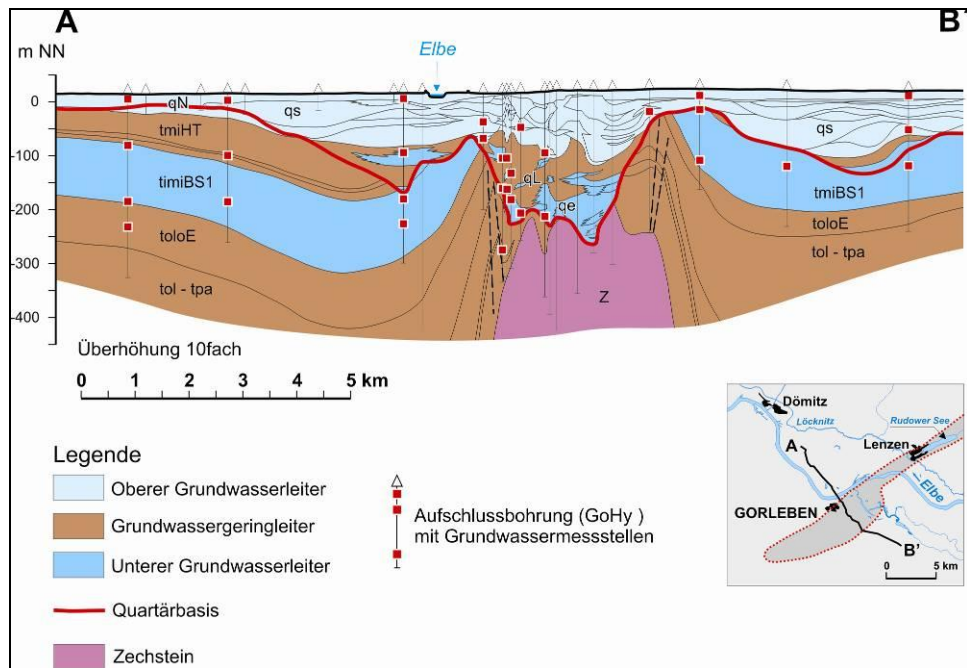
Auesande setzen sich aus Fein- bis Mittelsanden, untergeordnet auch Grobsanden bis Feinkiesen zusammen. Nach oben findet oft eine Kornverfeinerung statt. Es treten Ton- und Schluffbänder sowie Lagen von limnischen Sedimenten (Mudde, Torf) auf. Überlagert werden die Auesande überwiegend von Auelehm, der häufig in zwei Lagen mit einer Zwischenschicht Auesand ausgebildet ist. Beim Auelehm handelt es sich um ein humoses, toniges, stark schluffiges Hochflutsediment mit Lagen mit höherem Feinsandanteil.

Uferwälle im Bereich des Elbetals bestehen aus Auelehm über Sanden. Im ganzen Modellgebiet sind untergeordnet Abschlämmassen zu finden, die sich aus nach oben zunehmend humosen feinsandigen Mittelsanden zusammensetzen.

Aufgrund der Geringmächtigkeit und der lückenhaften Verbreitung des Auelehms werden die weichselzeitlichen und holozänen Ablagerungen insgesamt als Grundwasserleiter betrachtet.

#### **A.4 Hydrogeologischer Bau im Untersuchungsgebiet**

Im Untersuchungsgebiet Gorleben ergibt sich eine Grobgliederung in einen oberen und einen unteren Grundwasserleiter. Abb. A. 4.1 zeigt die räumliche Verteilung beider Grundwasserleiter entlang eines Vertikalschnittes (B – B', Anlage 1 in /KLI 07/), der den Salzstock Gorleben in Richtung NW-SE quert. Die weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen bestehen aus einer im gesamten Untersuchungsgebiet verbreiteten Folge von gut durchlässigen Sanden, sowie gering durchlässigen Beckenschluffen und Geschiebemergeln. Es herrscht ein kleinräumiger Wechsel dieser Sedimenttypen vor, die trotz hoher Aufschlussdichte keine eindeutige Abgrenzung ermöglichen. Da sandige Ablagerungen mengenmäßig überwiegen, können die weichsel- und saalezeitlichen Sedimente als ein einheitlicher, lateral wie vertikal stark gegliederter inhomogener oberer Grundwasserleiter aufgefasst werden.



**Abb. A. 4.1** Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben /KLI 07/

Im Bereich der Randsenken bilden die Unteren Braunkohlensande zusammen mit dem Eochatt einen, im Vergleich zum oberen Wasserleiter wesentlich homogeneren, unteren Grundwasserleiter. Dieser wird nach oben hin durch den gering wasserleitenden Hamburg-Ton abgedeckt. In den Rinnenstrukturen, insbesondere in der Gorlebener Rinne, in denen die Unteren Braunkohlensande und der Hamburg-Ton erodiert wurden, nehmen elsterzeitliche Rinnensande und der Lauenburger-Ton-Komplex die Position des unteren Grundwasserleiters und des überlagernden Geringleiters ein /KLI 07/.

## A.5 Literaturverzeichnis

/BAH 02/ Baharian-Shiraz, A., Zwirner, R., Projekt Gorleben. Endgültige Schichtenverzeichnisse der Bohrungen im Untersuchungsgebiet Gorleben, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover), 2002, 24 S., unveröffentlicht.

- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M., Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars, Geol. Jb. (Hannover), C 73 (2008) 5-211.
- /KLI 04/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R. R., Schelkes, K., Schildknecht, F., Projekt Gorleben. Standortbeschreibung. Teil II Deckgebirge Hydrogeologie, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover), 2004, 283 S., unveröffentlicht.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A., Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben, Geol. Jb. (Hannover), C 71 (2007) 5-147.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R., Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben, Geol. Jb. (Hannover), C 72 (2007) 5-201.
- /LUD 02/ Ludwig, R. R., Hydrogeologische Untersuchungen Gorleben. Hydrogeologische Grundlagen für Modellrechnungen – Kenntnisstand 2000 –, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover), 2002, 159 S., unveröffentlicht.
- /WIL 09/ Willscher, B., Ludwig, R. R., Hydrogeologie des Quartärs und Tertiärs im Deckgebirge des Salzstocks von Gorleben, hydrogeologische 3D-Strukturmodellierung, GeoDresden (Dresden), 2009, Poster.
- /ZIR 03/ Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiß, W., Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- und Nebengebirges, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hannover), 2003, 375 S., unveröffentlicht.



## **B Süß-/Salzwasserverteilung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben**

H. Klinge<sup>1</sup>, R.-R. Ludwig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### **B.1 Einleitung**

Die tertiären und quartären Deckschichten des Salzstocks Gorleben bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und -geringleitern. Der regional verbreitete Rupelton (toloE) bildet dabei die Basis des oberflächennahen Fließsystems. Die darüber folgenden Ablagerungen des Tertiärs und Quartärs lassen sich hydrogeologisch in einen durch tertiäre (tmiBS1) und elsterzeitlichen Sande und Kiese (qe) gebildeten unteren Grundwasserleiter und einen oberen Wasserleiter in den saale- und weichselzeitlichen Ablagerungen (qN, qs) gliedern. Prägendes Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben ist die elsterzeitlich entstandene Gorlebener Rinne, in deren zentralen Bereich über dem Salzstock gut durchlässige Rinnensande unmittelbar dem Hutgestein, lokal auch Zechsteinsalzen (z) auflagern. Die Elster-Rinnensande sind durch den gering durchlässigen Lauenburger-Ton-Komplex (qL) vom oberen Grundwasserleiter getrennt, im Norden und Süden des Salzstocks stehen sie jedoch mit dem überregional verbreiteten bedeutenden Grundwasserleiter der tertiären Braunkohlensande (tmiBS1) hydraulisch in Kontakt (Abb. A. 4.1).

Generell besteht im Deckgebirge eine für das Norddeutsche Flachland charakteristische Gliederung in einen oberen Süßwasserkörper unterschiedlicher Mächtigkeit und durchweg geringen Gesamtsalzgehalten, der von einem Salzwasserkörper mit salinen Grundwässern unterlagert wird. Als Süßwässer werden in diesem Zusammenhang alle Wässer mit einem Gesamtsalzgehalt von weniger als 1 g/l gezeichnet.

Bereits in einer frühen Phase der Erkundung hat sich gezeigt, dass Grundwasser in Teilbereichen über dem Salzstock in direktem Kontakt mit dem Zechsteinsalinar steht. Der unmittelbare Kontakt von Zechsteinsalzen und quartären Sedimenten im Zentrum der Gorlebener Rinne führt zu einer starken Aufsalzung der Grundwässer. Die Betrachtung möglicher Ausbreitungspfade vom Top des Salzstocks ist daher eng mit der Frage der Salzwasserbewegung innerhalb des Deckgebirges verknüpft. Die Erkundung des

Süß- und Salzwassersystems bildete daher einen wesentlichen Schwerpunkt des Untersuchungsprogrammes. Unter anderem wurden hierzu systematisch Grundwassermessstellen innerhalb salzwasserführender Sedimente errichtet und geophysikalische Bohrlochmessungen in Hinblick auf die vertikale Salinitätsverteilung ausgewertet. Die vorliegende Arbeit stellt die räumliche Verteilung der Süß- und Salzwasserkörper innerhalb des känozoischen Grundwasserleitersystems dar.

## B.2 Vorgehensweise bei der Datenauswertung

Die wesentlichen Datengrundlagen zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Gesamtsalzgehalte im Grundwasser sind die chemischen Analysen der Grundwasserproben aus 404 Messstellen sowie die Auswertung der geophysikalischen Vermessungen der insgesamt 106 Hauptbohrungen. Als deren Ergebnis liegen für das Gebiet südlich der Elbe aus den Bohrungen im Bereich der Gorlebener Rinne sowie aus allen Bohrungen nördlich der Elbe kontinuierliche vertikale Profile der Porenwasserleitfähigkeiten und -dichten vor. Die Salinitäts- und Dichteprofile wurden durch eine kombinierte Auswertung von Bohrloch-Logs der Formationsdichte, des spezifischen elektrischen Widerstands und der Intensität der natürlichen Gammastrahlung berechnet /FIE 91/.

In den im Rahmen des nachfolgenden Kapitels diskutierten Vertikalschnitten der Süß-/Salzwasserverteilung wird eine Abstufung der Wässer in folgende 6 Salinitätsklassen vorgenommen:

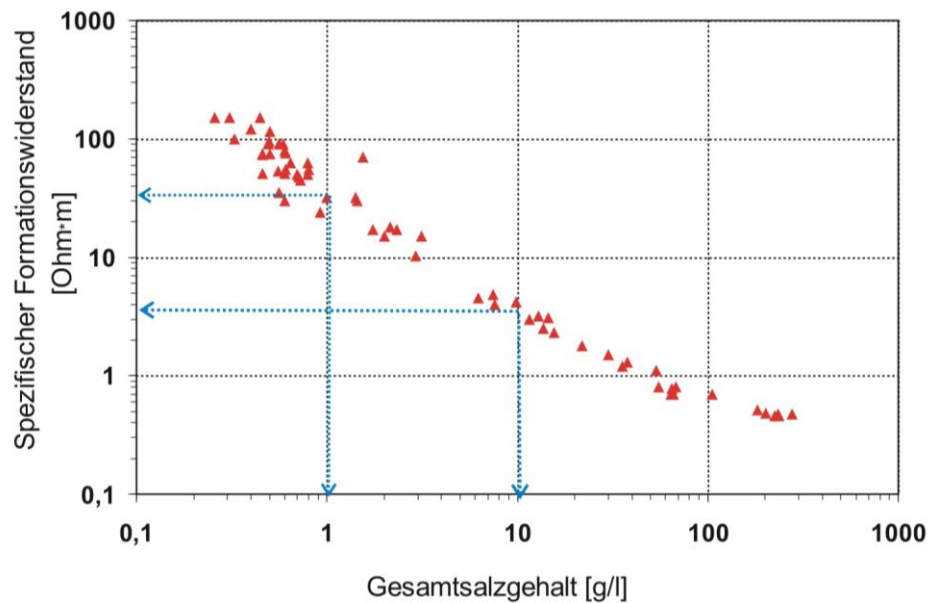
0 – 1	g/l TDS <sup>2</sup>
1 – 10	g/l TDS
10 – 50	g/l TDS
50 – 100	g/l TDS
100 – 200	g/l TDS
> 200	g/l TDS

Das Auswerteverfahren der geophysikalischen Bohrlochvermessungen ist in erster Linie für salzwasserführende Sedimente mit einem hohen Leitfähigkeitskontrast zwi-

---

<sup>2</sup> TDS (Total Dissolved Solids) = Gesamtsalzgehalt

schen den Porenwässern und der Gesteinsmatrix geeignet. Bei niedrig salinen Grundwässern oder Süßwässern ist dieses dagegen aufgrund der geringen Leitfähigkeitsunterschiede zwischen Matrix und Porenwässern mit einem höheren Fehler behaftet. Aus diesem Grunde wurden die Tiefenlagen der Süß-/Salzwassergrenze von 1 g/l sowie der Salzgehaltsgrenze von 10 g/l direkt aus den Widerstands-Logs auf der Basis einer empirisch ermittelten Korrelation zwischen den Formationswiderständen im Filterbereich der Messstellen und den Gesamtsalzgehalten der Grundwässer abgeleitet (Abb. B. 2.1).



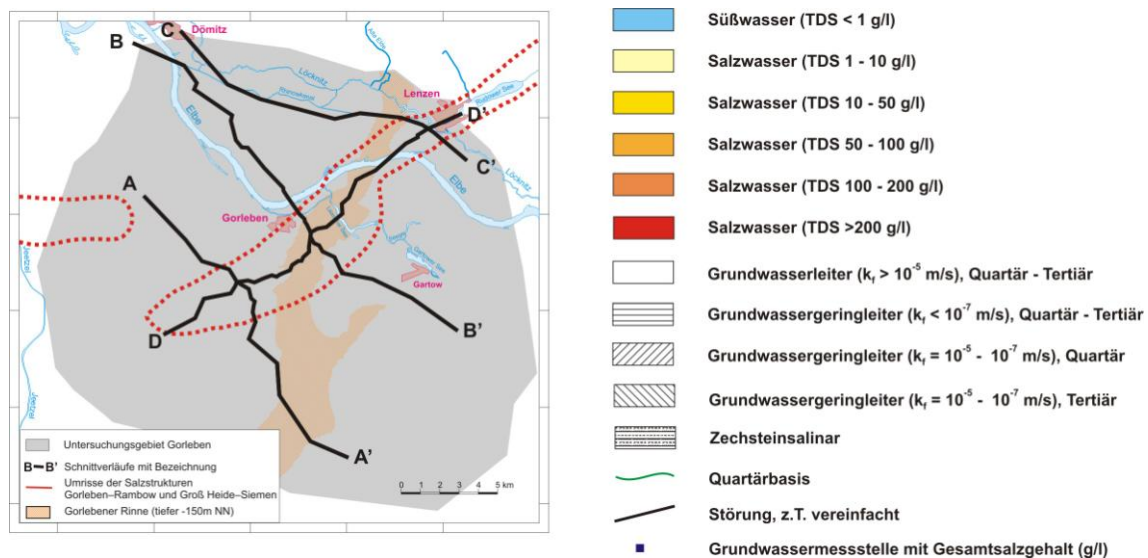
**Abb. B. 2.1** Korrelation der Gesamtsalzgehalte der Wasserproben aus Messstellen mit den Formationswiderständen aus Induction-Logs (aus /KLI 07/)

Prinzipiell ist dieses empirische Verfahren – im Gegensatz zu der Auswertung der geophysikalischen Bohrlochvermessung – aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit von Tonen nur auf sandige Sedimente anwendbar und lässt daher im Prinzip keine Aussagen über die vertikale Salinitätsverteilung in homogenen tonigen Sedimenten zu. Da im Untersuchungsgebiet insbesondere der Hamburg-Ton, aber auch der Lauenburger-Ton-Komplex zahlreiche geringmächtige sandige Zwischenlagen enthalten, lassen sich aus der Verteilung der Salzgehalte der Wässer in diesen Zwischenlagen dennoch Aussagen über die vertikale Salinitätsverteilung innerhalb der gesamten Formation treffen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Salinität der Porenwässer in den Sandlagen nicht generell von der in den umgebenden Tonen abweicht. Dass diese Annahme zu-

trifft, belegen spezielle Untersuchungen an Porenwässern in diesen Sedimenten durch /RÜB 00/.

### B.3 Beschreibung der Süß-/Salzwasserverteilung

Die nachfolgende Beschreibung der Süß-/Salzwasserverteilung erfolgt anhand von insgesamt vier hydrochemischen Vertikalschnitten (Abb. B. 3.2 und Abb. B. 3.3) sowie anhand thematischer Karten- und Profildarstellungen in den Abbildungen B. 3.5 und B. 3.6. In den Profilschnitten ist zusätzlich zur Süß-/Salzwasserverteilung auch die räumliche Verbreitung der Grundwasserleiter und -geringleiter dargestellt. Darüber hinaus werden an den Filterlagen der Messstellen jeweils die Gesamtsalzgehalte (TDS in g/l) des Grundwassers sowie dessen hydrochemische Typisierung angegeben.



**Abb. B. 3.1** Lageplan und Legende zu den hydrochemischen Vertikalschnitten (verändert nach /KLI 07/)

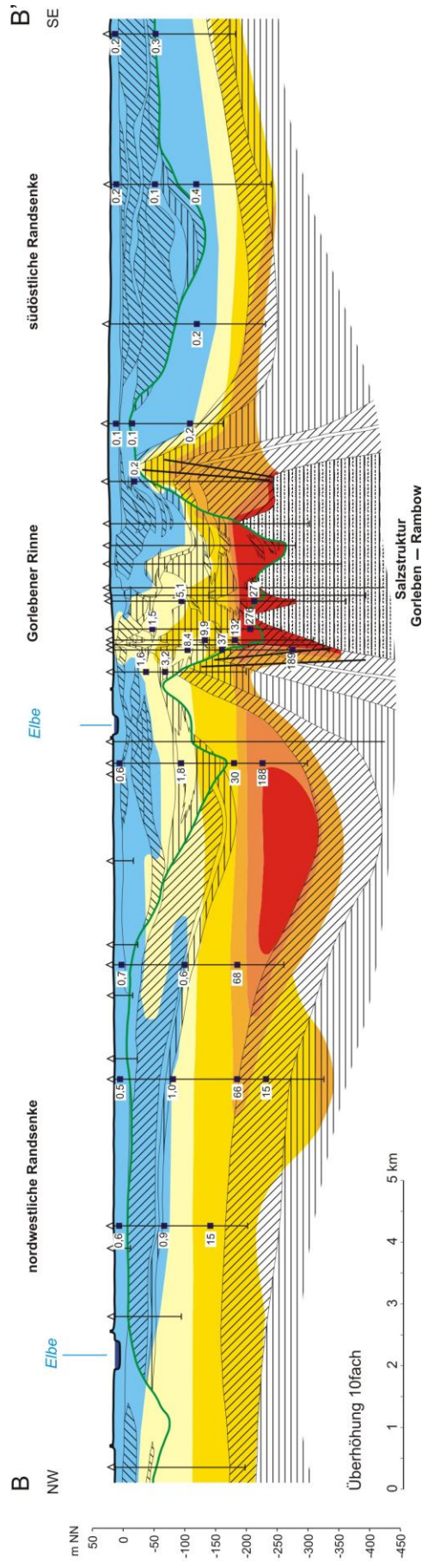
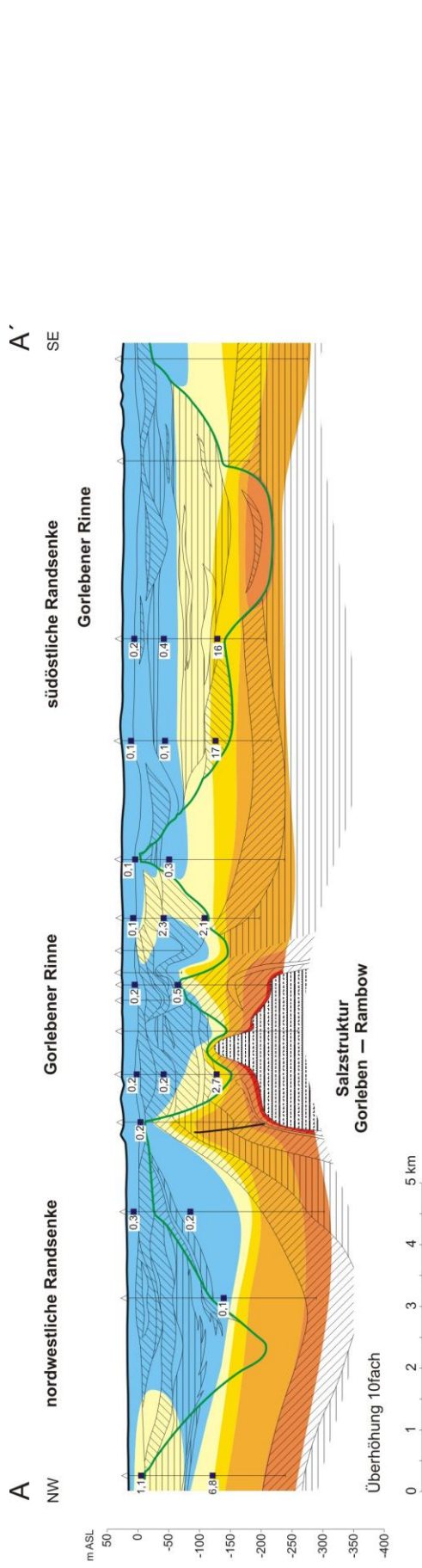
Die Vertikalschnitte A – A' und B – B' (Abb. B. 3.2), die den Salzstock Gorleben und seine Randsenken in NW-SE-Richtung queren, zeigen die für das Gebiet charakteristische generelle vertikale Zweigliederung in einen oberen **Süßwasserkörper** mit Salzgehalten von deutlich unter 1 g/l und einen unteren **Salzwasserkörper** mit Salzgehalten von mehr als 10 g/l. Kennzeichnend für die **Randsenken** im Gebiet südlich der



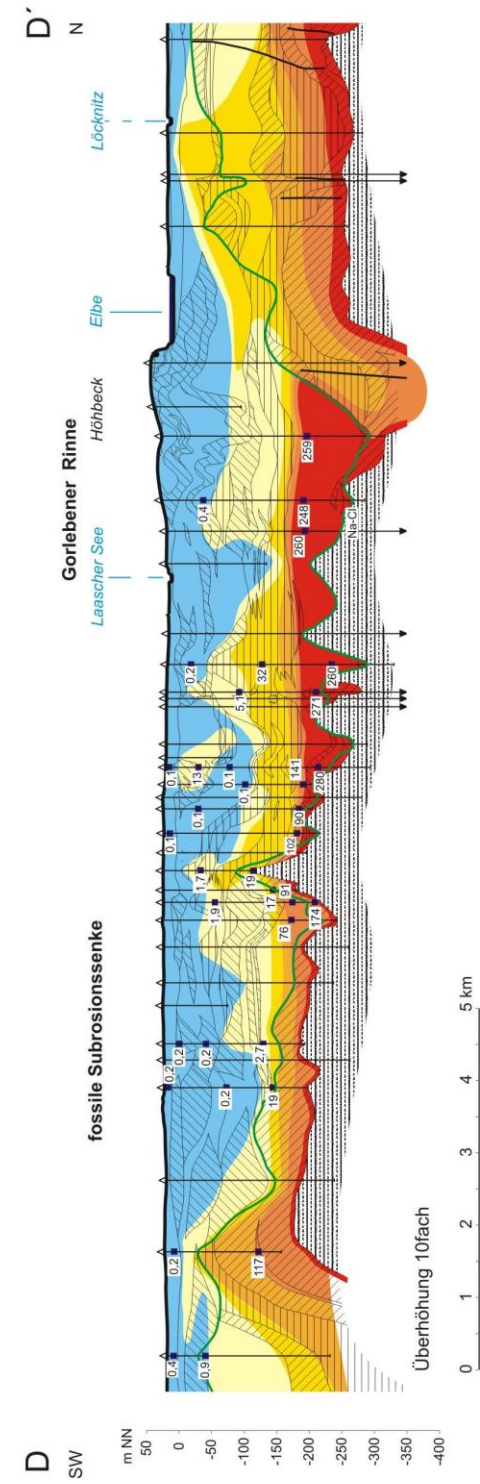
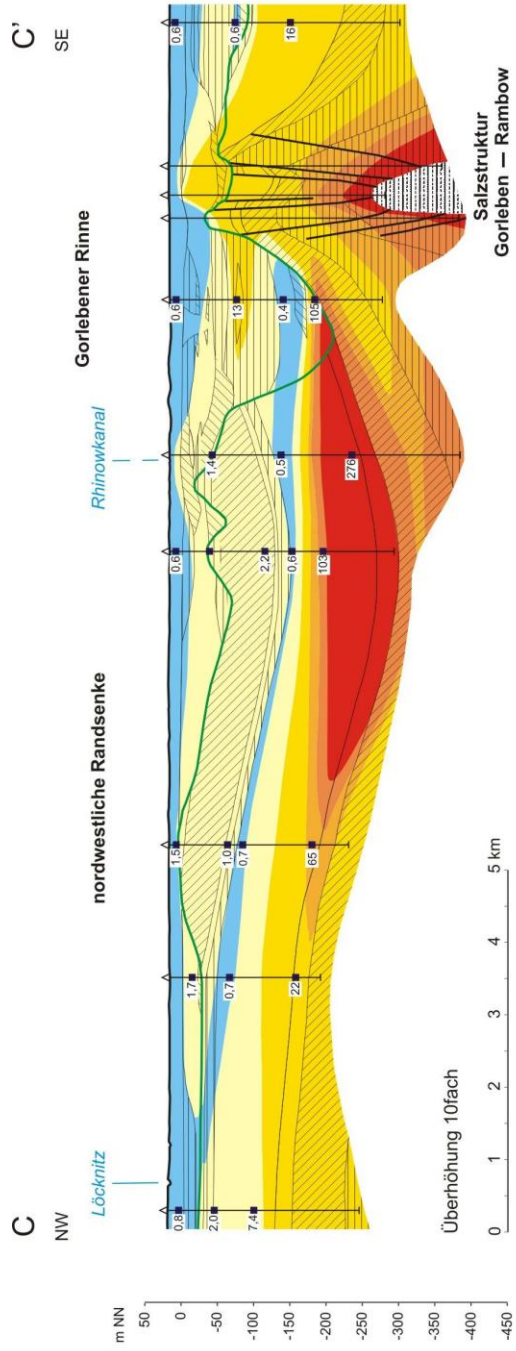
Elbe sind die verbreitet großen Süßwassermächtigkeiten von mehr als 100 m sowie die durchwegs sehr geringen Gesamtsalzgehalte, die zur Tiefe nicht oder nur unwesentlich ansteigen. Die Süßwässer sind von den unterlagernden Salzwässern durch eine wenige Zehnermeter mächtige Übergangsschicht getrennt, innerhalb derer die Salzgehalte nach unten näherungsweise exponentiell auf Werte von über 10 g/l TDS ansteigen /KLI 94/. Die Süß-/Salzwassergrenze verläuft in den Randsenken überwiegend innerhalb der Unteren Braunkohlesande.

In der Elbe-Löcknitz-Niederung im Bereich der nordwestlichen Randsenke ist die vertikale Gliederung in einen Süß- und einen Salzwasserkörper aufgrund der ausgeprägten hydrogeologischen Stockwerksgliederung stärker differenziert (Vertikalschnitt C – C'). Der obere Süßwasserkörper hat hier eine sehr geringe Mächtigkeit. Die Basis des Süßwasserkörpers befindet sich hier durchweg innerhalb des oberen Grundwasserleiters. Im Liegenden des Süßwasserkörpers folgen vergleichsweise niedrig saline Salzwässer von deutlich unter 10 g/l Gesamtsalzgehalt. Die Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex enthalten im Zentrum der Niederung ebenfalls salzhaltige Porenwässer mit entsprechend relativ niedrigen Gesamtsalzgehalten. Unmittelbar unterhalb der Basis der beiden Grundwassergeringleiter folgt nochmals ein geringmächtiger Süßwasserkörper mit sehr geringen Salzgehalten von 0,4 g/l bis 0,7 g/l. Dieser untere Süßwasserkörper erreicht am Nordrand des Untersuchungsgebietes mit etwa 40 m bis 50 m seine größte Mächtigkeit. Nach Südwesten hin nimmt seine Mächtigkeit bis in den Übergangsbereich zum Salzwasser kontinuierlich auf Null ab. Abbildung B. 3.4 zeigt die Verbreitung und die Gesamtsalzgehalte dieses Süßwasserkörpers. Seine südliche Ausdehnung reicht im Westen bis an die Elbe. Im Osten wird er durch die Salzstruktur Gorleben–Rambow begrenzt, während er im Zentrum der Niederung nur bis unmittelbar südlich des Rhinowkanals reicht.

Die Verteilung der Gesamtsalzgehalte in diesem unteren Süßwasserkörper zeigt eine generelle Zunahme der Mineralisation in Richtung Südwesten. Dabei reicht die Zone sehr niedriger Salzgehalte von weniger als 0,5 g/l in der Gorlebener Rinne bis unmittelbar an dessen südliche Verbreitungsgrenze, während der Salzgehalt im Westen zur Elbe hin kontinuierlich bis auf nahezu 0,9 g/l ansteigt. Insgesamt deuten Ausbildung und Ausdehnung dieses Süßwasserkörpers ebenso wie die Zonierung der Salzgehalte auf einen Einstrom von Süßwässern aus den nordöstlich angrenzenden Gebieten hin /KLI 01/.

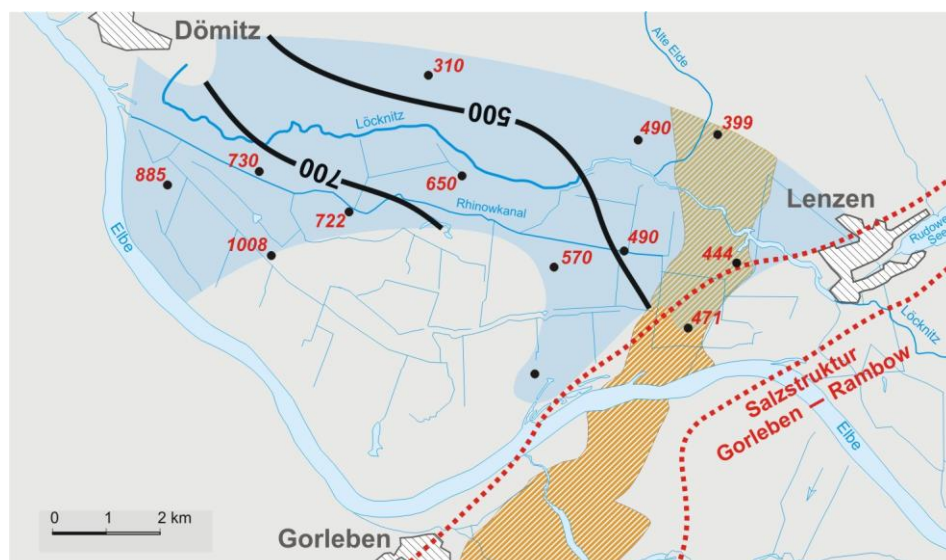


**Abb. B. 3.2** Hydrochemische Vertikalschnitte A-A' und B-B' (Legende s. Abb. B. 3.1) (verändert nach /KLI 07/)



**Abb. B. 3.3** Hydrochemische Vertikalschnitte C-C' und D-D' (Legende s. Abb. B. 3.1) (verändert nach /KLI 07/)

Im Liegenden des Süßwasserkörpers folgen unter einer geringmächtigen Übergangsschicht bis zur Basis des unteren Grundwasserleiters hochsaline Wässer mit Salzgehalten von mehr als 200 g/l bis etwa 280 g/l. Die Verbreitung dieses Salzwasserkörpers mit über 200 g/l Gesamtsalzgehalt beschränkt sich auf den zentralen Bereich der nordwestlichen Randsenke. Dabei ist seine Oberfläche in etwa horizontal ausgebildet, während seine Unterfläche an der Basis des unteren Grundwasserleiters verläuft und die muldenförmige Struktur der Randsenke nachzeichnet. Die Porenwässer innerhalb der Grundwasser-Geringleiter im Liegenden weisen im Vergleich zu den darüber angebotenen Solen dagegen deutlich niedrigere Salzgehalte auf /KLI 07/. Eine entsprechende vertikale Verteilung der Porenwassersalinitäten – nämlich ein Anstieg der Salzgehalte zur Tiefe innerhalb der Unteren Braunkohlensande mit einem Maximum etwa an der Basis des Wasserleiters und eine gegenläufige Tendenz in den unterlagernden Geringleitern – zeigt sich in allen Bohrungen im Zentrum der Randsenke.



Legende:

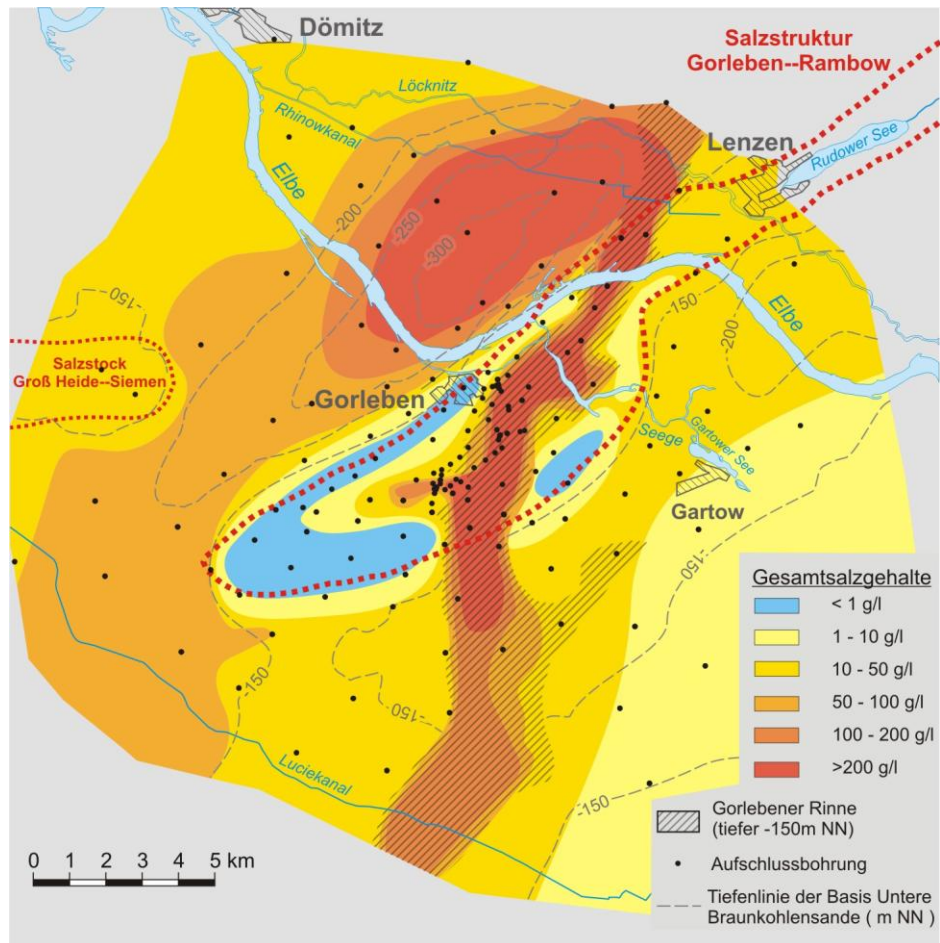
- |  |  |
|--|--|
|  Süßwasser (TDS < 1g/l)             |  Gesamtsalzgehalt [mg/l]      |
|  Gorlebener Rinne (tiefer -150m NN) |  Linie gleichen Salzgehaltes |

**Abb. B. 3.4** Verbreitung und Gesamtsalzgehalte des unteren Süßwasserkörpers in der Elbe-Löcknitz-Niederung (aus /KLI 07/)

Über dem **Salzstock Gorleben** unterscheiden sich die räumliche Verteilung der Gesamtsalzgehalte und die Lage der Süß-/Salzwassergrenze im südwestlichen Teil und im nordöstlichen Teil in prinzipieller Weise: Im Südwesten des Salzstocks ist das Zechsteinsalinar



durchgängig von gering durchlässigen alttertiären Tonen überdeckt. Die Süß-/Salzwassergrenze liegt hier in Tiefen um -100 m NN einer mit den Randsenken vergleichbaren Tiefenlage, ebenso ist die Mineralisation der Salzwässer an der Basis des unteren Grundwasserleiters mit Werten um 20 g/l TDS vergleichsweise niedrig; in den randlichen strukturell hoch liegenden Bereichen ist der Grundwasserleiter bis zur Basis süßwassererfüllt (Vertikalschnitt A – A').



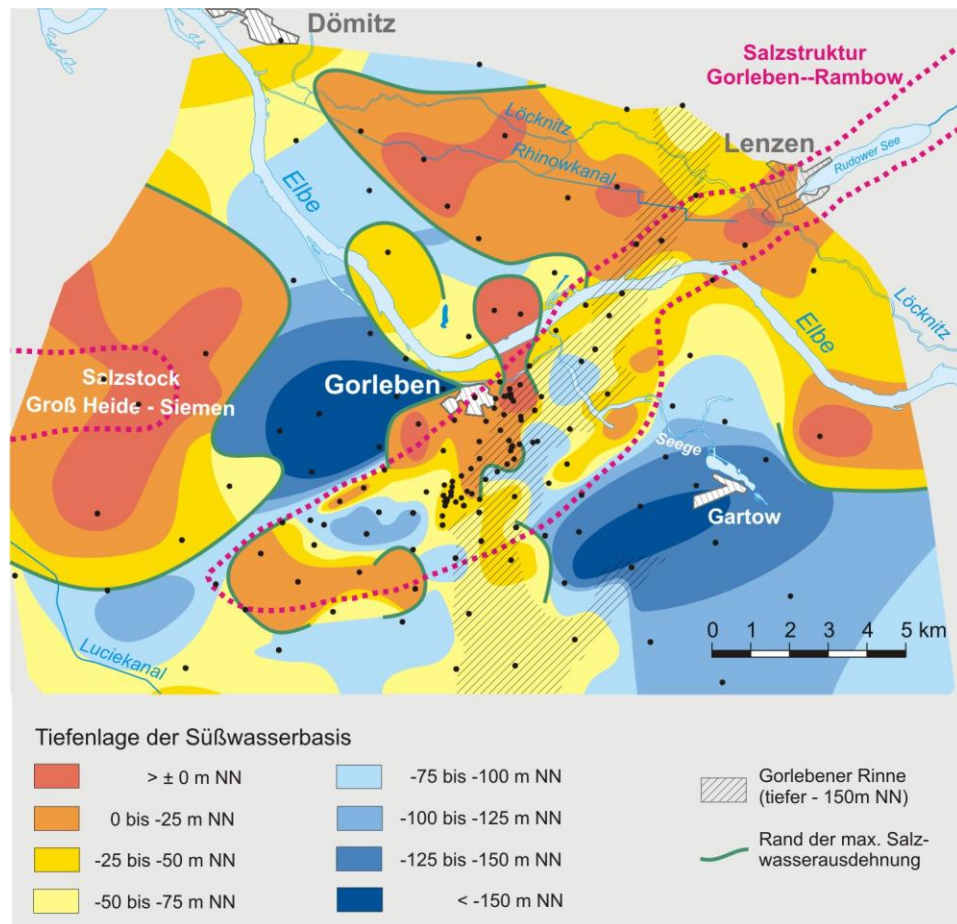
**Abb. B. 3.5** Gesamtsalzgehalte der Grundwässer an der Basis des unteren Grundwasserleiters (aus /KLI 07/)

Dagegen wird die räumliche Verteilung der Salzgehalte über dem zentralen und nordöstlichen Teils des Salzstocks stark durch die Gorleber Rinne geprägt. Bedingt durch den direkten Kontakt von Grundwässern mit dem Zechsteinsalinar im zentralen Teil der Rinne kommt es an deren Basis zu einer starken Aufsatzung der Wässer bis in den Bereich der NaCl-Sättigung. Diese Aufsatzung beeinflusst in starkem Maße die Porenwässer sowohl im unteren Rinnengrundwasserleiter als auch in den überlagern-

den Sedimenten. Die Süß-/Salzwassergrenze verläuft über der Gorlebener Rinne innerhalb des oberen Grundwasserleiters in räumlich stark wechselnden Tiefenlagen. Der Lauenburger-Ton-Komplex ist durchweg salzwasserführend, wobei die Salzgehalte der Porenwässer verglichen mit der Elbe-Löcknitz-Niederung mit Werten von 10 g/l bis 30 g/l wesentlich höher liegen. Generell steigt die Versalzung mit zunehmender Tiefe an.

Die vertikale Verteilung der Grundwassersalinitäten im unteren Grundwasserleiter der Gorlebener Rinne stellt sich wie folgt dar: Im oberen Bereich der elsterzeitlichen Sande steigen die Gesamtsalzgehalte der Grundwässer mit zunehmender Tiefe innerhalb einer 20 m bis 30 m mächtigen Übergangszone von etwa 20 g/l bis 40 g/l bis auf Salzgehalte von über 200 g/l an. Die Oberkante dieser Übergangsschicht fällt mit der Basis des Lauenburger-Ton-Komplexes zusammen. Soweit Messstellen an der Rinnenbasis verfiltert wurden, reichen die ermittelten Salzgehalte von etwa 250 g/l bis in den Bereich der Salzsättigung von etwa 320 g/l TDS.

Die Darstellung der räumlichen Verteilung der Salzgehalte der Grundwässer an der Basis des unteren Grundwasserleiters (Abb. B. 3.5) verdeutlicht die klare Beziehung zwischen der Zonierung der Salzgehalte und der Struktur des unteren Grundwasserleiters. Der Verbreitungsbereich der hochsalinen Wässer mit mehr als 200 g/l Gesamtsalzgehalt beschränkt sich auf den Kontaktbereich zwischen Salinar und quartärzeitlichen Sedimenten innerhalb der Gorlebener Rinne einschließlich der unmittelbar nördlich und südlich angrenzenden Bereiche sowie auf den zentralen Bereich der geschlossenen Muldenstruktur der nordwestlichen Randsenke. Dabei stehen die Salzwässer der Gorlebener Rinne und der Randsenke in direkter Verbindung. Innerhalb der nordwestlichen Randsenke nehmen die Salzgehalte in Richtung der strukturellen Hochlagen kontinuierlich bis auf Werte von deutlich unter 50 g/l ab. Insgesamt ist die Salinität der Salzwässer in der nordwestlichen Randsenke jedoch auch außerhalb des Verbreitungsbereichs der Solen höher als in der südwestlichen Randsenke, wo die Salinität der Wässer an der Basis der Grundwasserleiters verbreitet bei weniger als 10 g/l liegt. Über dem südwestlichen Teil des Salzstocks liegen die Salzgehalte überwiegend ebenfalls in der gleichen Größenordnung, nur in unmittelbarer Nähe zur Gorlebener Rinne weisen die Wässer höhere Salzgehalte auf. Über dem Ringwall ist der untere Grundwasserleiter teilweise bis zur Basis des Grundwasserleiters süßwassererfüllt.



**Abb. B. 3.6** Tiefenlage der Unterfläche des oberen Süßwasserkörpers (aus /KLI 07/)

In Abbildung B. 3.6 ist die Tiefenlage der Unterfläche des Süßwasserkörpers dargestellt. Diese hat ein stark ausgeprägtes Relief, das Beziehungen sowohl zu regionalen hydrogeologischen Strukturen – insbesondere der Verbreitung der Grundwassergeringleiter – als auch zur regionalen Grundwasserbewegung erkennen lässt. Aufgrund der bereichsweisen lateralen Verzahnung und Überlappung von Süß- und Salzwasserkörpern kann die Tiefenlage kleinräumig um bis zu 100 m variieren. Die größten Süßwassermächtigkeiten von mehr als 100 m bis maximal 170 m befinden sich in den Randsenken im Nordwesten und Südosten des Salzstocks in Gebieten mit absteigender Grundwasserbewegung, in denen zudem ein direkter hydraulischer Kontakt zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasserleiter besteht. Vergleichsweise große Mächtigkeiten bestehen auch in Teilbereichen über dem westlichen Teil des Salzstocks.

Ausgesprochene Salzwasser-Hochlagen, in denen Salzwässer teilweise das gesamte System bis an die Grundwasseroberfläche ausfüllen, befinden sich:

1. über dem Salzstock Groß Heide–Siemen am Westrand des Untersuchungsgebietes,
2. in der Flussniederung der Elbe,
3. über dem südwestlichen Rand des Salzstocks Gorleben sowie
4. am Westrand der Gorlebener Rinne über dem Salzstock Gorleben.

zu 1. Abbildung B. 3.6 zeigt eine großflächige, den Salzstock Groß Heide–Siemen umgebende Salzwasserhochlage. Im Rahmen eines Untersuchungsprogrammes zum Auftreten oberflächennaher Versalzungen des Grundwasser wurde im Niederungsgebiet Lucie im Süden dieser Salzstruktur eine ausgedehnte Salzwasserhochlage mit Gesamtsalzgehalten von bis zu 2,7 g/l TDS identifiziert /BRÜ 83/. Zwei direkt über dem Salzstock abgeteufte Bohrungen zeigen einen zur Tiefe kontinuierlich ansteigenden Salzgehalt der Porenwässer (Vertikalschnitt A – A').

zu 2. Wie bereits erwähnt, hat der obere Süßwasserkörper im zentralen Bereich der Elbe-Löcknitz-Niederung eine durchweg sehr geringe Mächtigkeit. Die geringsten Süßwassermächtigkeiten wurden mit 10 m bis maximal 30 m entlang des Rhinowkanals sowie über der Salzstruktur Gorleben–Rambow im Bereich der Löcknitz angetroffen. Nach Norden und Süden hin nimmt die Mächtigkeit des Süßwassers deutlich zu, wobei es an den Rändern der Salzwasserhochlage zu einer Unterschichtung durch Süßwässer bzw. einer lateralen Verzahnung zwischen Süß- und Salzwässern kommt. Eine weitere räumlich begrenzte Salzwasserhochlage befindet sich weiter elbeaufwärts nordöstlich von Gartow. In diesem Gebiet wurden hier durch /BRO 91/ oberflächennah erhöhte Salzgehalte im Grundwasser bis zu 1,3 g/l TDS ermittelt.

zu 3. Im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben variiert die Tiefenlage der Süßwasserbasis kleinräumig um bis zu 100 m. Zwei ausgeprägte Salzwasserhochlagen befinden sich über dem südwestlichen Salzstockrand im Bereich des Ringwalls sowie am Westrand der Gorlebener Rinne. In beiden Bereichen lagern saalezeitliche Geschiebemergel unmittelbar auf alltertiären Tonen, die wiederum unmittelbar dem Zechsteinsalinar auflagern. Hierdurch bedingt sind Tone und Geschiebemergel durchgehend salzwasserführend,



wobei der Salzgehalt der Porenwässer nach oben abnimmt. (vgl. Vertikalschnitt A – A').

zu 4. Die zweite Salzwasserhochlage am westlichen Rand der Gorlebener Rinne ist in Nord-Süd-Richtung über eine Länge von etwa 6 km vom Gebiet südlich von Gorleben bis ins Gebiet nördlich der Elbe zu verfolgen. Im Süden dieser Hochlage wurden in innerhalb des oberen Grundwasserleiter verfilterten Grundwassermessstellen extrem hohe Salinitäten von bis zu 90 g/l ermittelt. Entsprechend hohe Salzgehalte werden über dem Salzstock Gorleben ansonsten nur innerhalb des unteren Rinnengrundwasserleiter angetroffen. Die Salzgehalte innerhalb der Salzwasserhochlage gehen in nördliche Richtung zurück, gleichzeitig steigt Süß-/Salzwassergrenze an und erreicht an der Elbe die Grundwasseroberfläche.

## **B.4 Zusammenfassung**

Die wichtigsten Ergebnisse der systematischen Erkundung der Süß-/Salzwasser-Verteilung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Deckgebirge besteht eine für das Norddeutsche Flachland charakteristische Gliederung in einen oberen Süßwasserkörper unterschiedlicher Mächtigkeit und durchweg geringen Gesamtsalzgehalten, der von einem Salzwasserkörper mit salinen Grundwässern unterlagert wird.
- Die größten Süßwassermächtigkeiten von mehr 150 m sind innerhalb der den Salzstock umgebenden Randsenken ausgebildet.
- In der Elbe-Löcknitz-Niederung existiert zusätzlich ein tiefer Süßwasserkörper aufgrund eines Süßwasserzuströms in den unteren Aquifer aus den nördlich angrenzenden Geest-Hochlagen.
- Die Salzgehalte der Wässer des Salzwasserkörpers in weiten Bereichen der Randsenken sowie über dem südwestlichen Salzstock liegen bei 20 – 30 g/l.
- Bedingt durch den direkten Kontakt von Grundwässern mit dem Zechsteinsalinar im zentralen Teil der Gorlebener Rinne kommt es an deren Basis zu einer starken

Aufsalzung der Wässer bis in den Bereich der NaCl-Sättigung. Die Zone hochsaliner bis salzgesättigter Wasser setzt sich in den Muldenkern der nordwestlichen Randsenke fort.

- Oberflächennahe Versalzungen des Grundwassers werden über dem Salzstock Groß Heide–Siemen, in der Elbe-Löcknitz-Niederung sowie über dem Salzstock Gorleben am nordwestlichen Rand der Gorlebener Rinne angetroffen.

## B.5 Literaturverzeichnis

- /BRO 91/ Brose, F., Untersuchungen zum Auftreten örtlicher Versalzungen im oberflächennahen Grundwasser in der Umgebung des Salzstockes von Gorleben. – Dissertation, FU Berlin, 1991.
- /BRÜ 83/ Brühl, H. & Faber, P., Salzkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser des Kreises Lüchow-Dannenberg und ihre Verteilung. - PSE-interner Arbeitsbericht Nr. 83/1B, FU Berlin, 1983.
- /FIE 91/ Fielitz, K. & Giesel, W., Evaluation of groundwater salinity from well logs and conclusions on flow velocities of saline water. In: De Breuck (Ed.), Hydrogeology of Salt Water Intrusion, Verlag H. Heise, Hannover, 1991.
- /KLI 94/ Klinge, H., Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopegeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstockes Gorleben und seiner Randsenken – Projektgebiet Gorleben-Süd. – Unveröff. Ber., BGR, Archiv-Nr. 111 699, Hannover, 1994.
- /KLI 01/ Klinge, H., Margane, A., Mrugalla, S., Schelkes, K. & Söfner, B., Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes Dömitz-Lenzen. - Unveröff. Ber., BGR, Hannover, 2001.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, H., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A., Standortbeschreibung Gorleben, Teil 1: Die Hydrogeologie des Salzstockes Gorleben, Geol. Jb., C71, 147 S., 2007, Hannover.
- /RÜB 00/ Rübel, A. P., Stofftransport in undurchlässigen Gesteinsschichten. Isotopenuntersuchungen im Grund- und Porenwasser. - ISBN 3934366376, Der Andere Verlag, Osnabrück, 2000.



## **C Chemische Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben**

H. Klinge<sup>1</sup>, R.-R. Ludwig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### **C.1 Datengrundlage**

Im Rahmen der Übertägigen Erkundung am Standort Gorleben-Süd wurden im Zeitraum zwischen 1979 und 1991 sowie von 1996 bis 1999 insgesamt etwa 1 450 chemische Analysen an Wasserproben aus 404 Grundwassermessstellen und Förderbrunnen durchgeführt. Der überwiegende Teil der Analysen aus Brunnen und Messstellen des Gebietes südlich der Elbe wurde durch das Wasserlabor des geologischen und Ingenieurbüros Pickel im Zeitraum zwischen 1979 und 1991 durchgeführt. Darüber hinaus analysierte auch das Institut für Radiochemie der Technischen Universität München Grundwässer insbesondere in Hinblick auf deren Gehalte an Lanthaniden und Actiniden. Wasserproben aus dem Untersuchungsgebiet nördlich der Elbe wurden im Zeitraum von 1996 bis 1999 durch das Wasserlabor der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe analysiert.

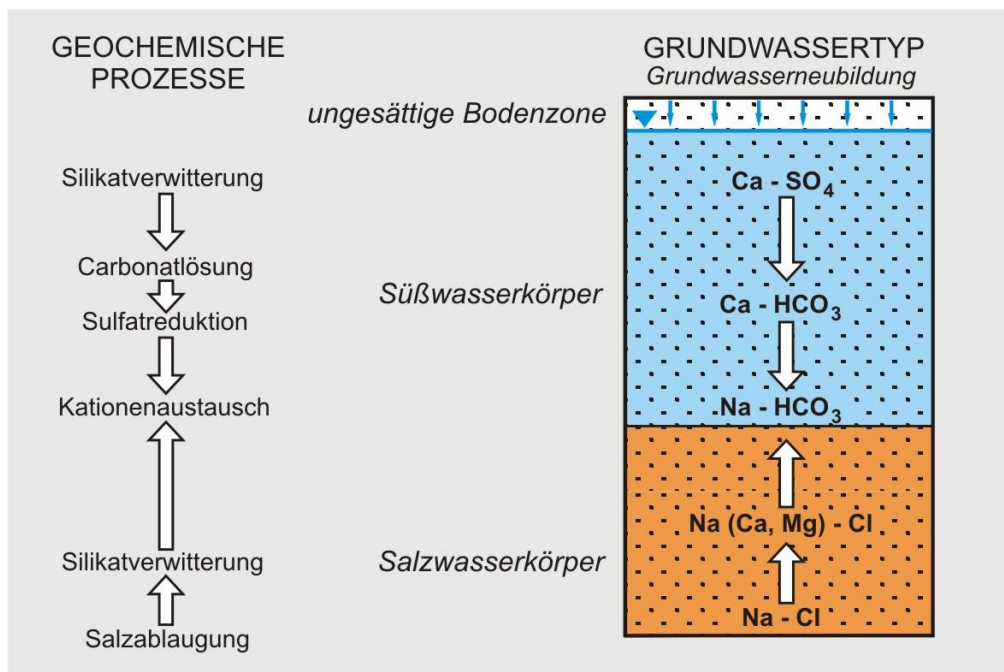
/KLI 94/ untersuchte die vorliegenden Analysen in Hinblick auf mögliche systematische Änderungen in der chemischen Zusammensetzung der Wässer. Die Untersuchungen ergaben, dass im Analysenzeitraum keine systematischen Änderungen der Wasserzusammensetzung erkennbar sind, sondern die Schwankungsbreite der Analysen im Bereich der Analysengenauigkeit liegt. Den grafischen Darstellungen in den nachfolgenden Kapiteln liegt daher jeweils eine repräsentative Analyse pro Messstelle oder Brunnen zugrunde. Dabei wurde als repräsentative Analyse diejenige Analyse mit dem niedrigsten Ionenbilanzfehler ausgewählt.

### **C.2 Typisierung der Grundwässer**

Im Aquifersystem des Deckgebirges im Bereich des Salzstocks Gorleben besteht eine generelle vertikale Gliederung in einen oberen Süßwasserkörper mit überwiegend ge-

ringen Gesamtsalzgehalten und einen darunter liegenden Salzwasserkörper mit Salzgehalten von  $< 1$  g/L TDS bis zur Salzsättigung von etwa 320 g/L TDS. Dieser vertikalen Zweiteilung entspricht eine ebenfalls vertikale, von der Salinität abhängige Gliederung in chemische Wassertypen. Bezogen auf die Hauptbestandteile der Wässer ergibt sich folgende Abfolge:

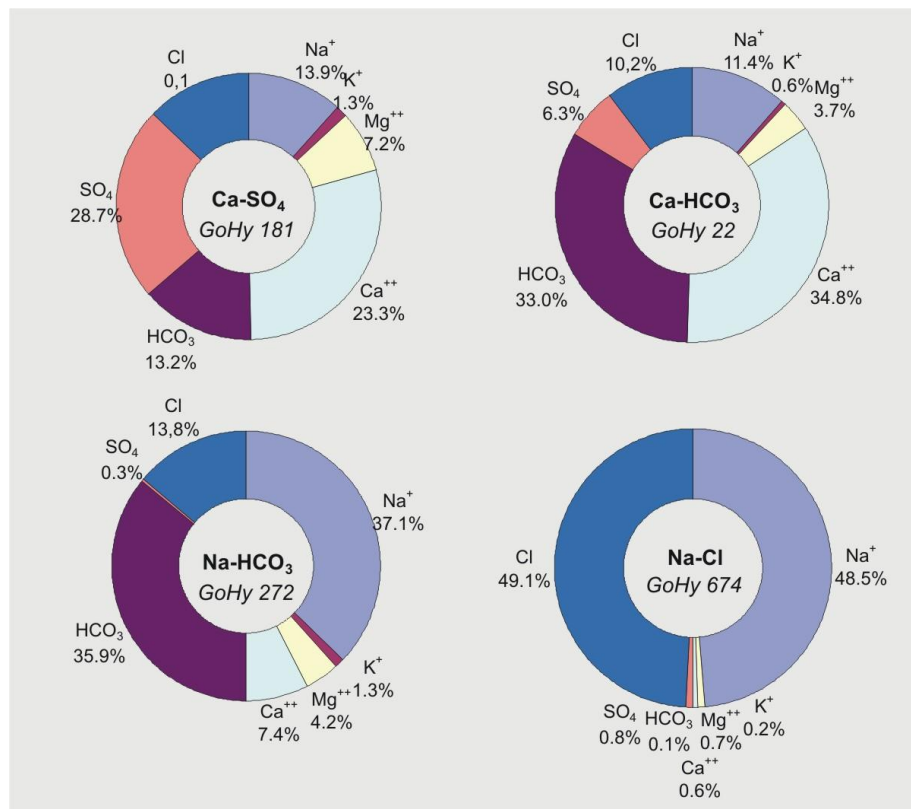
- Ca-SO<sub>4</sub>-Wässer
- Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer
- Na-HCO<sub>3</sub>-Wässer
- Na-Cl-Wässer



**Abb. C. 2.1** Schema der vertikalen Zonierung der Grundwassertypen im Untersuchungsgebiet Gorleben (aus /KLI 07/)

Abbildung C. 2.1 zeigt eine schematische Darstellung der vertikalen Zonierung der Grundwassertypen. **Ca-SO<sub>4</sub>-Wässer** treten bevorzugt in den obersten zehn Metern innerhalb der kalkfreien bzw. entkalkten Sedimente der Dünengebiete auf. Aufgrund der Kalkarmut dieser Sedimente sind die Wässer untersättigt an Calcit. Wesentliche Verwitterungsreaktion in den Böden ist daher die hydrolytische Zersetzung von Feldspäten. Hierdurch bedingt sowie aufgrund des atmosphären Schwefelsäureeintrags sind Calcium und Sulfat die mit Abstand häufigsten Bestandteile der Sickerwässer (Abb. C. 2.2). Der

mittlere Gesamtlösungsinhalt dieser sehr niedrig mineralisierten Wässer liegt bei 150 mg/l.



**Abb. C. 2.2** Chemische Zusammensetzung verschiedener Grundwassertypen des Untersuchungsgebietes (aus /KLI 07/)

In der Elbe-Löcknitz-Niederung, z. T. auch in der Elbeniederung südlich der Elbe, zählen die Grundwässer in den Niederterrassesedimenten teilweise ebenfalls zu diesem Wassertypus, allerdings ist der Gesamtsalzgehalt dieser Wässer mit im Mittel 660 mg/l gegenüber den Ca-SO<sub>4</sub>-Wässern der Dünengebiete wesentlich erhöht. Bei diesen Wässern handelt es sich um Oberflächenwasser der Elbe, das bei Hochwasser sowie aufgrund von Wasserhaltungsmaßnahmen in den oberflächennahen Grundwasserleiter infiltriert. Aufgrund der anthropogenen Belastung weisen diese Wässer einen erhöhten Gesamtsalzgehalt sowie erhöhte Sulfatgehalte auf /KLI 01/.

In den Geestgebieten führt der zur Tiefe hin ansteigende Kalkgehalt in den Sedimenten zu steigenden Ca-HCO<sub>3</sub>-Gehalten in den Grundwässern. Wegen des gleichzeitigen Rückgangs der Sulfatgehalte infolge mikrobieller Sulfatreduktion, die eine zusätzliche

Erhöhung des  $\text{Ca-HCO}_3$ -Anteils bedingt (vgl. Kap. C.4.2), bilden **Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer** unterhalb von 25 m unter Gelände den dominierenden Wassertypus des Süßwasserkörpers. Der mittlere Gesamtlösungsinhalt dieser Wässer liegt etwa 250 mg/l.

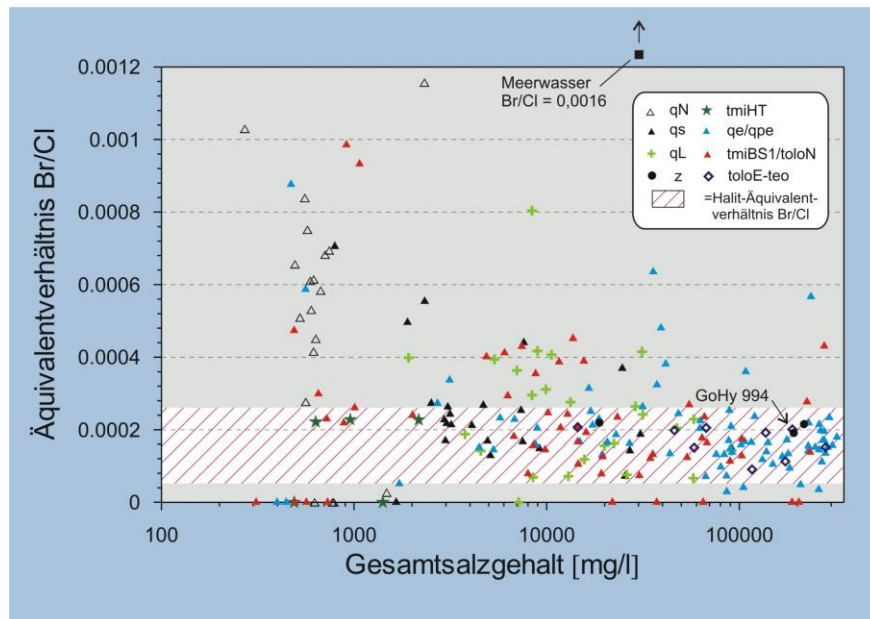
Innerhalb des Süßwasserkörpers treten lokal **Na-HCO<sub>3</sub>-Wässer** als ein weiterer Wassertypus auf. Diese Wässer entstehen beim Aussüßen ehemals salzwasserführender Grundwasserleiter. Durch Ionentausch zwischen Natrium-besetzten Tonmineralen und  $\text{Ca-HCO}_3$ -Wässern, werden den Grundwässern in unterschiedlichem Maße Calcium-Ionen entzogen und entsprechende Anteile an Natrium in die Wässer freigesetzt. Dieser Prozess führt im Extremfall zur Bildung von  $\text{Na-HCO}_3$ -Wässern. Verglichen mit den  $\text{Ca-HCO}_3$ -Wässern weisen diese Wässer geringfügig erhöhte Chloridgehalte auf. Die mittleren Gesamtsalzgehalte sind mit ca. 490 mg/l im Vergleich zu den  $\text{Ca-HCO}_3$ -Wässern gleichfalls erhöht.

Die Grundwässer des Salzwasserkörpers und die Grundwässer aus der Übergangsschicht zwischen Süß- und Salzwasserkörper zählen ohne Ausnahme zum Typus der **Na-Cl-Wässer**, wobei der Na-Cl-Anteil je nach Gesamtsalzgehalt zwischen über 50 und mehr als 95 Äquivalentprozenten betragen kann. In Abbildung C. 2.2 ist die Zusammensetzung einer salzgesättigten Sole aus dem Kontaktbereich zwischen Salinar und quarzzeitlichen Sedimenten an der Basis der Gorlebener Rinne dargestellt. Allgemein liegt der Anteil an Natrium und Chlorid in diesen hochmineralisierten Wässern jeweils bei mehr als 90 Äquivalentprozenten, der auf Gipslösung zurückgehende  $\text{Ca-SO}_4$ -Anteil bei etwa 2 Äquivalentprozenten.

### C.3 Herkunft und Genese der Salzwässer

Bei der Betrachtung des Szenarios einer möglichen Ausbreitung von Schadstoffen aus dem Endlager im Salzstock Gorleben interessiert die Frage nach der Möglichkeit der Unterscheidung von Salzwässern unterschiedlicher Genese und regionaler Herkunft. /KLI 94/ untersuchte, inwieweit für das Untersuchungsgebiet eine solche Eingrenzung anhand geochemischer Kriterien möglich ist. Betrachtet wurde die Zusammensetzung an Haupt-Inhaltsstoffen sowie charakteristische Spurenelement/Chlorid-Verhältnisse.





**Abb. C. 3.1** Äquivalentverhältnis Br/Cl der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich exemplarisch anhand der Darstellung des Äquivalentverhältnisses Bromid/Chlorid in Abhängigkeit vom Gesamtlösungsinhalt verdeutlichen (Abb. C. 3.1). Das Äquivalentverhältnis Br/Cl dient als Hauptkriterium bei der Beurteilung der Genese von Salzwässern, weil Bromid – wie auch Chlorid – im Gegensatz zur überwiegenden Anzahl der kationischen Spurenelemente weitestgehend unbeeinflusst von geochemischen Wechselwirkungen zwischen Wasser und Sediment bleibt. Darüber hinaus wird Bromid bei der Eindunstung von Meerwasser in charakteristischer Weise in den verbleibenden Lösungen an- und in den Salzkristallen abgereichert. So ist Bromid im Verhältnis zu Chlorid in Steinsalz im Vergleich zum Meerwasser um den Faktor 7 bis 13 abgereichert. Im Gegensatz dazu sind Restlösungen der Meerwassereindunstung, bezogen auf Meerwasser, um ein mehrfaches an Bromid angereichert /HER 73/.

In Abbildung C. 3.1 ist das Äquivalentverhältnis Br/Cl in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt der Wässer dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in dieser sowie in den folgenden beiden Darstellungen der Salzgehalt der Wässer auf der Abszissenachse jeweils in logarithmischer Skalenteilung dargestellt. Die Darstellung lässt eine Abhängigkeit zwischen dem Äquivalentverhältnis Br/Cl und dem Gesamtsalzgehalt dahingehend erkennen, dass die Datenpunkte der hochsalinen Wässer mit Salzgehalten von > 50 g/l

bis auf wenige Ausnahmen in dem für die Ablaugung von Halit typischen Bereich liegen. Dies gilt auch für die Wässer aus Wasserleitern des Prä-Miozäns wie das Wasser aus der 550 m tiefen Messstelle GoHy 994, die sich in dieser Hinsicht nicht von Ablaugungswässern entsprechender Gesamtmineralisation aus dem Bereich der Gorlebener Rinne unterscheiden. Salzwasserproben mit Gesamtsalzgehalten zwischen 1 g/l und 50 g/l liegen ebenfalls überwiegend im den für Halit typischen Bereich, jedoch weist eine größere Zahl von Proben insbesondere aus dem Lauenburger-Ton-Komplex deutliche, maximal um den Faktor zwei höhere Äquivalentverhältnisse auf. Gerade bei den Porenwässern aus dem Lauenburger-Ton-Komplex ist eine direkte Beziehung zu den Ablaugungswässern im unmittelbaren Liegenden wahrscheinlich. Die abweichenden Werte dürften daher eher auf Messfehler als auf eine unterschiedliche Genese und Herkunft der Wässer hindeuten.

Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass es sich bei den Salzwässern im Untersuchungsgebiet durchweg um Natriumchlorid-geprägte Ablaugungswässer handelt. Eine differenzierte Eingrenzung der Herkunft der Salzwässer auf der Basis geochemischer Kriterien ist nicht möglich.

#### **C.4 Geochemische Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Sedimenten**

Die ursprüngliche Zusammensetzung der Grundwässer wird durch eine Reihe geochemischer Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Gesteinsmineralen sowie durch mikrobielle Umsetzungen sekundär verändert.

Dabei lassen sich folgende Reaktionen unterscheiden:

- **Alkalisierung**

Die Alkalisierung der Grundwässer ist bedingt durch Ionenaustauschprozesse zwischen Grundwässern und Natrium-besetzten Tonmineralen. Hierdurch kommt es zu einer Anreicherung von Natrium im Grundwasser und einer entsprechenden Abreicherung von Calcium und Magnesium. Von der Alkalisierung sind nur gering mineralisierte Grundwässer betroffen. Im Extremfall sie führt zur Bildung von

Na-HCO<sub>3</sub>-Wässern. Na-HCO<sub>3</sub>-Wässer treten bevorzugt im Bereich der Süß-/Salzwassergrenze auf, insbesondere wenn es zu einer Verdrängung saliner Porenwässer durch Süßwässer infolge einer Verlagerung der Süß-/Salzwassergrenze kommt (s. z. B. /LÖH 70/).

- **Erdalkalisierung**

In den salzwasserführenden Sedimenten verlaufen die geochemischen Wechselwirkungen zwischen Wasser und Gestein in umgekehrter Richtung: Durch den Kontakt von Salzwässern mit Erdalkali-belegten Tonmineralen kommt es zu einer Anreicherung von Calcium und Magnesium im Wasser und einer entsprechenden Abreicherung von Natrium. Darüber hinaus werden Feldspäte und Tonminerale durch Kontakt mit salinen Wässern instabil. Verwitterungsreaktionen führen zur Entstehung natriumreicher Tonminerale und zur Freisetzung der Erdalkalielemente Calcium, Magnesium und Strontium. Die hochsalinen Wässer enthalten daher Natrium und Chlorid nicht in stöchiometrischer Zusammensetzung, wie dies bei Ablaugungswässern zu erwarten wäre, sondern weisen, bezogen auf Chlorid, ein Natriumdefizit und einen entsprechenden Überschuss an Erdalkali-Elementen auf.

- **Sulfatreduktion**

Ein großer Teil der tieferen niedrig mineralisierten Grundwässer des Süßwasserkörpers weist im Vergleich zu den oberflächennahen Grundwässern stark erniedrigte Sulfatgehalte auf. Die niedrigen Sulfatgehalte haben ihre Ursache in einer mikrobiell bedingten Sulfatreduktion, mit der eine Oxidation organischer Substanz einhergeht. Von der mikrobiellen Sulfatreduktion sind auch Salzwässer, insbesondere solche mit mittleren Salinitäten betroffen.

#### **C.4.1 Alkalisierung und Erdalkalisierung der Grundwässer**

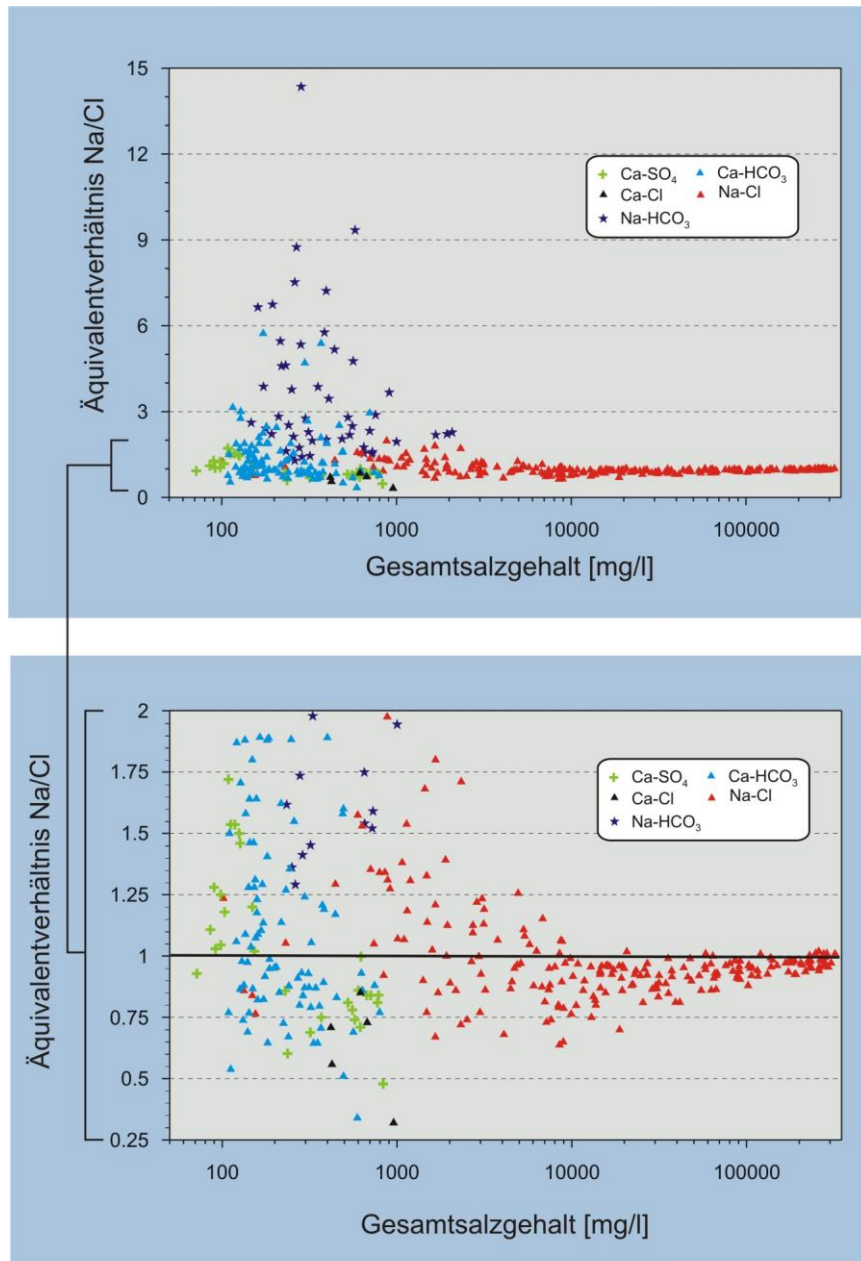
Die Alkalisierung und Erdalkalisierung der Grundwässer lässt sich insbesondere anhand der Entwicklung des Äquivalentverhältnisses Na/Cl in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt veranschaulichen (Abb. C. 4.1). Die Größe des Äquivalentverhältnisses Na/Cl zeigt eine klare Abhängigkeit dieser Reaktionen zur bestehenden vertikalen Zweigliederung in Süß- und Salzwässer. Kennzeichnend für die Wässer des **Salzwasserkörpers**, die als Ablaugungswässer ein ausgeglichenes Na/Cl-Äquivalentverhältnis aufweisen müssten, ist, wie erwähnt, ein mehr oder weniger deutliches relatives Natri-

umdefizit aufgrund der beschriebenen Erdalkalisierungsreaktionen. Wässer mit einem Äquivalentverhältnis Na/Cl von  $> 1$  treten dementsprechend innerhalb des Salzwasserkörpers nicht auf.

Die Wässer des **Süßwasserkörpers**, d. h. Grundwässer mit weniger als 1 000 mg/l TDS weisen, verglichen mit den Wässern des Salzwasserkörpers, eine wesentlich größere Streubreite des Na/Cl-Verhältnisses auf. Es überwiegen Wässer mit einem Äquivalentverhältnis Na/Cl von  $> 1$ , wobei die Gruppe der Na-HCO<sub>3</sub>-Austauschwässer extrem erhöhte Natriumgehalte besitzt. Daneben treten innerhalb des Süßwasserkörpers aber auch Wässer mit einem erheblichen Natriumdefizit auf. Bei letzteren handelt es sich überwiegend um Ca-SO<sub>4</sub>-Wässer aus den topografischen Hochlagen des Untersuchungsgebietes. In den hier verbreiteten entkalkten Sedimenten überwiegt die hydrolytische Zersetzung von Silikaten gegenüber der Kalklösung. Diese führt zu einer bevorzugten Freisetzung von Natrium relativ zu Calcium.

Na-HCO<sub>3</sub>-Austauschwässer mit z. T. extrem hohen Na/Cl-Äquivalentverhältnissen treten gehäuft innerhalb unteren Grundwasserleiters in der Elbe-Löcknitz-Niederung sowie südlich der Elbe unterhalb des Grundwassererneuerungsgebietes der Gartower Tannen unmittelbar oberhalb der Süß-/Salzwassergrenze auf.

Bei der Erdalkalisierung der Salzwässer ist keine systematische Beziehung zur räumlichen Lage der Messstellen zu erkennen. Dagegen besteht eine Beziehung zur Stratigraphie des Wasserleiters dahingehend, dass Salzwässer aus quartären Grundwasserleitern in stärkerem Maße durch die Erdalkalisierung verändert wurden als Wässer aus tertiären Wasserleitern. Der Grund dürfte in der unterschiedlichen Zusammensetzung der Sedimente liegen. In den quartären Ablagerungen stehen generell größere Anteile an Feldspat- und Tonmineralen für Verwitterungs- und Neubildungsreaktionen zur Verfügung. Diese führen zu höheren Austauschraten /KLI 94/.



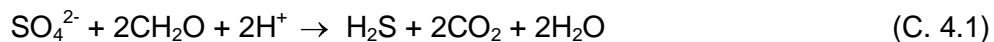
**Abb. C. 4.1** Äquivalentverhältnis Na/Cl der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (aus /KLI 07/)

#### C.4.2 Mikrobielle Sulfatreduktion

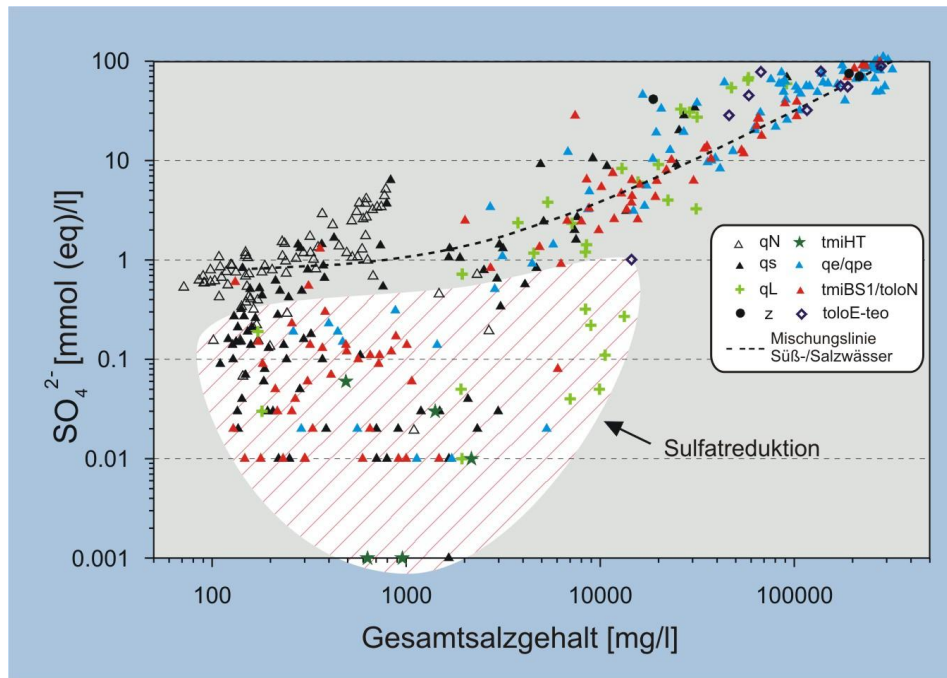
Art und Umfang der **mikrobiellen Sulfatreduktion** in den Wässern lassen sich anhand der Abbildungen C. 4.2 und C. 4.3 verdeutlichen. In der Darstellung sind die Sulfat- und Hydrogenkarbonatgehalte der Grundwässer gegen deren Gesamtlösungsinhalt aufgetragen. Abbildung C. 4.2 zeigt ferner die berechnete Mischungsgerade zwischen einer

sulfatreichen gesättigten Na-Cl-Sole und einem oberflächennahen gering mineralisierten Grundwasser. Aus der Darstellung geht hervor, dass ein erheblicher Teil der Wässer im Konzentrationsbereich zwischen 100 und 10 000 mg/l TDS sehr niedrige Sulfatgehalte aufweisen, die genetisch nicht auf eine Mischungsverdünnung hochkonzentrierter Solen und niedrig mineralisierter Grundwässer zurückgeführt werden können.

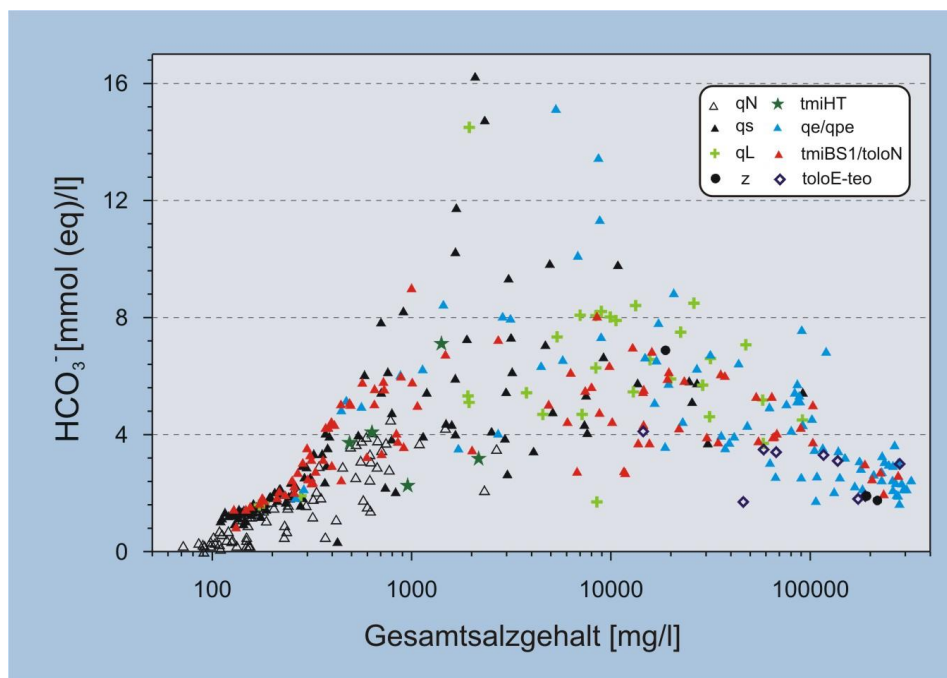
Ursache der erniedrigten Sulfatgehalte ist ein mikrobieller Sulfatabbau unter anaeroben Bedingungen bei gleichzeitiger Oxidation organischen Kohlenstoffs. Ein Beispiel für diese Reaktion gibt die folgende Reaktionsgleichung:



Erfolgt die Sulfatreduktion in karbonathaltigen Grundwasserleitern, so reagiert das dabei freigesetzte  $\text{CO}_2$  mit Calcit unter Bildung von Hydrogenkarbonat. Abbildung C. 4.3 dokumentiert den Einfluss dieser Calcitlösung auf die Hydrogenkarbonatgehalte der Grundwässer: Insbesondere im Bereich zwischen etwa 500 und 10 000 mg/l TDS weisen die Grundwässer gegenüber den Wässern des oberflächennahen Bereiches und den hochkonzentrierten Solen überwiegend deutlich erhöhte Gehalte an Hydrogenkarbonat auf. Anhand der Hydrogenkarbonatgehalte sowie aufgrund von Bestimmungen der Schwefelisotopenzusammensetzung des gelösten Sulfats kann indirekt geschlossen werden, dass mikrobielle Sulfatreduktion bis zu Gesamtlösungsinhalten von etwa 200 g/l auftritt /KLI 94/. Da praktisch alle Sedimente organische Substanz in Form von Braunkohlelagen in den Unteren Braunkohlesanden oder von fein verteiltem Detritus aus aufgearbeiteten Braunkohlesanden in den Quartärsedimenten enthalten, ist die Sulfatreduktion im wesentlichen von der tiefenabhängigen Sauerstoffkonzentration im Grundwasser abhängig. Innerhalb des Süßwasserkörpers ist daher ein genereller Rückgang der Sulfatgehalte mit zunehmender Tiefe zu verzeichnen. Auffällig ist insbesondere der starke Rückgang der Bandbreite der Sulfatgehalte in einer Tiefe von 20 m bis 30 m unter Gelände, der das Einsetzen der Sulfatreduktion in diesem Tiefenbereich dokumentiert /BOE 95/.



**Abb. C. 4.2** Sulfatkonzentrationen der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (aus /KLI 07/)



**Abb. C. 4.3** Hydrogenkarbonatkonzentrationen der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (aus /KLI 07/)

## C.5 Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung der chemischen Zusammensetzung Süß- und Salzwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der generellen vertikalen Gliederung in einen oberen Süßwasserkörper und einen darunter liegenden Salzwasserkörper entspricht eine ebenfalls vertikale, von der Salinität abhängige Gliederung in folgende chemische Wassertypen:
  - Ca-SO<sub>4</sub>-Wässer
  - Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer
  - Na-HCO<sub>3</sub>-Wässer
  - Na-Cl-Wässer
- Bei den Salzwässern im Untersuchungsgebiet handelt es sich durchweg um Natriumchlorid-geprägte Ablaugungswässer. Eine differenzierte Eingrenzung der Herkunft der Salzwässer auf der Basis geochemischer Kriterien ist nicht möglich.
- Die ursprüngliche Zusammensetzung der Grundwässer wird durch geochemische Wechselwirkungen zwischen Grundwässern und Gesteinsmineralen (Alkalisierung und Erdalkalisierung) sowie durch mikrobiellen Sulfatabau sekundär verändert.
- Die **Alkalisierung** der Grundwässer ist bedingt durch Ionenaustauschprozesse zwischen Süßwässern und Natrium-besetzten Tonmineralen. Hierdurch kommt es vor Allem in gering mineralisierten Grundwässern zu einer Anreicherung von Natrium im Grundwasser und einer entsprechenden Abreicherung von Calcium und Magnesium. Solche Wässer treten gehäuft innerhalb unteren Grundwasserleiters in der Elbe-Löcknitz-Niederung sowie südlich der Elbe unterhalb des Grundwassererneuerungsgebietes der Gartower Tannen unmittelbar oberhalb der Süß-/Salzwassergrenze auf.
- Die **Erdalkalisierung** führt aufgrund der Verwitterung von Feldspäten und Tonmineralen im Kontakt mit Salzwässern zur Anreicherung von Calcium, Magnesium und Strontium im Grundwasser. Hiervon sind die quartären Ablagerungen aufgrund des höheren Anteils an Feldspat- und Tonmineralen in stärkerem Maß betroffen als die tertiären Wasserleiter.



- Ein erheblicher Teil der Wässer im Konzentrationsbereich zwischen 100 und 10 000 mg/l TDS weist stark erniedrigte Sulfatgehalte auf. Grund hierfür ist mikrobieller Sulfatabbau unter anaeroben Bedingungen bei gleichzeitiger Oxidation organischen Kohlenstoffs, der zu stark erhöhten Hydrogenkarbonatgehalten im Grundwasser führt.

## C.6 Literaturverzeichnis

- /BOE 95/ Boehme, J., Fielitz, K., v. Hoyer, M., Klinge, H., Kopietz, J., Ludwig, R., Ochmann, N., Schelkes, K., Söfner, B., & Wernicke, W., Standortbeschreibung Gorleben-Süd, Hydrogeologie des Deckgebirges. – Unveröff. Ber., BGR, Archiv-Nr. 112693, Hannover.
- /HER 73/ Herrmann, A.G., Knake, D., Schneider, J. & Peters, H., Geochemistry of modern seawater and brines from salt pans: main components and bromine distribution. - Contr. Mineral. and Petrol., Vol. 40, S. 567-598, 1973.
- /KLI 94/ Klinge, H., Projekt Gorleben - Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstockes Gorleben und seiner Randsenken – Projektgebiet Gorleben-Süd. – Unveröff. Ber., BGR, Archiv-Nr. 111 699, Hannover.
- /KLI 01/ Klinge, H., Margane, A., Mrugalla, S., Schelkes, K. & Söfner, B., Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes Dömitz-Lenzen. - Unveröff. Ber., BGR, Hannover.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, H., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A., Standortbeschreibung Gorleben, Teil 1, Die Hydrogeologie des Salzstocks Gorleben, Geol. Jb., C71, 147 S., 2007, Hannover.
- /LÖH 70/ Löhnert, E., Grundwasserchemismus und Kationentausch im norddeutschen Flachland. - Z. deutsch. geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrochem., S. 139-159, Hannover.



## **D Isotopenuntersuchungen und Grundwasseralter**

A. Rübél<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

### **D.1 Einleitung**

Isotopenuntersuchungen im Grundwasser werden in hydrogeologischen Studien vielfältig eingesetzt, um die Grundwasserfließpfade zu verfolgen, bzw. eine Datierung der Grundwasser vorzunehmen. Die Isotope dienen dabei als Spurenstoff (Tracer). Im Folgenden werden ausschließlich natürliche Spurenstoffe betrachtet, die bei der Infiltration mit in das Grundwasser eingetragen werden.

Um für die Verwendung als Spurenstoff zu dienen, muss entweder die Eintragsfunktion des Spurenstoffs in das Grundwasser charakteristische Veränderungen mit der Zeit aufweisen, oder die Spurenstoffkonzentration im Grundwasser muss auf Grund von Zerfalls-, Verbrauchs- oder Akkumulationsprozessen mit der Zeit zu-, bzw. abnehmen. Ist der verändernde Prozess gut bekannt, wie dies z. B. bei radioaktiven Spurenstoffen der Fall ist, so kann auf Grund der Differenz zwischen gemessener und ursprünglicher Spurenstoffkonzentration im Grundwasser auf das „Alter“ des Grundwassers geschlossen werden. Unter Alter ist hierbei zu verstehen, wie lange eine Wassermenge seit ihrer Infiltration keinen Kontakt mit der Atmosphäre gehabt hat.

Grundsätzliche Probleme bei der Datierung von Grundwasser mit Hilfe von Isotopenmethoden sind, dass sowohl die Eintragsfunktion des Spurenstoffs in das Grundwasser, wie auch die die Konzentration verändernden Prozesse gut bekannt sein müssen. Weiterhin können Mischungsprozesse im Grundwasser zu einer Verschiebung des ermittelten Grundwasseralters führen, falls der die Konzentration verändernde Prozess in seiner Wirkung nicht direkt proportional zur der Zeit ist. Dies ist z. B. bei radioaktiven Spurenstoffen der Fall. In diesem Fall sind die berechneten Alter jünger als es dem mittleren Alter der gemischten Wassermassen entsprechen würde. Daher muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den berechneten Grundwasseraltern typischerweise um ein „Modellalter“ handelt, welches nur unter den zu Grunde liegenden Annahmen gültig ist.

Häufig in der Hydrogeologie eingesetzte natürliche Isotopentracer sind Tritium, die stabilen Isotope  $^{18}\text{O}$  und Deuterium, Radiokohlenstoff und gelöste Edelgase. Diese fünf Spurenstoffe wurden auch im Untersuchungsgebiet Gorleben eingesetzt. In den folgenden Kapiteln werden für diese Spurenstoffe die prinzipielle Methodik und exemplarische Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Gorleben dargestellt.

## D.2 Tritium

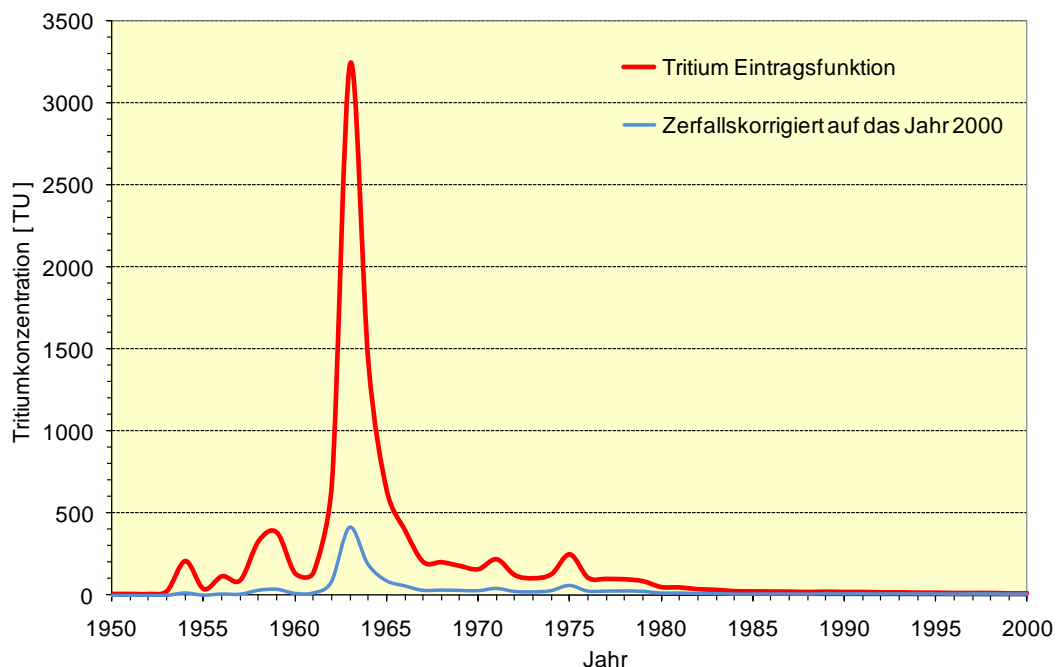
Tritium, das radioaktive Isotop des Wasserstoffs ( $^3\text{H} \equiv \text{T}$ ) wird in der oberen Atmosphäre durch die Höhenstrahlung erzeugt, und zwar hauptsächlich durch Spallation von  $\text{N}_2$  und  $\text{O}_2$ . Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,43 Jahren in das Tochterprodukt  $^3\text{He}$ . Tritium wird nach seiner Bildung zu Wasser oxidiert und nimmt in der Form HTO am irdischen Wasserkreislauf teil, wodurch es über den Niederschlag in Ozean und Grundwasser gelangt.

Die Konzentration von Tritium in Wasser wird durch das Verhältnis von  $^3\text{H}$  zu  $^1\text{H}$  ausgedrückt. Dabei wird 1 Tritiumatom auf  $10^{18}$  Wasserstoffatome als eine „Tritium Unit“ ( $\equiv \text{TU}$ ) bezeichnet ( $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$ ). Die natürliche steady-state Konzentration in der Atmosphäre lag vor Beginn der Atombombentests bei etwa (3 – 5) TU. Durch die Atombombentests in der Atmosphäre, besonders im Zeitraum von 1952 bis 1963, stieg die Tritiumkonzentration im troposphärischen Wasserdampf und in den Niederschlägen um bis zu 3 Größenordnungen an, mit Höchstwerten über 3 000 TU in Mitteleuropa. Seither ist die atmosphärische Konzentration wieder auf Werte von heute, etwa 10 TU in Mitteleuropa abgeklungen. Wegen der kurzen mittleren Verweilzeit von Wasserdampf in der Atmosphäre von lediglich 10 Tagen, befand sich schon 1980 über 95 Prozent des weltweiten Inventars von Bombentritium in den Ozeanen und dem Grundwasser. Dieses anthropogene Bombentritium ist seit den sechziger Jahren als Spurenstoff zur Untersuchung von jungem Grundwasser benutzt worden.

Die direkte Datierung von Grundwasser aufgrund seines Tritiumgehaltes ist durch die hohe örtliche Variabilität des Tritiumeintrags in das Grundwasser mit einigen Unsicherheiten behaftet. Da die generelle Form der Tritiumeintragsfunktion (Abb. D. 2.1) auf der gesamten Nordhalbkugel anzutreffen ist, kann beim Vorliegen einer geschichteten Wasserbewegung durch Bestimmung der Position des Tritium-Maximums die Wasserschicht der Jahre 1963/64 identifiziert werden und anhand dieser Zeitmarke eine abso-

lute Datierung erfolgen. Tritium wird ebenso dazu verwendet, Zumischungen von jungem tritiumhaltigem Wasser der Zeit nach 1950 zu älterem Grundwasser aufzudecken und zu quantifizieren. Letzteres ist möglich, falls der Tritiumgehalt der jungen Komponente bekannt ist.

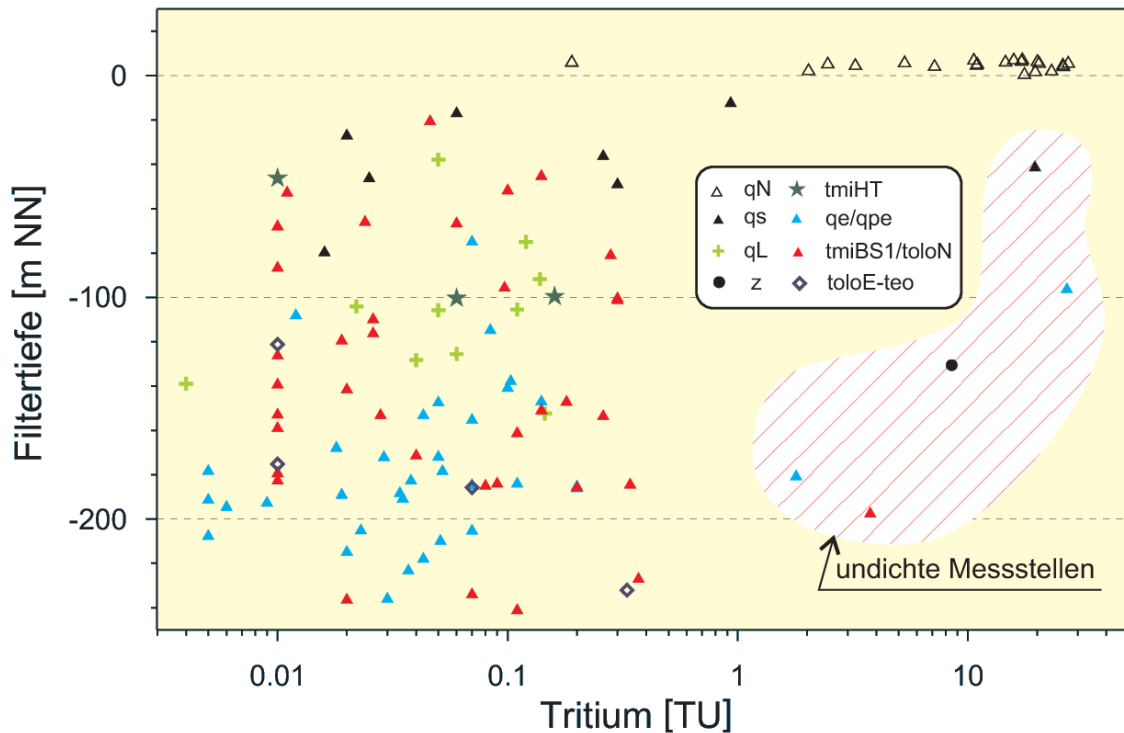
Die Messung von Tritium im Grundwasser erfolgt vor allem auf zwei Methoden. Zum einen durch den direkten radiometrischen Nachweis über den  $\beta^-$ - Zerfall in Low-Level Zählrohren und zum anderen durch eine indirekte Methode über den massenspektrometrischen Nachweis des Zerfallsprodukts  $^3\text{He}$ . Bei der radiometrischen Messung können die Proben entweder direkt gemessen, oder zur Erhöhung der Nachweisgrenze angereichert werden.



**Abb. D. 2.1** Tritiumkonzentration im Niederschlag in Heidelberg /RUE 00/ zur Zeit des Niederschlags (rote Kurve) und zerfallskorrigiert auf das Jahr 2 000 (blaue Kurve)

Abbildung D. 2.2 zeigt die Tiefenverteilung aller gemessener Tritiumkonzentrationen im Untersuchungsgebiet. Einige Messstellen, die durch die schraffierte Fläche gekennzeichnet sind, zeigen verglichen mit anderen Proben aus entsprechenden Tiefen ungewöhnlich hohe Tritiumkonzentrationen. In Verbindung mit der chemischen Zusammensetzung der Wässer kann man auf eine Kontamination durch flachere Grundwässer aufgrund undichter Verrohrungen schließen. Alle anderen tiefen Mess-

stellen zeigen nur geringe Tritiumgehalte, die zum großen Teil unter 0,1 TU liegen und somit auf ein Alter vor 1960 und eine gute Qualität der Verrohrungen schließen lassen, mit einer Zumischung von jungen Wässern unter 1 %. Ein messbarer Tritiumgehalt des Bombentritiumpeaks von 1964 wurde nur bis zu einer Tiefe von etwa 20 Metern gefunden.



**Abb. D. 2.2** Tiefenprofil der Tritiumkonzentration aller Messstellen im Untersuchungsgebiet /KLI 07/

### D.3 Stabile Isotope

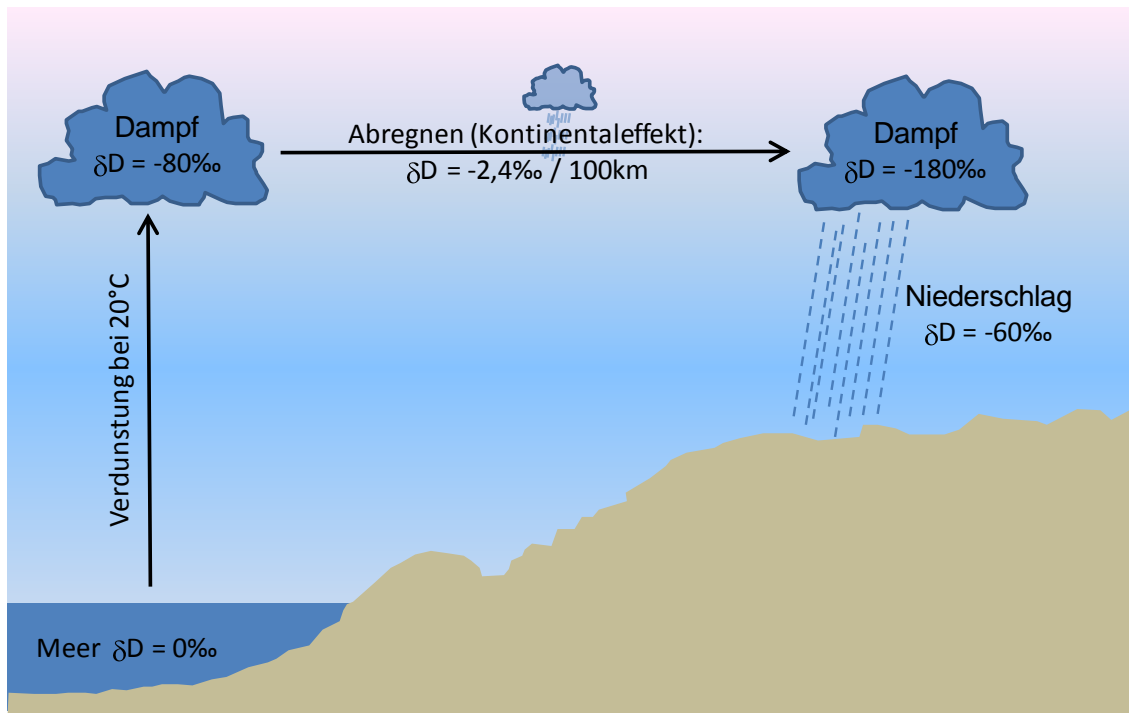
Die Isotopenverhältnisse von  $^{18}\text{O}$  zu  $^{16}\text{O}$  und  $^2\text{H}$  ( $\equiv\text{D}$ ) zu  $^1\text{H}$  am Wassermolekül wurden in vielen hydrologischen Studien untersucht und sind seither unter dem Begriff „stabile Isotope“ bekannt. Als Bestandteil des Wassermoleküls nehmen diese Isotope am gesamten hydrologischen Kreislauf teil. Die Isotopengehalte von Wasser werden üblicherweise als Promille Abweichung  $\delta\text{D}$  bzw.  $\delta^{18}\text{O}$  des jeweiligen Isotopenverhältnisses  $R$  der Probe von demjenigen des Meerwassers  $R_0$  (SMOW = standard mean ocean water) angegeben. Der Nachweis der stabilen Isotope erfolgt massenspektrometrisch.

Die verschiedenen isotopischen Formen von Wasser besitzen einen leicht unterschiedlichen Dampfdruck und Gefrierpunkt. Die Änderung der Isotopenverhältnisse, die durch diese Eigenschaften während Verdunstung, Kondensation, Ausfrieren, Auftauen, chemischer Reaktionen oder biologischer Prozesse auftritt, wird als isotopische Fraktionierung bezeichnet. Der Meerwasserstandard (SMOW) besitzt definitionsgemäß  $\delta^{18}\text{O}$  und  $\delta\text{D}$ -Werte von jeweils 0 ‰. Wasserdampf, der sich aus verdunstendem Meerwasser bildet, ist demgegenüber isotopisch abgereichert. Ein Grund dafür ist der niedrigere Dampfdruck der schwereren Wassermoleküle. Dieser Fraktionierungsprozess wird auch als Gleichgewichtstrennung bezeichnet, da er immer beim Übergang zwischen gasförmiger und flüssiger (oder fester) Phase eintritt. Die Gleichgewichtstrennung ist temperaturabhängig und wird bei höheren Temperaturen kleiner. Die sich daraus ergebenden  $\delta$  Werte von Wasserdampf variieren beispielsweise bei einer Temperaturänderung von  $-20\text{ °C}$  auf  $+20\text{ °C}$  von  $-14\text{ ‰}$  zu  $-9,7\text{ ‰}$  für  $\delta^{18}\text{O}$  und von  $-130\text{ ‰}$  zu  $-78\text{ ‰}$  für  $\delta\text{D}$ , jeweils bezogen auf SMOW als flüssige Phase.

Daneben ist noch die sogenannte kinetische Trennung von Bedeutung, die nur beim Übergang in eine ungesättigte Wasserdampfphase eintritt. Die kinetische Trennung ergibt sich aus den unterschiedlichen Selbstdiffusionskonstanten der schweren und leichten Wassermoleküle: Bei der Verdampfung aus dem Ozean diffundieren die leichteren Moleküle schneller durch die laminar-viskose Grenzschicht zwischen der Wasseroberfläche und der durchmischten Atmosphäre als die schweren Isotope.

Feuchte ozeanische Luftmassen, die kontinental einwärts getrieben werden, werden mit zunehmender Entfernung vom Ozean isotopisch leichter, da die schweren Wassermoleküle bevorzugt kondensieren und ausregnen und bei der Verdunstung bevorzugt in der flüssigen Phase verbleiben. Diese landeinwärtige Abreicherung wird als Kontinentaleffekt bezeichnet und wird durch die Divergenz (Verdunstung – Niederschlag) des horizontalen Wasserdampftransports bestimmt. Dieser atmosphärische Wasserdampftransport drückt sich in der räumlichen Verteilung von Temperatur und Niederschlägen aus und umgekehrt. Die kontinental einwärts beobachtete isotopische Abreicherung zeigt sich in niedrigeren  $\delta$ -Werten. Im Falle junger europäischer Wässer zeigt sich ein Gefälle in den Isotopengehalten von  $\delta\text{D} = -2,4\text{ ‰} / 100\text{ km}$ . Der gesamte Prozess ist schematisch und mit beispielhaften Zahlenwerten in Abbildung D. 3.1 dargestellt.

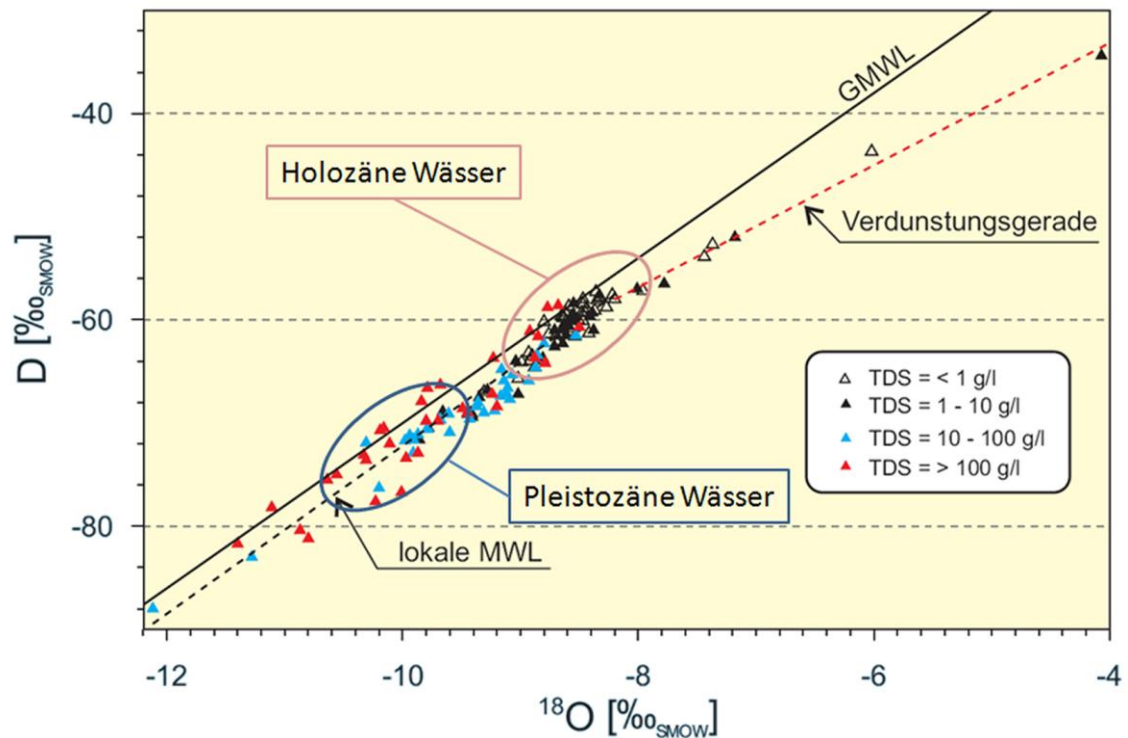
Bei der Grundwasserneubildung werden somit Informationen über die herrschenden Klimabedingungen in der isotopischen Zusammensetzung des Grundwassers gespeichert und die Unterschiede von Wässern, die eiszeitlich oder warmzeitlich gebildet wurden, werden sichtbar. Damit kann eine Alterseinteilung in pleistozäne (> 10 ka) und holozäne Wässer (< 10 ka) vorgenommen werden.



**Abb. D. 3.1** Isotopenfraktionierungsprozesse und Isotopengehalte der stabilen Isotope in unterschiedlichen Reservoirs (die angegebenen Zahlenwerte haben lediglich illustrativen Charakter)

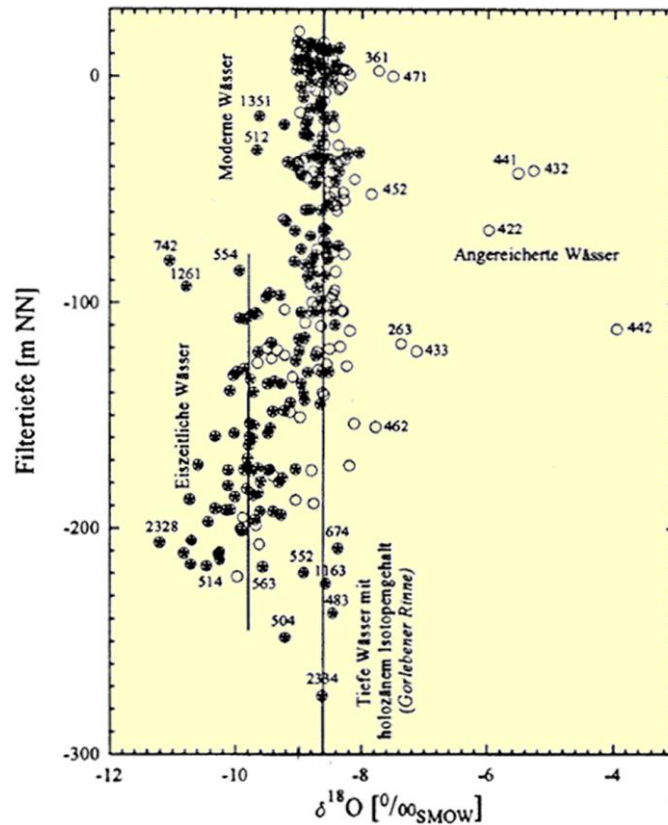
Bei meteorischen, d. h. durch Niederschlag gebildeten Wässern besteht zwischen  $\delta D$  und  $\delta^{18}\text{O}$  meist der lineare Zusammenhang  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ , welcher auch als „global meteoric water line“ (GMWL) bezeichnet wird. Die Steigung dieser Geraden entspricht etwa dem Verhältnis der Gleichgewichtstrennung von D und  $^{18}\text{O}$ , während der sogenannte „Deuterium-Exzess“ von  $10\text{‰}$  auf einen kinetischen Trenneffekt bei der Verdunstung über dem Ozean zurückgeführt wird. Dieser lineare Verlauf zeigt sich auch in Abbildung D. 3.2 für die stabilen Isotopen-Gehalte in Proben aus dem Untersuchungsgebiet. Weiterhin sind in dieser Abbildung die Bereiche markiert, welche holozäne, bzw. pleistozäne Isotopengehalte repräsentieren.





**Abb. D. 3.2** Konzentrationen der stabilen Isotope im Untersuchungsgebiet, nach /KLI 07/

Abbildung D. 3.3 zeigt die Tiefenverteilung der  $\delta^{18}\text{O}$ -Meßwerte aus dem südlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets. Es zeigt sich eine klare Tiefenstrukturierung mit jungen Wässern im flachen Bereich, die Isotopiewerte entsprechend einer holozänen Bildung aufweisen und tiefen Wässern mit Isotopiewerten entsprechend einer spätpleistozänen Bildung. Zusätzlich zeigen sich einige Messstellen in großen Tiefenbereichen, die holozäne Isotopengehalte aufweisen. Diese Messstellen liegen im nördlichen Bereich der Gorlebener Rinne.



**Abb. D. 3.3** Tiefenprofil der  $^{18}\text{O}$ -Konzentration im südlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets /SUC 93/

#### D.4 Radiokohlenstoff

Für die Datierung von Grundwässern mit Radiokohlenstoff ( $^{14}\text{C}$ ) kann zum einen der Kohlenstoffgehalt an anorganischen oder organischen Bestandteilen im Grundwasser herangezogen werden. Im Folgenden wird ausschließlich der gelöste anorganische Kohlenstoffgehalt in Form von  $\text{CO}_2$  betrachtet. Die Datierung von Grundwässern anhand der  $^{14}\text{C}$ -Gehalte im anorganischen, gelösten Kohlenstoff wurde in den 50'er Jahren aufgebracht und hat sich seitdem zu einer weit verbreiteten Methode entwickelt.

Radiokohlenstoff wird ständig in der Atmosphäre durch Kernreaktion von thermischen Neutronen der Höhenstrahlung mit Luftstickstoff ( $^{14}\text{N}(n,p) ^{14}\text{C}$ ) mit einer Erzeugungsrate von ca. zwei  $^{14}\text{C}$ -Atomen pro  $\text{cm}^2$  Erdoberfläche und Sekunde gebildet. Rasch zu  $\text{CO}_2$  oxidiert gelangt  $^{14}\text{C}$  über die Assimilation der Pflanzen in die kontinentale Biosphäre und über den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean in den Ozean. Wegen der im Vergleich zur Umwälzdauer des Ozeans von ca. 1 000 Jahren großen mitt-

leren Lebensdauer des  $^{14}\text{C}$  von  $\tau = 8\,270$  Jahren und wegen der Größenverhältnisse der Kohlenstoffreservoirs befindet sich der irdische  $^{14}\text{C}$ -Bestand zu 96 % im Ozean und nur zu je 2 % im Erzeugerort Atmosphäre und in der Landbiosphäre. Demzufolge haben atmosphärisches  $\text{CO}_2$  und die lebende Biomasse, aber auch aus Wurzelatmung und Humusbildung herrührendes Bodenluft- $\text{CO}_2$  ein einheitliches  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis von  $1,24 \cdot 10^{-12}$ . Dieses Isotopenverhältnis wird mit 100 pmc (per cent modern carbon) bezeichnet und entspricht einer spezifischen  $^{14}\text{C}$ -Aktivität von etwa 225 Becquerel pro Kilogramm Kohlenstoff.

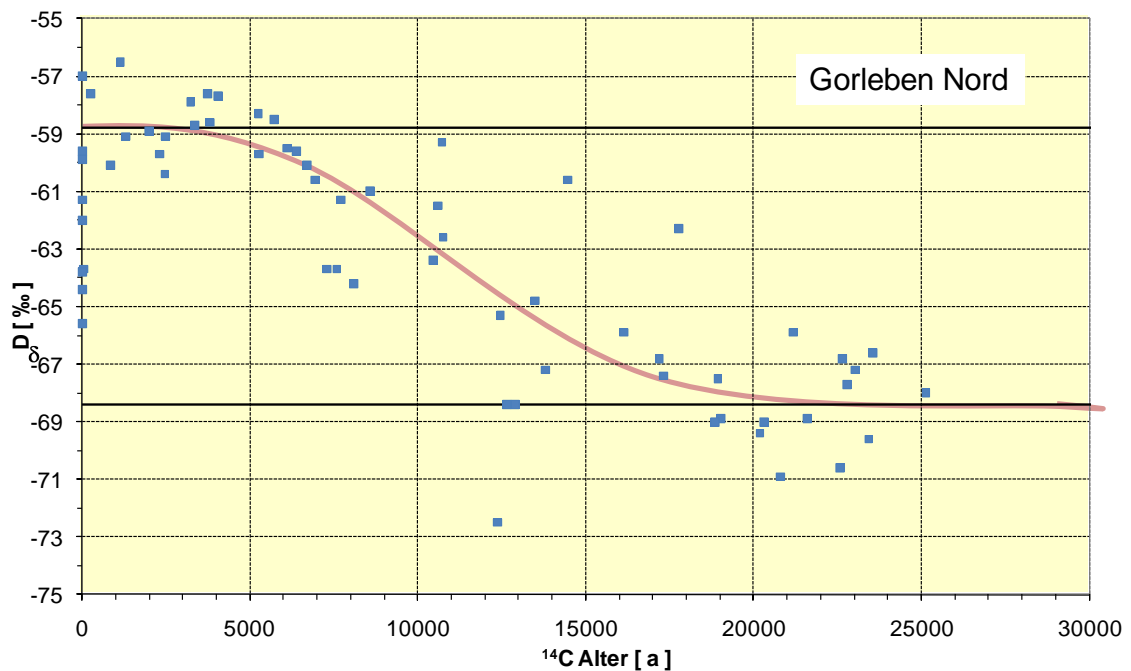
Wird Kohlenstoffmaterial aus dem Kreislauf herausgenommen und damit von der Nachlieferung aus der Atmosphäre abgeschnitten (z. B. durch das Absterben organischer Substanz), so nimmt der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt dieses Materials entsprechend dem radioaktiven Zerfallsgesetz mit der Zeit ab. Auf diesem Sachverhalt beruht die radiometrische  $^{14}\text{C}$ -Datierung. Dabei wird die Annahme gemacht, dass die Abnahme im  $^{14}\text{C}$ -Gehalt ausschließlich auf radioaktiven Zerfall zurückzuführen ist. Die methodischen Schwierigkeiten bei der  $^{14}\text{C}$ -Datierung von Grundwasser beruhen darauf, dass diese Voraussetzung, aufgrund der Fähigkeit des  $\text{CO}_2$  fossilen,  $^{14}\text{C}$ -freien Kalk zu lösen, nicht immer erfüllt ist. Dadurch kann die Anfangskonzentration junger Wässer zwischen 50 pmc und 100 pmc liegen und somit ein formales Alter bis zu 6 000 Jahren aufweisen. Eine eventuelle Zumischung fossilen  $^{14}\text{C}$ -freien Kalks kann unter Umständen am  $^{13}\text{C}$ -Gehalt erkannt werden. Gemessen wird der  $^{13}\text{C}$ -Gehalt als Abweichung in Promille vom Standard PDB (Pee Dee Belemnite, festgelegt nach Belemniten der Pee Dee Formation Nordamerikas).

Für die radiometrische  $^{14}\text{C}$ -Messung wird eine Probenmenge von ca. 200 mmol  $\text{CO}_2$  benötigt. Dazu wird das  $\text{CO}_2$  aus 60 Liter Wasser extrahiert und der  $^{14}\text{C}$ -Gehalt in Low-Level Zählrohren gemessen.

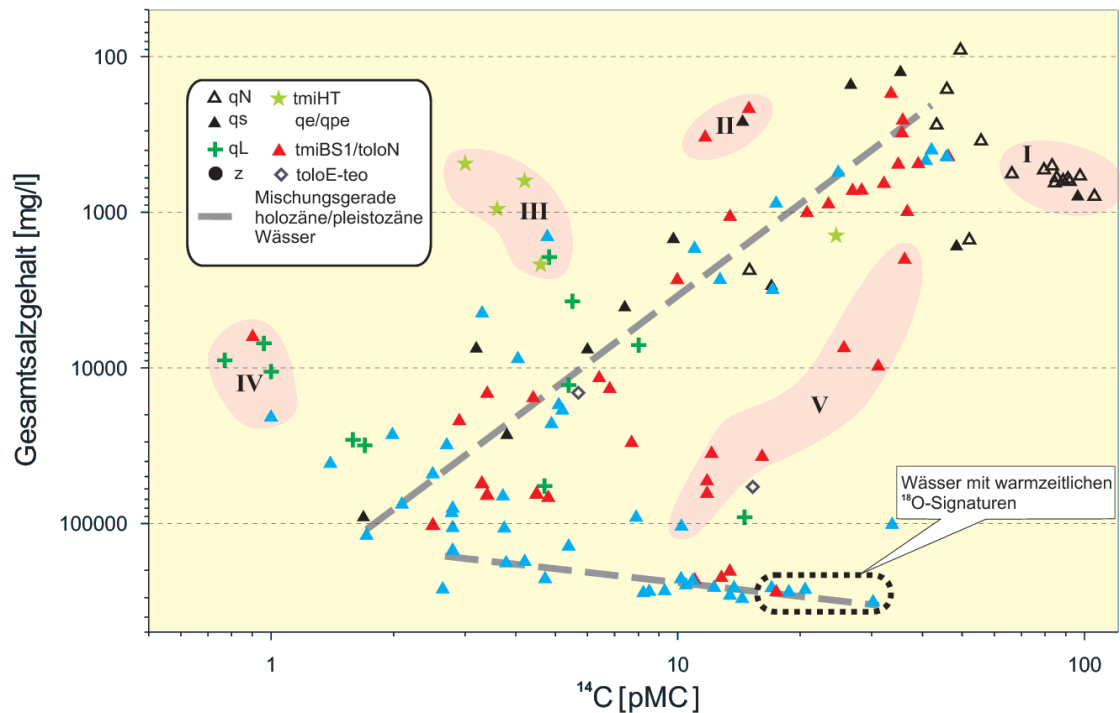
Eine Überprüfung der Plausibilität der berechneten  $^{14}\text{C}$ -Alter lässt sich durch die Auftragung der stabilen Isotope Daten gegen das  $^{14}\text{C}$ -Alter (Abbildung D 4.1) erreichen, wie sie hier für den Teilprobensatz aus dem nördlichen Untersuchungsgebiet vorgenommen wurde. Trotz eines sehr einfachen gewählten Ansatzes zur Berechnung des Modellalters zeigt sich gut der erwartete Übergang von jungen Wässern mit Altern von wenigen 1 000 Jahren und holozänen Isotopengehalten zu Wässern mit Altern größer 20 000 Jahren und spätpleistozänen Isotopengehalten. Der Zeitraum des Übergangs von ca. 8 000 bis 15 000 Jahren vor heute entspricht dem tatsächlichen Übergang der

Weichsel-Kaltzeit zum Postglazial. Die berechneten absoluten  $^{14}\text{C}$ -Alter der Wässer werden also durch die stabilen Isotope bestätigt.

Abbildung D. 4.2 zeigt die Abhängigkeit der  $^{14}\text{C}$ -Konzentration vom Salzgehalt des Grundwassers im Untersuchungsgebiet. Da die Salzgehalte im Untersuchungsgebiet bis auf wenige Ausnahmen mit der Tiefe zunehmen entspricht dies auch weitgehend einer entsprechenden Auftragung mit der Tiefe. Im rechten oberen Quadranten kommen junge Wässer zu liegen, die nur geringe Salzgehalte aufweisen, während im linken unteren Quadranten alte, hochsaline Wässer zu liegen kommen. Die Mischungslinie zwischen diesen beiden Wässern ist als gestrichelte Linie dargestellt. Im rechten unteren Quadranten liegen junge Wässer mit hoher Salinität. Bei diesen – mit einer gestrichelten Ellipse gekennzeichneten Wässern – handelt es sich um tiefe Wässer aus der Gorlebener Rinne, die bei den stabilen Isotopen bereits holozäne Isotopengehalte gezeigt haben. Damit wird deren junges Alter bestätigt.



**Abb. D. 4.1** Konzentration von Deuterium gegen  $^{14}\text{C}$ -Modellalter für die Proben aus dem nördlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets /RUE 00/



**Abb. D. 4.2**  $^{14}\text{C}$ -Konzentration gegen den Gesamtsalzgehalt für die Proben aus dem Untersuchungsgebiet /KLI 07/

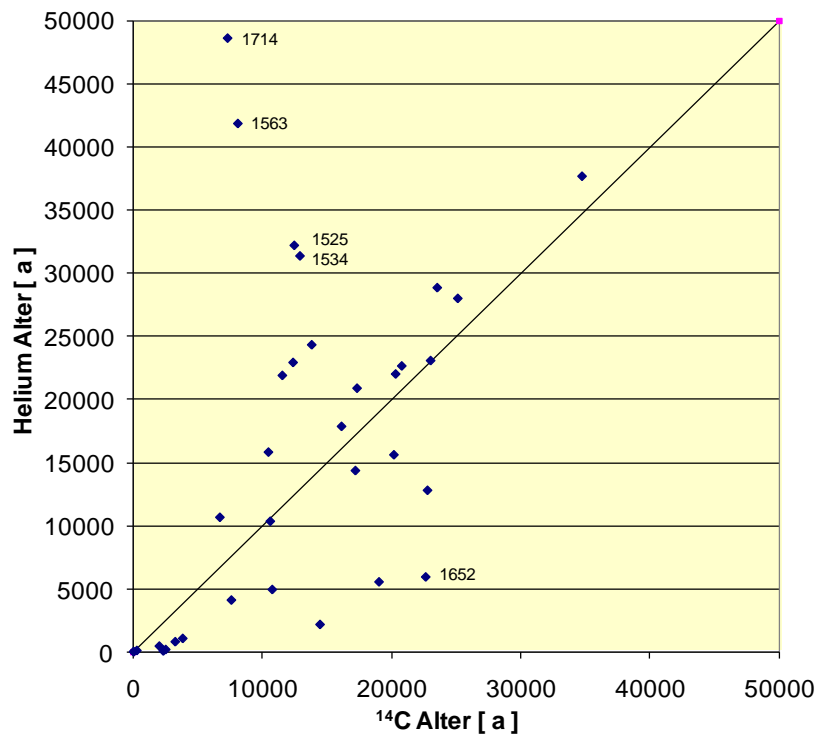
## D.5 Helium

Bei der Neubildung von Grundwasser in der ungesättigten Bodenzone löst sich das atmosphärische Edelgas Helium gemäß seiner Löslichkeit. Die Zusammensetzung der Bodenluft entspricht dabei einer wasserdampfgesättigten Atmosphäre. Sobald das Grundwasser in die Tiefe abtransportiert wird, bleibt seine atmosphärische Heliumkomponente konserviert. Zusätzlich akkumuliert es jedoch im Untergrund auch radiogenes, d. h. aus radioaktiven Zerfällen stammendes Helium. Dieses kann zur Datierung herangezogen werden.  $^4\text{He}$  wird beim Zerfall von Uran und Thorium Mineralien „in-situ“ im Gestein produziert und in das Porenwasser abgegeben.

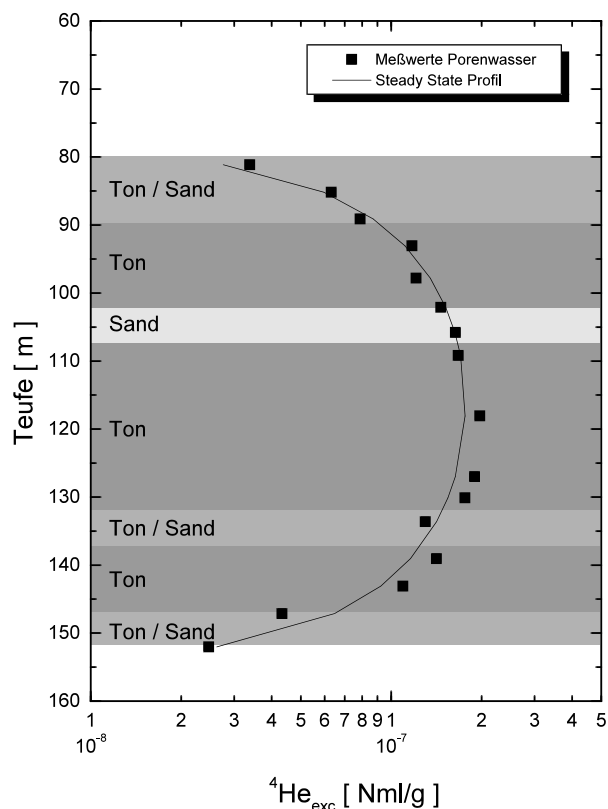
Die Akkumulationsrate, d. h. die Zunahme der Heliumkonzentration pro Gramm Wasser und Jahr lässt sich aus den Uran- und Thoriumkonzentrationen im Gestein berechnen. Aus dem Messwert und der Akkumulationsrate lässt sich dann wiederum ein formales Alter berechnen. Das berechnete Heliumalter ist für die Proben aus dem nördlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets in Abbildung D. 5.1 gegen das  $^{14}\text{C}$ -Alter aufgetragen. Bis auf einige in der Abbildung markierte Proben zeigt sich eine

akzeptable Übereinstimmung zwischen beiden Altersangaben und bestätigt somit die prinzipielle Gültigkeit der Methodik. Ein Problem stellt jedoch dar, dass die Akkumulationsrate von Helium durch das Grundwasser örtlich sehr variabel sein kann und die Altersangaben dadurch deutlich verfälscht werden können.

Eine besondere Stärke der Anwendung von Helium als Spurenstoff liegt in der Untersuchung der gelösten Heliumgehalte im Porenwasser gering permeabler Gesteine oder Sedimente. Abbildung D. 5.2 zeigt den Heliumgehalt im Porenwasser einer geringwasserleitenden Tonschicht, dem Lauenburger Ton. Die Heliumakkumulationsrate ergibt sich hier direkt durch die lokale Produktion und ist durch die Messung der Uran- und Thoriumgehalte der Tonschichten direkt bestimmbar. Aus der Form des Heliumprofils lässt sich in diesem Fall ableiten, dass das Porenwasser in den Lauenburger Tonschichten praktisch stagniert und für den Transport des gelösten Heliums die Diffusion den dominierenden Transportmechanismus darstellt.



**Abb. D. 5.1** Heliumalter gegen das <sup>14</sup>C-Alter für die Proben aus dem nördlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets /RUE 00/



**Abb. D. 5.2** Profil der Heliumkonzentration im Porenwasser des Lauenburger Ton für die Bohrung GoHy 1623 /RUE 00/

## D.6 Zusammenfassung

Isotopenuntersuchungen sind generell ein hilfreiches Mittel zur Charakterisierung der Grundwasserbewegung und zur Bestimmung von Grundwasseraltern. Im Untersuchungsgebiet Gorleben wurden die Spurenstoffe Tritium, Radiokohlenstoff und Helium, sowie die stabilen Isotope erfolgreich angewendet. Bei der Bestimmung von Grundwasseraltern ist zu beachten, dass es sich dabei im Allgemeinen um ein Modellalter handelt. Aus diesem Grund und aus der Tatsache, dass sowohl die Eintragsfunktion, wie auch weitere die Konzentration der Spurenstoffe beeinflussende Prozesse oft nicht hinreichend genau bekannt sind, sollten die Ergebnisse einzelner Isotopen als Tracer mit Vorsicht betrachtet werden. Vorzugsweise ist die gemeinsame Betrachtung mehrerer Isotopentracer zu berücksichtigen. Insbesondere sollten die aus den Konzentrationen der Isotopen gewonnenen Ergebnisse im Zusammenhang mit der hydrogeologischen „Gesamtschau“ betrachtet werden.

Für das Untersuchungsgebiet Gorleben zeigt sich ein komplexes Bild der Isotopensignaturen und Grundwasseralter, was die ebenfalls komplexen Grundwasserfließverhältnisse widerspiegelt. Als generelle Tendenz lässt sich mit einzelnen Ausnahmen festhalten, dass die Oberflächenwässer warmzeitliche Signaturen und junge Alter zeigen und dass das Grundwasseralter mit der Tiefe zunimmt. Die benannten Ausnahmen müssen im hydrogeologischen Kontext erklärt werden.

## D.7 Literatur

- /KLI 07/ Klinge, H.; Boehme, J.; Grisseemann, C.; Houben, G.; Ludwig, R.R.; Rübel, A.; Schelkes, K.; Schildknecht, F.; Suckow, A. (2007): Standortbeschreibung Gorleben: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Band 71, E.Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- /RUE 00/ Rübel, A. (2000): Stofftransport in undurchlässigen Gesteinsschichten – Isotopenuntersuchungen im Grund- und Porenwasser. Der Andere Verlag, Osnabrück.
- /SUC 93/ Suckow, A. (1993): Isotopenhydrologische und Edelgaspaläotemperatur – Untersuchungen im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben. Dissertation; Naturwissenschaftliche – Mathematische Gesamtfakultät; Universität Heidelberg.



## **E On the Hydrological Situation in the Gorleben Aquifer System**

G. Buckau<sup>1</sup>, M. Wolf<sup>2</sup>, S. Geyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Nukleare Entsorgung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

<sup>2</sup> Helmholtz Zentrum München, Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

<sup>3</sup> Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ)

### **E.1 Abstract**

The Gorleben site is a candidate for a German nuclear waste repository. The repository is planned for at about 800 m depth in the central part of the Gorleben salt dome. The aquifer system surrounding and overlying the salt dome has been investigated and a huge database has been gathered. The investigations came to a halt about ten years ago due to a moratorium. In the meantime there have been important general developments in the field of isotope hydrology and geochemistry. Several papers specifically on the Gorleben site have also been published these past ten years. The present paper presents a reassessment of existing data. It is shown that there is a significant vertical groundwater exchange. There are still parts of the aquifer system and data that have not been systematically analyzed by the more recent approaches discussed in this paper. Taking into account the overall progress in process understanding, the entire set of available data and their interpretation would be desired for updating the hydrological site description.

### **E.2 Introduction**

The Gorleben salt dome has been under investigation for its potential use as a nuclear waste repository since 1977. The investigations are presently subject to a moratorium. Parts of the investigations around the safety functions of such a repository have dealt with the aquifer system surrounding and overlaying the salt dome. One question around the Gorleben aquifer system concerns the extent of vertical groundwater exchange. The present paper discusses this question with emphasis on isotope hydro-geochemical data. Presently, there is a moratorium against investigations of the Gorleben site in view of its possible use for a nuclear waste repository. If this moratori-

um is lifted, then a reassessment of existing data will be necessary for updating the site description.

The objectives of this paper are to assess the state of knowledge about the Gorleben aquifer system, focussing on isotope hydro-geochemical data. The assessment is based on chemical components (Cl, Ca and Na) in the groundwater, as well as  $^2\text{H}$  (Deuterium),  $^3\text{H}$  (Tritium),  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , and  $^{34}\text{S}$ . With respect to  $^{14}\text{C}$ , groundwater dating via  $^{14}\text{C}$  decay is discussed. In addition, the identification of origin/recharge history from the  $^{14}\text{C}$  source term is separately dealt with. Overall applicability and limitations of the different evaluation approaches is also discussed.

With respect to the  $^{14}\text{C}$  content, there are two basically different approaches. Traditionally, focus has been on the  $^{14}\text{C}$  decay. The other approach is to focus on the isotopic composition of carbon (both  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$ ), together with the amount/concentration of the carbon inventory. In this latter case, the carbon inventory is used as an “indicator” for different origin and recharge conditions. Typical examples are that the concentration of  $^{14}\text{C}$  entering the groundwater region from land under intense agricultural use is much higher than the corresponding concentration entering from a forest (see section E.4.4).

If the studies focus on the decay of  $^{14}\text{C}$ , the dating has two major restrictions. These restrictions are that (i) groundwater which is young compared to the half-life of  $^{14}\text{C}$  cannot be dated, and (ii) not the groundwater but the carbon inventory is dated. With respect to the latter, if a water is a mixture of two sources, one recent recharge carrying a carbon inventory of young age, and old glacial melt-water, then the contribution by the old glacial melt-water does not appear in the  $^{14}\text{C}$  analysis. The reason is that the glacial melt-water has a much lower carbon inventory than modern recharge.

In some aquifer systems, recognition is given to the groundwater being the result of mixing of several different recharge components. The different components are identified and quantified in a given groundwater by principle component analysis. As seen from the Forsmark investigation program within the Swedish site selection program, the groundwater is a mixture of different recharge sources with different carbon inventory characteristics /SME 08/. Direct application of the  $^{14}\text{C}$  content for dating of the groundwater mixture is not feasible. On the other hand, the age of the different components to a large extent is known because of their origin/formation history.

In summary, dating of groundwater by  $^{14}\text{C}$  decay is restricted to groundwater with a significant age relative to the half-life of  $^{14}\text{C}$ . Furthermore, processes leading to the present  $^{14}\text{C}$  content, other than the radioactive  $^{14}\text{C}$  decay must be known and quantifiable. The other approach is to use the carbon inventory, including concentration,  $^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  content, as an indicator for the origin. Thereby, the two main restrictions of evaluation via the  $^{14}\text{C}$  decay are overcome. First, groundwater can be dated if the total inventory and the isotopic composition can be correlated with different recharge conditions. This extends the time span where  $^{14}\text{C}$  can be effectively used to time ranges for which information is available concerning historical events and developments. Such events can be very recent relative to the half-life of  $^{14}\text{C}$ . Furthermore, the mixing with groundwater components that are basically free from a carbon inventory will appear in the analysis. If possible, a combination of analysis with respect to potential  $^{14}\text{C}$  decay and the use of the carbon inventory as an indicator should be used. Below, application of the two different approaches to groundwater from the Gorleben site is discussed.

### **E.3 Approach and data**

Existing data are analyzed in view of the come-about of the present situation in the Gorleben aquifer system. Data originate especially from a Gorleben Data-Base /GDB/ but also different publications and reports as cited. There are several measurements from the different sampling wells. Selection of data is based on comparing the different values, taking into account accompanying information concerning defect sampling wells and their repair, as well as plausibility test comparing data from different sampling occasions. General understanding of the site conditions and the historical development are essential elements in the analysis. In addition to stable and radioactive isotopes, the chemical composition is regarded where useful. Focus of the isotope data are on the stable water isotopes ( $^{18}\text{O}$  and Deuterium), Tritium and the  $^{13}\text{C}$  and  $^{14}\text{C}$  carbon isotopes, as well as  $^{34}\text{S}$ . Contrary to many studies of the carbon inventory, the present paper does not only look to the  $^{14}\text{C}$  decay, but also on the identification of different origins by the characteristics of the carbon inventory. The influence of organic carbon has also been identified in the past two decades, especially in view of identifying geochemical processes influencing the overall carbon inventory, its concentration and isotopic composition /BUC 00a,b,c,d,e/.

In some cases data and findings from reference aquifer systems are used for the discussion. These are "Munich" and "Fuhrberger Feld". Information on these sites can be

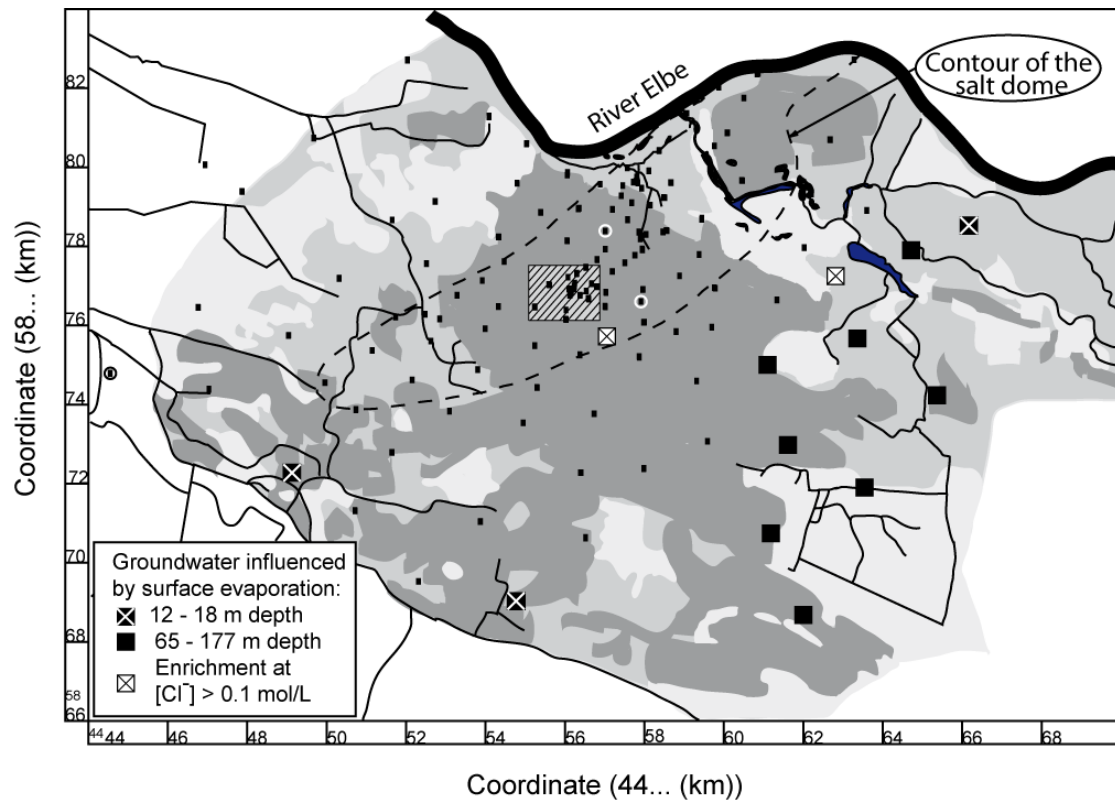
found in /KIM 95/. Reference is also made to the Forsmark site within the Swedish site selection program /SME 08/.

#### **E.4 Results and discussion**

In fig. E. 4.1 the Gorleben investigation site is shown. The different shading is related to an increased recharge with darker tones. Small black squares show the position of groundwater sampling wells. In most cases there are three or four sampling depths per position. There are also additional samples marked for groundwater affected by surface evaporation at the time of its recharge. These signatures are given by the deviation from the local water line and the  $DI^{14}C$  load ( $^{14}C$  load with dissolved inorganic carbon) /BUC 03/. These data points will be discussed further below.

In the central part above the salt dome, a specific investigation area is marked by a lined square. In this area there is a high density of sampling wells. The area is also of interest as it is situated just west of the Gorleben Channel (cf. fig. E. 4.13). This area has been subject to more detailed analysis of chemical and isotope data /BUC 00a, BUC 04/.

The results and discussion on the hydrological situation in the Gorleben aquifer system is divided into (i) the general description specifically based on the deuterium and  $^{18}O$  content, the conservative chloride tracer and fall-out tritium, (ii) the reason for the high concentrations of dissolved inorganic and organic carbon in the Gorleben aquifer system, focussing on the role of sulphate, and (iii) different approaches for analyzing the carbon inventory. The discussion of the carbon inventory is made along with the two very different ways of approaching it, namely (a) the use of the half-life of  $^{14}C$  in order to date a groundwater (or rather date the carbon inventory), and (b) to determine different carbon inventory source terms, relate these to historical events or conditions, and deduce the age of a groundwater to the time and conditions of its recharge. The non-radioactive  $^{13}C$  is used in the latter sense, whereas  $^{14}C$  with its half-life of 5 730 years has received a lot of attention for radiocarbon dating. In this paper it is also discussed that the radiocarbon dating of groundwater has been flawed by incorrect assumptions concerning the source term with recharge water. Simultaneously, it is shown that  $^{14}C$  can be used very effectively to identify the groundwater origin based on the characteristics of the source term.



**Fig. E. 4.1** The Gorleben aquifer investigation area south of the river Elbe with the recharge conditions, the contour of the underlying salt dome and surface water bodies. The different positions of wells for groundwater sampling are given as small black squares. Larger squares mark groundwater affected by substantial evaporation on the land surface prior to its recharge. In addition, a part of the aquifer in the central part of the figure where specific studies were conducted is marked as a lined square. Three encircled points (two in the centre above the salt dome, and one at the western edge of the map) show samples with exceptionally high  $^{18}\text{O}$  depletion relative to other waters at that depth (see text)

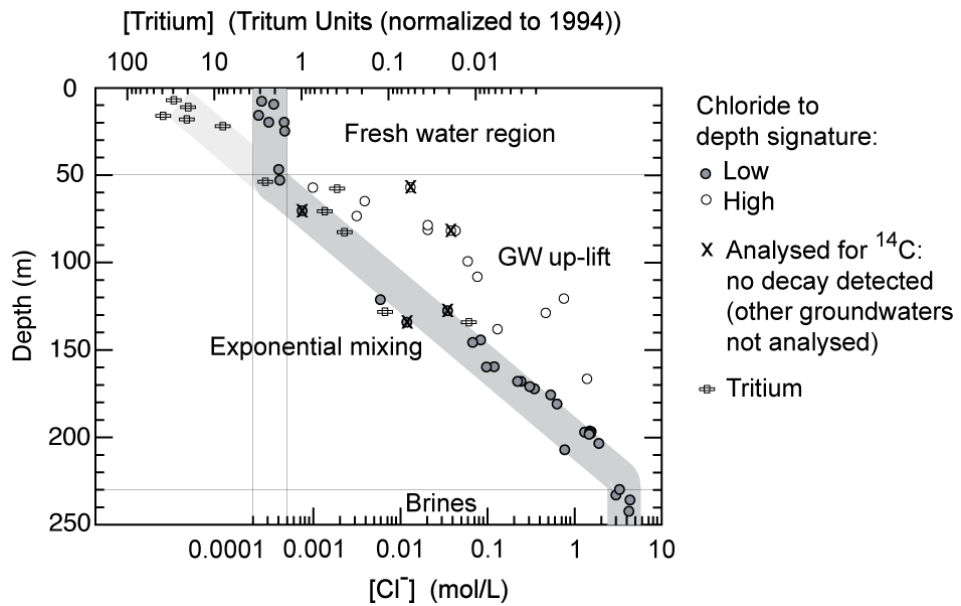
#### E.4.1 General hydrological situation

The stable water isotopes ( $^{18}\text{O}$  and Deuterium), the ideal tracers Tritium and Chloride as well as the Ca concentration, and the position including the depth of the sampling points, are used for general description of the hydrological situation.

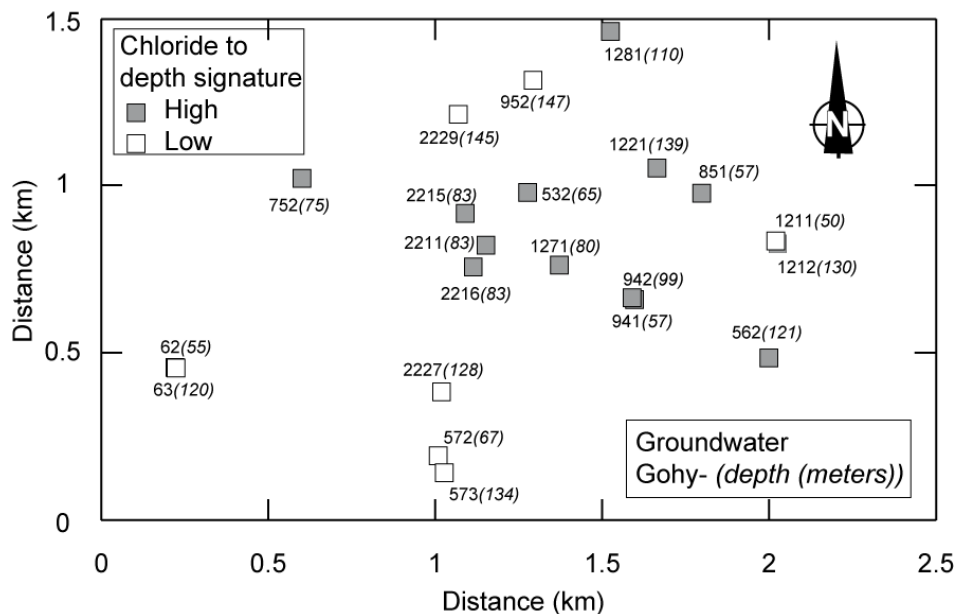
#### **E.4.1.1 Vertical mixing: Chloride and fall-out tritium distribution with depth**

In fig. E. 4.2, the vertical mixing of groundwater is shown for the special investigation area shown by the lined square in fig. E. 4.1. The concentration of fall-out tritium shows an ideal mixing with depth. The logarithm of the tritium concentration decreases linearly with depth, representing ideal exponential intermixing of fall-out tritium in the recharge water with tritium free deep groundwater. The ideal in-mixing of fall-out tritium can be followed to a depth of 140 m. The chloride profile shows the same principle depth dependency as Tritium. For Chloride, however, there is a fresh water region with constant low chloride concentrations down to 50 meters depth. Below 230 m depth, there are salt saturated brines. Between 50 and 230 m depths the chloride profile shows an ideal mixing of these two upper and lower components.

Some of the water samples show higher chloride concentrations relative to the depth. These groundwater samples are located especially in the middle of the special investigation area, but not in the south along the ring-wall (fig. E. 4.3). This is due to water movement from the adjacent Gorleben Channel /BUC 04/. As expected, these “up-lift waters” are free from fall-out tritium. An additional observation is that the dissolved inorganic carbon (DIC), analyzed for samples down to a depth of 140 m, does not show significant  $^{14}\text{C}$  decay. The overall conclusion from analysis of fig. E. 4.2 and fig. E. 4.3 is that there is no effective hydrological barrier separating different groundwater layers in this “special investigation area”. The question now is if these observations can be extended to other parts of the overburden.



**Fig. E. 4.2** Special investigation area shown in fig. E. 4.1: Mixing of the ideal tracers Chloride and Tritium between recharge freshwater reaching down to a depth of 50 metres, and saturated brines up to a depth of 230 m. Both ideal tracers fall on an ideal exponential mixing line, with fall-out tritium observed down to a depth of 140 metres. In addition, in the central part, but not along the “ring wall” (cf. fig. E. 4.13), just west of the “Gorleben Channel”, up-lift of tritium free saline water is observed



**Fig. E. 4.3** Special investigation area shown in fig. E. 4.1: Location of high and low Chloride to depth signature (see fig. E. 4.2). High Chloride to depth profile waters are specifically found at the western edge of the Gorleben Channel, but not at the inside of the Ring-Wall (cf. fig. E. 4.13) in the south of the special investigation area /BUC 04/

#### E.4.1.2 $^{18}\text{O}$ depth distribution

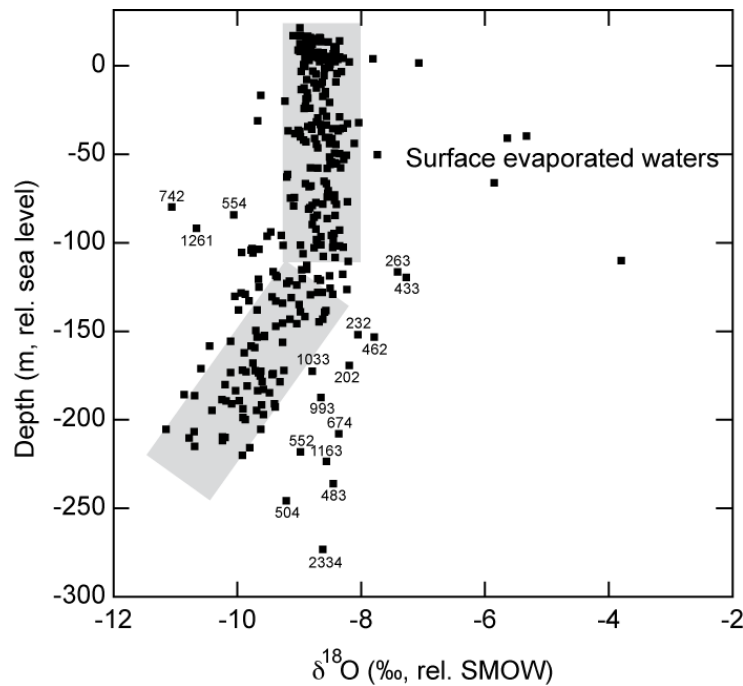
One way to identify vertical groundwater exchange is to look at the  $^{18}\text{O}$  depth profile. In fig. E. 4.4, the  $^{18}\text{O}$  concentrations of groundwater samples from the entire investigation area are shown against the sampling depth. The waters can be divided into four different groups, namely:

1. Those showing a common “Holocene” character (or rather present recharge character), down to about 120 m depth followed by an increasing depletion in the  $^{18}\text{O}$  content with increasing depth (grey shading),
2. Waters subject to surface evaporation in association with its recharge, found in the south-east and east of the investigation area /BUC 03/,
3. Samples below 115 m depth with an elevated  $^{18}\text{O}$  content, relative to “the general trend” (marked with the individual sampling well number), and
4. Three groundwater samples at around 70 to 100 m depth, with comparably high  $^{18}\text{O}$  depletion (Gohy-554, 742 and 1281, as marked in the figure).

The first group of waters are illustrated by the grey shading in fig. E. 4.4. In the upper part of the aquifer system, the  $^{18}\text{O}$  content varies between about -8 and -9 ‰, representing present recharge and the present Holocene conditions. With increasing distance from the sea, and with increasing elevation, the water in the atmosphere becomes progressively depleted in  $^{18}\text{O}$ . This is due to preferential precipitation of  $^{18}\text{O}$  compared to  $^{16}\text{O}$ . During Pleistocene, the distance to the sea was much larger than present. Consequently, in a given place, Pleistocene precipitation will be more depleted in  $^{18}\text{O}$  than present one.

With respect to fig. E. 4.4, the common trend between depth and increasing  $^{18}\text{O}$  depletion found for the bulk data as the depths increases beyond approximately 120 m, may thus be explained as an increasing portion of Pleistocene recharge origin. There is no indication for a pure Pleistocene component, i. e. no cluster of samples with a lower limit for the  $^{18}\text{O}$  concentration. There is also no other process identified that could lead to the increasing  $^{18}\text{O}$  depletion with increasing depth and salt content. For this reason, again it may be assumed that the observed trend of these waters is related to mixing with remaining water from Pleistocene recharge.





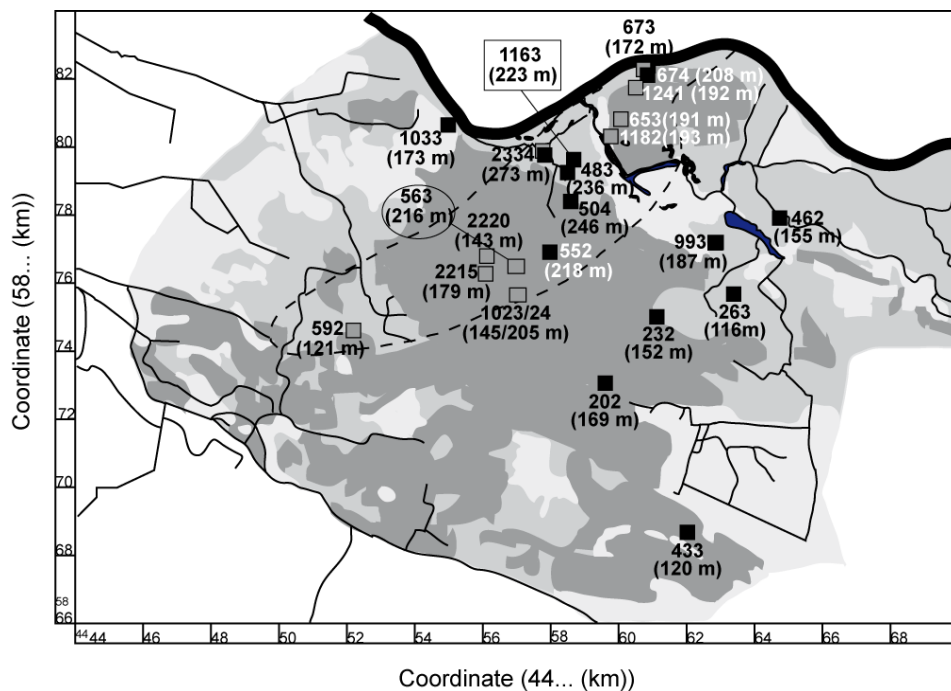
**Fig. E. 4.4** The  $^{18}\text{O}$  content of Gorleben groundwater at different depth. The bulk of data fall on a vertical band representing modern Holocene recharge, and another band representing progressive  $^{18}\text{O}$  depletion with increasing depth. One group of data show recharge evaporation affected groundwater from moderate depth at the south and east part of the aquifer system. Three data point show high  $^{18}\text{O}$  depletion compared to other groundwater at 70 – 100 metres depth. Other groundwater samples show a comparably high  $^{18}\text{O}$  content, relative to other groundwater samples from depths below 150 meters (see fig. E. 4.5)

The second group of waters listed above, i. e. waters identified to be subject to surface evaporation prior to recharge, are described in /BUC 03/. These waters originate from wetland conditions, presumably prior to drainage of the recharge area south-east of the salt-dome /BUC 03/. The first criterion used in that study was that the  $^{18}\text{O}$  content is higher than the typical range of Holocene waters. This criterion may fail if in deeper waters, surface evaporated water is mixing with a Pleistocene signature. Despite being affected by surface evaporation, then the mixture may show a typical Holocene value. Waters that could be either Holocene recharge at great depth, or a mixture of Pleistocene waters and groundwater affected by surface evaporation upon its recharge (the third group of waters listed above) are further discussed below.

Finally, the fourth group of waters identified in fig. E. 4.4, are three water samples indicating strong impact of uplifting Pleistocene waters. These samples are found in the

centre of the overall investigation area and at its very western border (encircled points in fig. E. 4.1). The two samples in the centre part of the investigation area support the findings discussed above, namely that there is considerable groundwater mixing in the area inside the so-called Ring-Wall (quaternary basis, see fig. E. 4.13), especially in and adjacent to the Gorleben Channel.

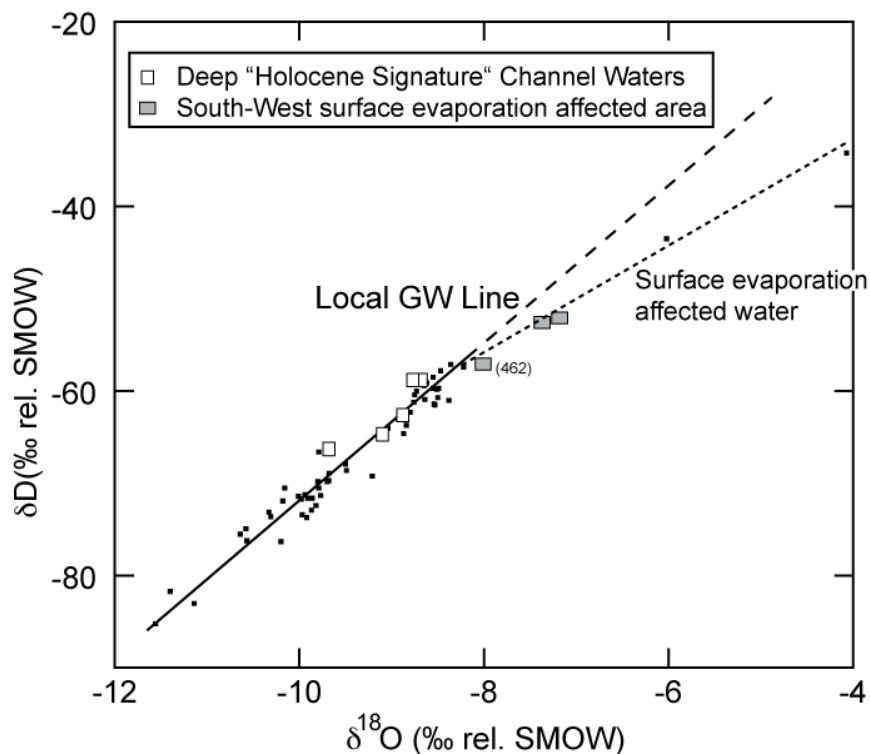
The locations of the samples with a Holocene signature below 115 m depth are shown in fig. E. 4.5 (black squares). As already mentioned above, these samples are of specific interest for possible identification of considerable vertical water movement. The samples fall into two groups, namely (i) those in the south-east and east where surface evaporation affected water have been identified previously /BUC 03/, and (ii) in the Gorleben Channel including Gohy-1033 that is fed with water from the channel. The finding that surface evaporation affected water is present at depth in the south-east and east of the aquifer system is plausible /BUC 03/. The question is if this is also the case for the waters in the Channel. The answer is given in the next section.



**Fig. E. 4.5** Origin of groundwater samples showing a comparably high  $^{18}\text{O}$  content, compared to other groundwater samples from depths below 115 m (cf. fig. E. 4.4) (black squares), and those showing a comparably high chloride and/or calcium content relative to their depth (cf. fig. E. 4.7 and fig. E. 4.8)

**E.4.1.3 Surface evaporation of recharge water**

For those samples where both  $^{18}\text{O}$  and Deuterium content are known, these values can be used for establishing the local groundwater line and to identify groundwater deviating from this line (fig. E. 4.6). As known since 1961, the isotopic composition of atmospheric humidity on its way from the sea to a specific point above land, due to progressive precipitation is changing along a Global Meteoric Water Line (GMWL) /CRA 61/. With increasing loss of water, with preference for loss of  $^{18}\text{O}$  and D, leading to their increasing depletion compared to  $^{16}\text{O}$  and H, this GMWL is formed. The original formulation of this relationship between joint depletion in  $\text{O}^{18}$  and D was given as:  $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$  /CRA 61/. In a specific investigation area, a comparable local groundwater line is identified. Significant deviations are found where an additional process takes place, namely evaporation of water on the earth surface. In such cases, there is a stronger enrichment in  $^{18}\text{O}$  than in D. All these processes are found for the data from the Gorleben site (fig. E. 4.6).



**Fig. E. 4.6** The local groundwater line with sampling points from the Gorleben aquifer system (see text)

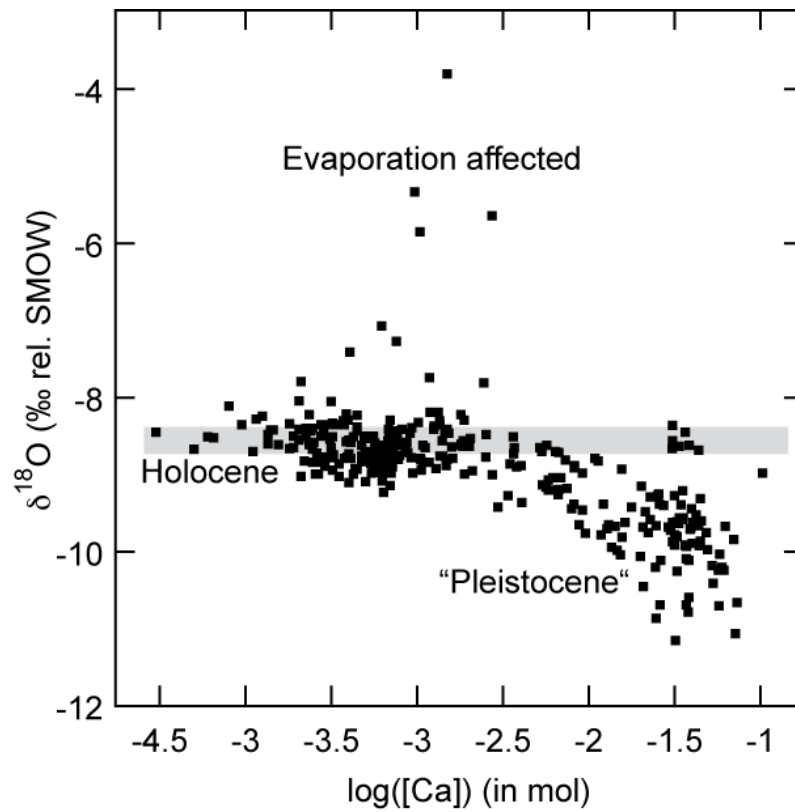
The bulk of the data form a local groundwater line, representing different degrees of joint depletion in Deuterium and  $^{18}\text{O}$ . Some points are typical for groundwater that was

affected by surface evaporation prior to recharge. Also the point very close to the local groundwater line (Gohy-462 at 155 m depth towards the north-east) can be allocated to this group of surface evaporation affected groundwater. This would not be possible without the context of other waters in this area being affected by evaporation prior to recharge.

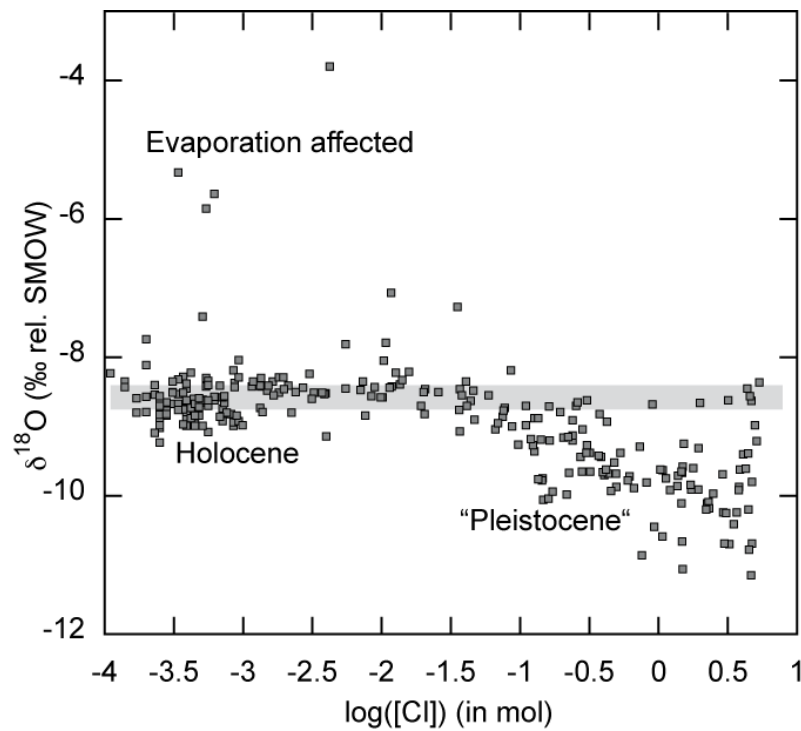
It is seen that, as expected, the water samples from the south-east and east, including discharge towards the north-east /BUC 03/ coincide with the surface evaporation deviation from the local groundwater line. Contrary to this, the water samples from the Channel fall on the local groundwater line, with no indication for influence by surface evaporated recharge. It is assumed that the surface affected groundwater found south-east and east of the salt dome originates from a previous wetland in the south-east, that was drained 260 – 300 years ago /BUC 03/. Such recharge conditions obviously do not apply for the Channel water.

#### **E.4.1.4 Ca and Cl concentration with $^{18}\text{O}$**

The above analysis shows that the vertical groundwater exchange is significant. The groundwater with Holocene signature at depths below 115 m are not artefacts of mixing between surface evaporated recharge water and Pleistocene ones, but carry their recent recharge signature even beyond 250 m depth (fig. E. 4.4). This leads to the expectation that there should be highly saline groundwater with Holocene signature. In fig. E. 4.7 and fig. E. 4.8, the Ca and Cl concentrations are plotted against the  $^{18}\text{O}$  signature. The two figures show that there are water samples with high Ca and Cl concentrations, combined with Holocene  $^{18}\text{O}$  signature. These points are shown as grey squares in fig. E. 4.5.



**Fig. E. 4.7** Identification of groundwater with comparably high Ca content and Holocene  $^{18}\text{O}$  signature



**Fig. E. 4.8** Identification of groundwater with comparably high Cl content and Holocene  $^{18}\text{O}$  signature

The grey squares in fig. E. 4.5 fall into two groups. The first group coincides with the uplift of water at the western border of the Gorleben Channel (cf. “special investigation area” discussed above). This groundwater uplift area has already been identified by the elevated Cl concentrations as a function of depth, compared to other waters in the direct vicinity (fig. E. 4.2 and fig. E. 4.3, and /BUC 04/). The other group of groundwater with a Holocene  $^{18}\text{O}$  signature combined with high salinity is found below a local recharge area adjacent to the river Elbe (“Höhbeck”) (see fig. E. 4.5). This hill with an elevation of 76 m above sea level has been a recharge area where part of the water is presumably discharging in the river Elbe, and with part of the water flowing into the channel towards the south, and also exiting the channel towards the west (see Gohy-2334 and -1033 in fig. E. 4.5).

Gohy-592 at the southern end of the channel also shows the combination of Holocene  $^{18}\text{O}$  signature and high salinity at 121 m depth. The hydrological situation leading to this signature is not clear from the present analysis.

The overall hydrological assessment of the parts of the Gorleben aquifer system discussed in this paper shows considerable horizontal and vertical groundwater movement and exchange. With respect to the area above the salt dome, there seems to be no effective hydrological barrier between the different groundwater horizons. In the south-east and eastern part, there is a penetration of present Holocene signature groundwater down to about 60 m depth, with surface evaporation affected groundwater below this level. Also here there is no evidence for an effective hydrological barrier.

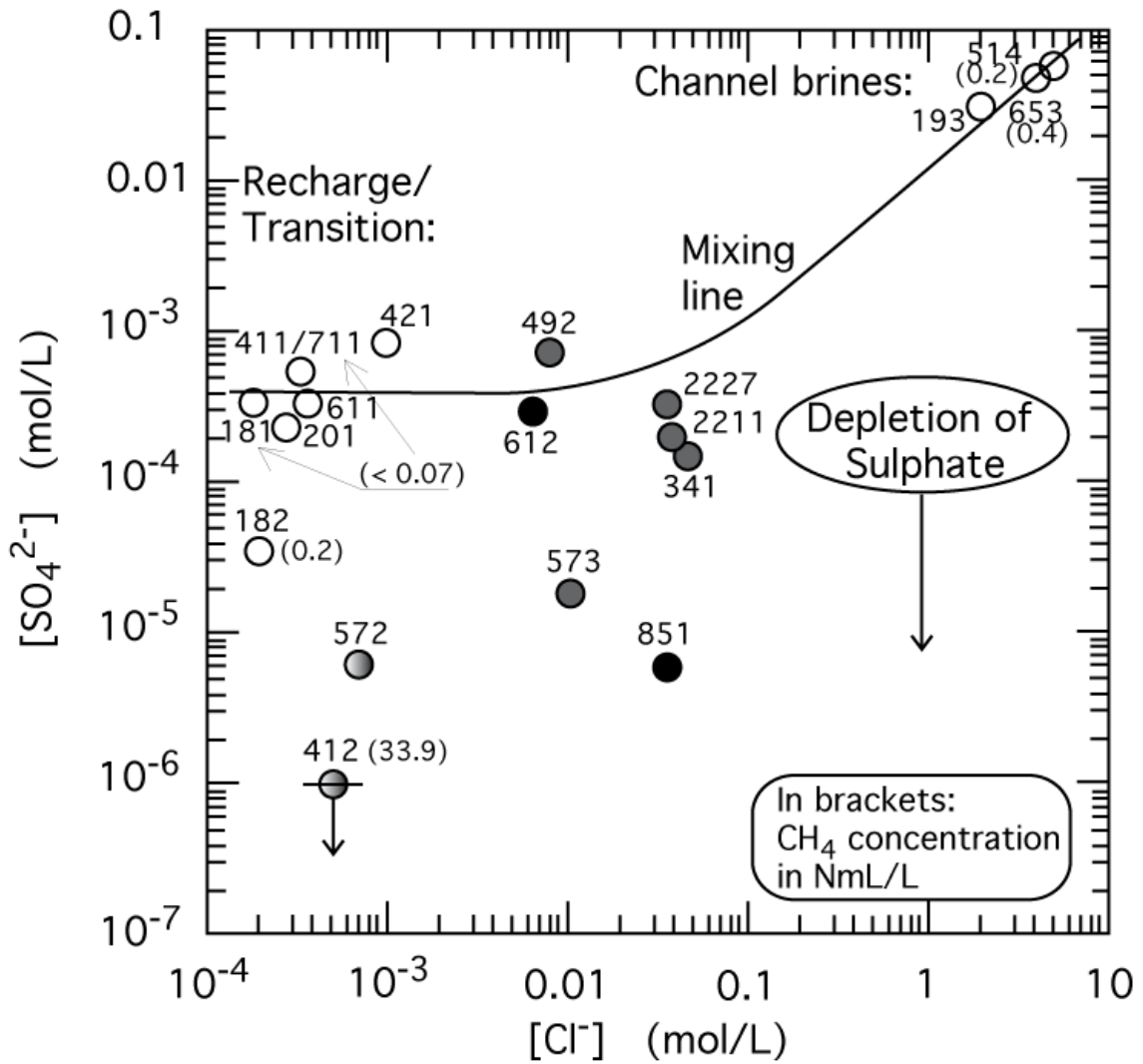
#### **E.4.2 Process generating high dissolved inorganic and organic carbon**

In section E.4.3, different approaches for analysis of dissolved inorganic and organic carbon in the Gorleben aquifer system are discussed. In this context it is important to know that groundwater in the Gorleben aquifer system can have very high inorganic and organic carbon content. The dissolved organic carbon concentrations reach as high as close to 200 mg C/L /ART 00/. With about 50 % carbon content in humic and fulvic acids, and about 90 % of the dissolved organic carbon being represented by these two natural acids, such absolutely black coloured groundwater has around 0.4 g humic and fulvic acid per litre. A key question is why there are so high concentrations of dissolved inorganic and organic carbon in the Gorleben aquifer system. This is discussed in detail in /BUC 00c/. Below the role of sulphate is discussed for identification

of the process, especially as the sulphate is provided in high concentrations from the salt dome dissolution.

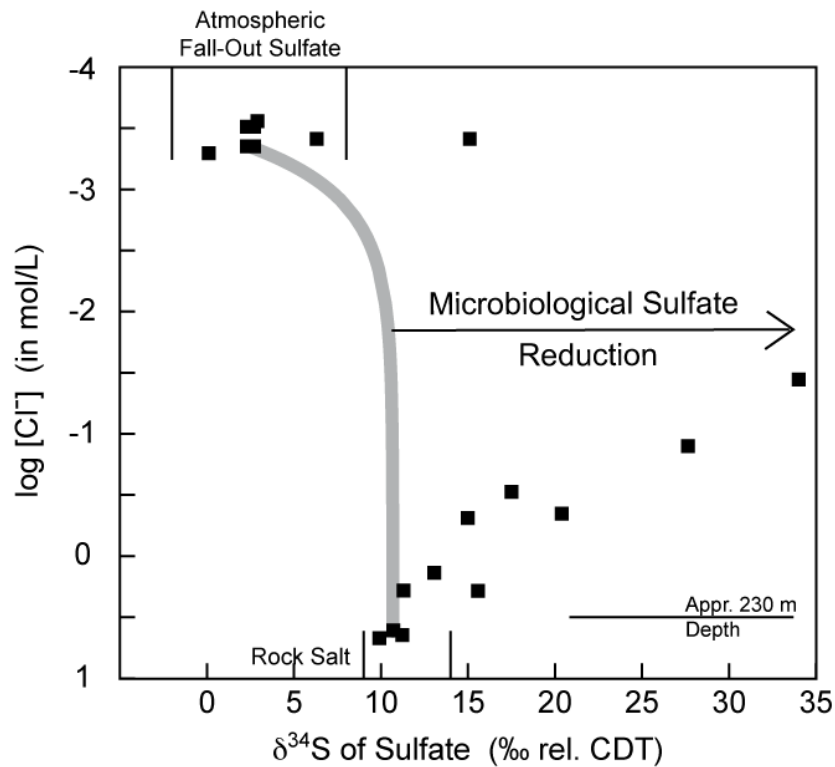
The reduction of sulphate is shown in fig. E. 4.9 /BUC 00e/. There are two principle sources, namely low salinity fresh waters with a sulphate concentration around 0.4 mmol/L, and saturated brines with up to around 60 mmol/L. If the two of them are mixed without additional chemical reactions or decomposition of sulphate, the mixing line shown in fig. E. 4.9 is obtained. Despite considerable variation of the sulphate content in the fresh waters, it becomes obvious that there are several waters in the fresh water region and up to Chloride concentrations around 50 mmol/L, that fall below the mixing line and thus are depleted in Sulphate. Amongst those waters where methane concentrations are available, it also becomes obvious that only where Sulphate has been highly depleted, conditions become so reducing that strong methane generation is observed. The question then is the process driving the sulphate reduction. The process is microbial reduction of sulphate in conjunction with oxidation of sedimentary organic carbon / lignite intercalations in the Miocene sandy sediments, leading to the simultaneous formation of dissolved organic and inorganic carbon /BUC 00c/.

Microbial reduction of sulphate is identified by change in the  $^{34}\text{S}$  to  $^{32}\text{S}$  isotope ratio. Micro-organisms have a preference for  $^{32}\text{S}$  and thus upon microbial consumption of the sulphate, the residual sulphate becomes progressively enriched in  $^{34}\text{S}$ . Sulphate is dissolved from the salt dome with a  $^{34}\text{S}$  content of about 11 ‰ rel. CDT (Canon Diabolo Meteorite reference material) (fig. E. 4.10). Contrary to the sulphate from the salt dome, the contribution from atmospheric fall-out has a lower  $^{34}\text{S}$  content. Comparable to fig. E. 4.9, also in fig. E. 4.10 there is a line representing mixing of the two principle sources, valid if there are no processes influencing the isotopic composition of sulphur in the sulphate. Fig. E. 4.10 clearly shows that with increasing dilution away from the salt dome, the sulphate becomes progressively consumed by microbial decomposition. This continues until the  $^{34}\text{S}$  content approaches 35 ‰ (fig. E. 4.10). Microbial sulphate decomposition is also observed in the fresh water region.



**Fig. E. 4.9** Sulphate reduction in the Gorleben aquifer system with data from the study with samples shown in fig. E. 4.13. The two principle sources are fresh surface near recharge water with low sulphate and chloride concentrations, and on the other extreme, saturated brines. Between these two principle sources, a mixing line is drawn with points below the line showing sulphate depletion





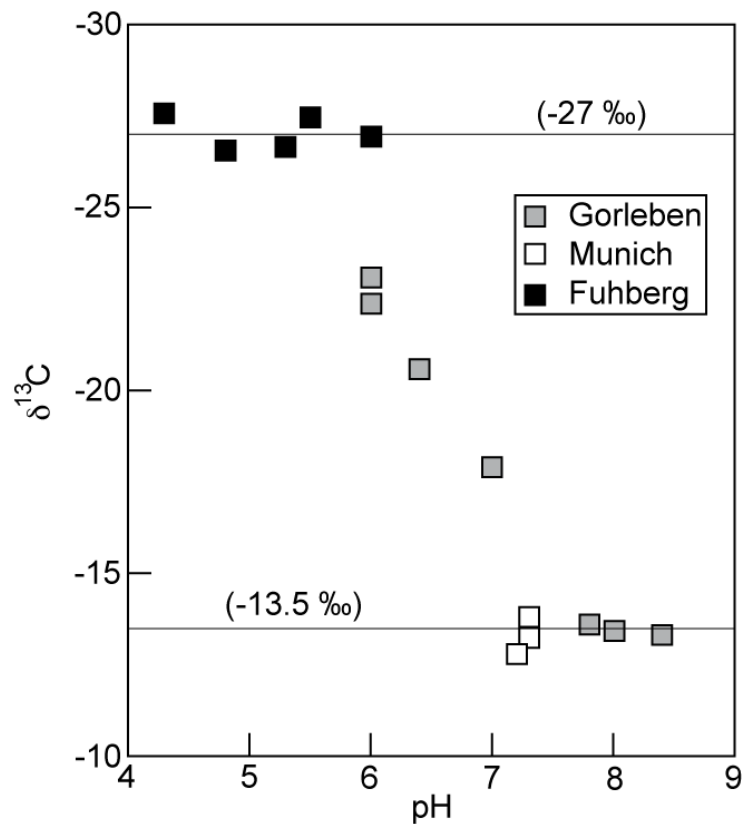
**Fig. E. 4.10**  $^{34}\text{S}$  content in sulphate in Gorleben groundwater as a function of the chloride concentration. The two different sources (dissolved from the salt dome and atmospheric fall-out/dust) have different  $^{34}\text{S}$  content. The grey line shows the expectation value for simple mixing of the two components. The enrichment in  $^{34}\text{S}$  with increasing dilution of the rock salt sulphate is the result of preferential decomposition of  $^{23}\text{S}$  sulphate by micro-organisms /SCH 05/

### E.4.3 Groundwater dating based on $^{14}\text{C}$ and its decay

The  $^{14}\text{C}$  source term can relate to either the inorganic or the organic inventory of a groundwater. The groundwater recharge source term under recent conditions can be identified as the inventory found in young recharge groundwater that, however, has not been affected by the fall-out from nuclear atmospheric testing. For the inorganic inventory, the source term is based on dissolution of dissolved inorganic carbon (DIC) from the atmosphere, root respiration from living plants or decomposition of the organic pool in the soil, including plant debris, humic matter and micro-organisms. The principle source for the carbon source term is C-3 cycle plants with a  $^{13}\text{C}$  content of -27 ‰ relative to the PDB standard (PDB standard refers to the Cretaceous belemnite formation at Peedee in South Carolina, USA).

#### E.4.3.1 The source of dissolved inorganic carbon (DIC)

Carbon dioxide is dissolved as carbonic acid, resulting in the water becoming slightly acidic. This acidity is compensated by equimolar dissolution of carbonate sediment. The most frequent carbonate sediments have a  $^{13}\text{C}$  concentration of 0 ‰ (“zero”). The outcome of this dissolution process can be seen in fig. E. 4.11, namely that the pH is becoming slightly above neutral and the  $^{13}\text{C}$  concentration of the mixture becomes around -13.5 ‰. In order to deduce the source term, the dissolution of sedimentary carbonate is compensated for via the  $^{13}\text{C}$  value, and the original inventory of biogenic origin is calculated, using the  $^{13}\text{C}$  concentration of -27 ‰.



**Fig. E. 4.11** Evolution of  $\text{DI}^{13}\text{C}$  with pH from primary recharge, i. e. dissolution of carbon dioxide from root respiration and decomposition of the organic soil pool, until equimolar dissolution with carbonate sediments. The data from the Gorleben aquifer system are shown together with data from “Munich” and “Fuhrberger Feld” from a joint study of all three aquifer systems /KIM 95, BUC 00b/

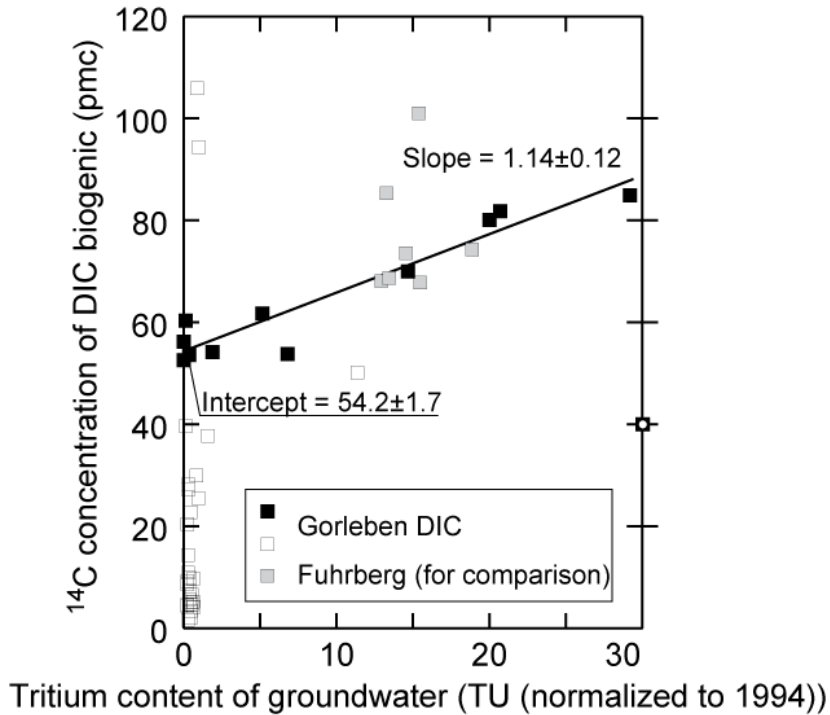
#### E.4.3.2 Correcting $^{14}\text{C}$ source term for atmospheric testing

The next step in deducing the source term is to correct for the impact of fall-out  $^{14}\text{C}$ . This is done through the tritium concentration, also originating from atmospheric testing. In fig. E. 4.12, the biogenic  $^{14}\text{C}$  source term is plotted against the tritium concentration for Gorleben groundwater (with data from the Fuhrberg aquifer system for comparison). In previous standard evaluation models it was frequently assumed that the biogenic source term was 100 percent modern carbon (pmc). As shown in the figure, this is not at all the case. The actual value for the biogenic source term for the Gorleben aquifer system is 54 pmc. Evaluation of the fulvic acid inventory resulted in a comparable  $^{14}\text{C}$  source term, namely  $55 \pm 6$  pmc /SCH 04/. Using the assumption of 100 pmc, gives about one  $^{14}\text{C}$  half-life too high ages.

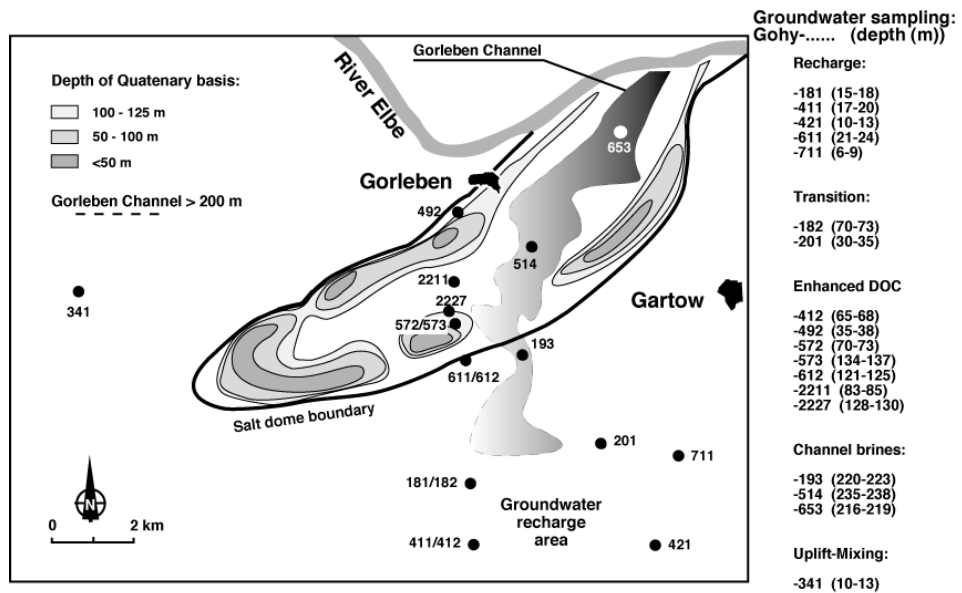
Plotting the  $^{14}\text{C}$  data against Tritium for the Swedish site characterization program at the Forsmark site, a similar picture is achieved /SME 08/. The Tritium concentration shows a small value (scattering between below detection limit and up to 2 tritium units) as  $^{14}\text{C}$  becomes lower than around 35 pmc. Based on dissolution of carbonic acid as the source term, the biogenic  $^{14}\text{C}$  source term (or "primary recharge") would then be in the order of 70 pmc (for equal dissolution of  $^{14}\text{C}$  free sediment DIC). The  $^{13}\text{C}$  values, however, show that the overall isotopic composition of the carbon inventory in the Forsmark aquifer system is different than a simple mixing of -27 ‰ for the  $^{13}\text{C}$  of the biogenic source term and 0 ‰ for the carbonate sediments. The reasons are that the present groundwater is a mixture of different sources, including modern or ancient Baltic water. The  $^{13}\text{C}$  of DIC in seawater is different than that from C-3 plant based soil (around -15 ‰ instead of -27 ‰) /KIM 95/. Furthermore, the sediments/fracture fillings contain substantial amounts of fresh water carbonates with  $^{13}\text{C}$  values different than that of marine carbonate, only the latter falling around the PDB reference (0 ‰).

In summary, in order to evaluate the age of the carbon inventory, the first step is determination of the source term at the time of recharge. This means that the  $^{14}\text{C}$  source term prior to nuclear atmospheric testing needs to be determined.

The next step is to relate the carbon inventory in deep groundwater subject to dating, with the source term and the processes leading to the carbon inventory of these deep waters. For this purpose the results of a study on Gorleben samples as shown in fig. E. 4.13 are briefly discussed (for detail, see /BUC 00b/).



**Fig. E. 4.12**  $^{14}\text{C}$  concentrations of DIC of biogenic origin in Gorleben groundwater, shown against the tritium concentration



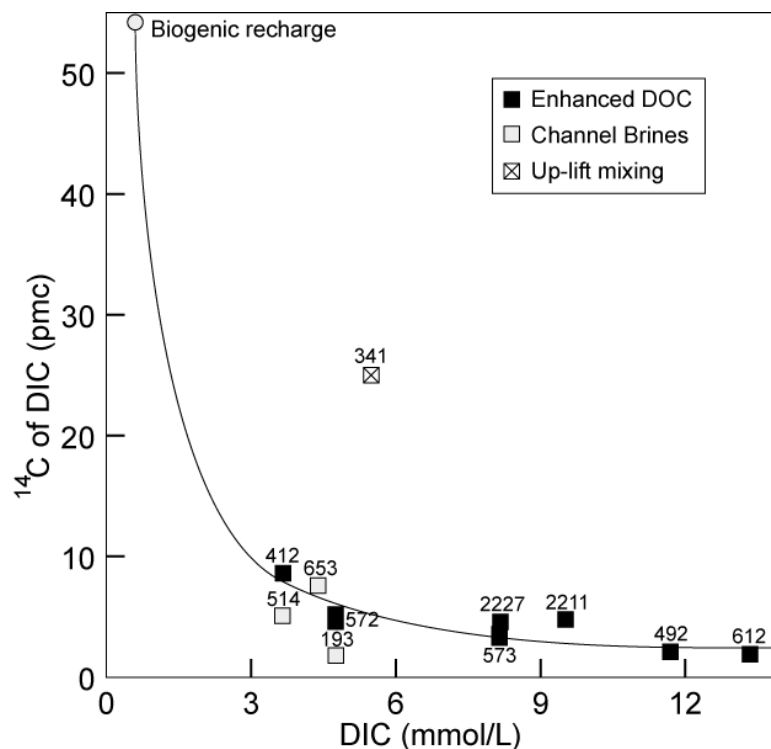
**Fig. E. 4.13** Sampling wells used for specific study on the evolution of the  $^{14}\text{C}$  content in groundwater samples from the south/south-east recharge area to the area above the salt dome, including the Gorleben Channel. In addition, one sample from a shallow marsh west of the salt dome is investigated

### **E.4.3.3 $^{14}\text{C}$ and $^{13}\text{C}$ evolution in a specific part of the Gorleben aquifer system**

For the detailed  $^{14}\text{C}$  analysis of the carbon inventory evolution from pre nuclear atmospheric testing recharge to present deep groundwater, a study was conducted with groundwater sampling as shown in fig. E. 4.13. Five surface-near waters were analyzed, originating from the south, stretching north up to the southern edge of the salt dome. Seven waters with elevated dissolved organic carbon (DOC) concentrations were investigated. These waters originate from modest depth, down to about 140 m, mainly above the salt dome. Three samples were used originating from the Gorleben Channel, with their low DOC concentrations and high salinity. Two waters were identified as the transition between recharge and the enhanced DOC waters. They were low in DOC and were shown to have equimolar mixing of biogenic and sedimentary carbonate. Finally, one groundwater from only 13 m depth in a marsh west of the salt dome was included in the study.

#### **E.4.3.3.1 < $\text{DI}^{14}\text{C}$ >**

With the source term for biogenic recharge as shown above, the expected evolution of the  $^{14}\text{C}$  concentration can be calculated for increasing dissolution of  $^{14}\text{C}$  free DIC. The outcome is the curve shown in fig. E. 4.14. All transition and enhanced DOC samples fall along the line representing dilution of the  $^{14}\text{C}$  concentration, without significant  $^{14}\text{C}$  decay taking place. Two of the channel brines also fall along this line. Exceptions are the shallow water from the marsh west of the salt dome, and possibly the water Gohy-193 in the southern outflow from the channel (see fig. E. 4.13). The marsh water turns out to be a general case for such recharge conditions. The high  $^{14}\text{C}$  content of this marsh water at 13 m depth has no relevance for the age. This is further discussed below. This is an important indicator that can be used for identification of water from such sources (see below). The problem with the brines is that the chemical evolution of their DIC inventories cannot be deduced with confidence.



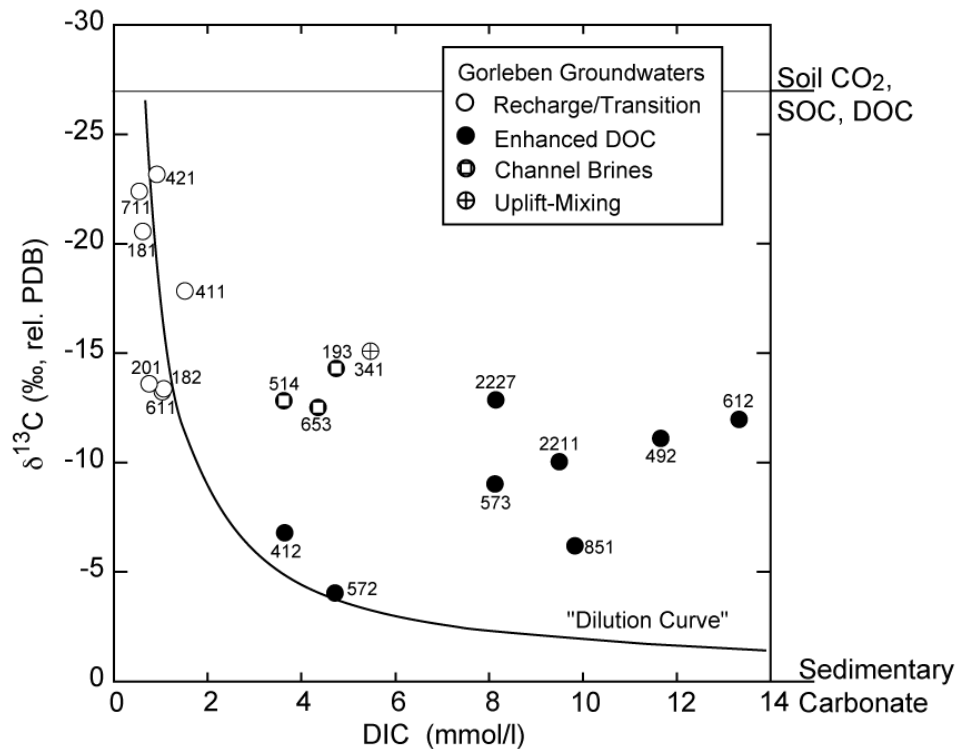
**Fig. E. 4.14** Evolution of the <sup>14</sup>C content from recharge, represented by the biogenic DIC source term corrected via tritium for fall-out, to different groundwater samples as shown in fig. E. 4.13

#### E.4.3.3.2 < DI<sup>13</sup>C >

In fig. E. 4.15, the evolution of the DIC inventory is shown based on the <sup>13</sup>C content. The recharge and transition waters show a simple evolution of the DIC inventory. The <sup>13</sup>C value is decreasing as expected for dilution with sedimentary carbonate, exponentially approaching the value for this source, namely “zero”. The two moderately enhanced DOC waters, Gohy-412 and -572, follow the “dilution curve” beyond dissolution of sedimentary carbonate in the same amount as the carbonic acid is originally introduced with the recharge. The continuation beyond the 1:1 mixing of the two sources results from acid generation through microbial sulphate reduction (see section E.4.2, and /BUC 00b/).

In the strongly enhanced DOC waters, the decomposition of sedimentary organic carbon also introduces additional DIC with the <sup>13</sup>C content of this source. The source is Miocene brown-coal particles that have been deposited in the sediments. This Miocene brown-coal also originates from plants of the C-3 cycle, and thus the <sup>13</sup>C value equals that of the biogenic recharge source term. This has two consequences. The first one is

that the  $^{13}\text{C}$  values of the steadily increasing DIC content is approaching an 1:1 mixture, i. e. a value of  $-13.5\text{‰}$ . The second consequence is much more important:  $^{14}\text{C}$  groundwater dating models based on  $^{13}\text{C}$  for identification of the biogenic source term result in a dramatic overestimation of the  $^{14}\text{C}$  age /BUC 00b/. Contrary to this, an overall DIC concentration and dilution evaluation as shown in fig. E. 4.14 gives the correct  $^{14}\text{C}$  age of the biogenic source term.



**Fig. E. 4.15** Evolution of the  $^{13}\text{C}$  content from recharge to different groundwater samples as shown in fig. E. 4.13.

The  $^{13}\text{C}$  of the marsh water Gohy-341 is also shown in fig. E. 4.15. The total DIC concentration is very high compared to that of the other recharge and transition waters. As seen in fig. E. 4.14, also the  $^{14}\text{C}$  content is very much higher. This is a general finding for marsh and wetland recharge. The turnover of comparably young organic carbon deposits followed by a 1:1 dissolution of sedimentary carbonate, leads to such an inorganic carbon inventory. This is further discussed below.

#### E.4.3.3.3 < DI $^{13}\text{C}$ in the brines >

In fig. E. 4.15, the  $^{13}\text{C}$  data for the three brines are also shown. The brines have a  $^{13}\text{C}$  content around 1:1 mixing of biogenic and sedimentary carbonate. The brines are

found below the region with enhanced DOC groundwater. Their origin, however, need not agree with the recharge area looked upon in his particular investigation, they may very well originate from recharge further north up the Gorleben Channel. One very possible candidate could be recharge from the "Höhbeck" elevation.

The investigated brines cannot have evolved through the sequence (i) biogenic source term from the studied recharge area, (ii) dissolution of sedimentary carbonate, (iii) addition of substantial amounts of Miocene brown-coal based DIC, and finally, (iv) dissolution of salt from the salt dome. This would reflect the situation when going from the upper fresh water layer down to the brines, with the enhanced DOC region in between. Instead, the overall DIC concentrations are well below those found in the overlying enhanced DOC groundwater region, and the  $^{13}\text{C}$  is around -13.5 ‰. The observations on the DIC concentrations, the DIC isotopic inventory and the  $^{18}\text{O}$  / Deuterium content of the brines can be summarized as follows:

- The  $^{13}\text{C}$  concentration is typical for wetland / marsh recharge conditions.
- The  $^{14}\text{C}$  concentration is that expected for the source term of the studied waters, i. e. recharge mainly under forest, followed by dissolution of sedimentary carbonate, and no  $^{14}\text{C}$  decay.
- The DIC concentrations and  $^{13}\text{C}$  composition is not in agreement with the water originating from the overlying enhanced DOC waters.
- The  $^{18}\text{O}$  / Deuterium content as well as the salt concentrations show "Pleistocene" values and saturated salt concentrations for Gohy-514 and -653. The corresponding values for Gohy-193, in the southern outflow from the Gorleben Channel, show about half "Pleistocene" and half Holocene with about half of the salt saturation concentrations.

These observations cannot yet be brought together to a consistent interpretation. The overall conclusion from this observation is that dating brines based on the  $^{14}\text{C}$  inventory is associated with considerable uncertainties.

#### **E.4.3.3.4 < $^{14}\text{C}$ of fulvic acid >**

In this context it should also be reminded that fulvic acids are formed in large quantities in deep Gorleben groundwater (/ART 00/ and /BUC 00a,c/). Fulvic acid has also been



successfully used for groundwater dating where  $\text{DI}^{14}\text{C}$  dating failed /BUC 00d/. Gorleben brine fulvic acid (i) is found in concentrations as those in the recharge waters of this specific study, (ii) was shown to have the same chemical properties as those in recharge waters, different from those in enhanced DOC waters, and (iii) has the same  $^{14}\text{C}$  concentration as the recharge ones /SCH 05/. The findings can be interpreted in at least two different ways:

1. The hydrophilic recharge fulvic acid remains dissolved all the way down to the brines. Contrary to the hydrophilic recharge fulvic acids, the rather hydrophobic enhanced DOC fulvic acids are salted out and thus do not enter the brines.
2. Another possibility is that the channel brine fulvic acid enters the channel without intersecting with a DOC in-site region. Such a recharge could be in the region of H6hbeck (cf fig. E. 4.5 and associated discussion).

A final interpretation would require evaluation of additional data in a broader context.

In summary, the brines could be of very different recharge conditions than found for the corresponding waters in this specific study, and/or the DIC inventory has undergone considerable changes due to not identified chemical processes. A statement concerning age of the channel brines based on the  $^{14}\text{C}$  content thus appears "adventurous".

#### **E.4.4 Groundwater origin and sources by $^{13}\text{C}$ and $^{14}\text{C}$**

In the foregoing section it was already mentioned that the content and isotopic composition of the carbon inventory may be used in order to identify different origins. The use of the  $^{13}\text{C}$  inventory for this purpose is already discussed around fig. E. 4.15. The  $^{14}\text{C}$  inventory can also be used for this purpose. The different inventories found in different types of water may have gone through very different processes. In order to compare the different waters, the  $^{14}\text{C}$  inventory is normalized to the same basis. The normalization basis for the Gorleben waters was (i) correction for the impact of nuclear atmospheric testing fall-out via tritium, (ii) calculation of the concentration of dissolved inorganic carbon (DIC) with a  $^{14}\text{C}$  content of 100 pmc.

One may argue for different ways to conduct the normalization, none of them reflecting fully the character of all different types of water. As an example, the concentration of DIC of biogenic origin based on 50 pmc would very well represent the actual biogenic

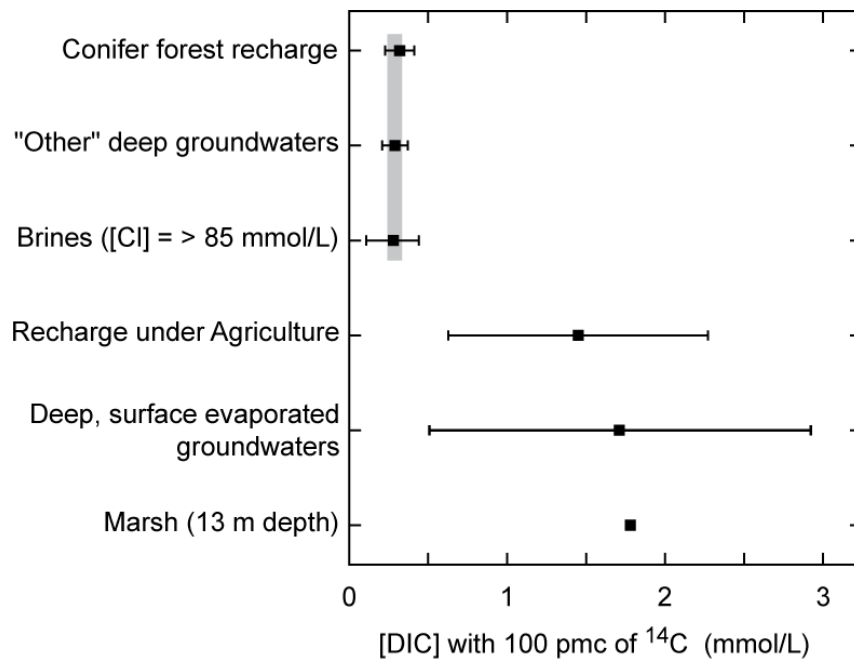
source term. The precise  $^{14}\text{C}$  concentration of a specific source term, however, will vary depending on the aquifer system, the part of an aquifer system, or even the group of data accessible. For this reason the arbitrarily chosen normalization basis of 100 pmc is used.

The carbon inventory in a given groundwater can originate from different sources and conditions. In all cases, the carbon inventory originates from microbial turnover of an organic pool. The pool can be a soil under conifer forest with low soil organic carbon content and a comparably slow turnover. In a marsh, the source is peat and plant residues. As well known, water under such conditions is generally dark brown. The dark colour comes from the high dissolved organic carbon content, associated with high dissolved inorganic carbon concentrations. In the case of modern agriculture, the turnover of soil organic matter is relatively high and thus the concentration of  $^{14}\text{C}$  introduced into the groundwater with the recharge is comparably high. With such background information, the data for different groups of Gorleben groundwater can be understood.

In fig. E. 4.16, the different carbon inventory source terms based on this  $^{14}\text{C}$  content are shown. The figure shows that the  $^{14}\text{C}$  loads under different recharge conditions vary widely between each other. Three different groups of groundwater are found to have very comparable  $\text{DI}^{14}\text{C}$  loads, namely (i) recharge under conifer forest, (ii) "other deep groundwater" (groundwater that do not fall within the other classes, i. e. also including enhanced DOC waters), and (iii) brines /BUC 03/. This shows that these waters most likely have comparable recharge conditions.

As described above (see for example discussion around fig. E. 4.14 and fig. E. 4.15), the Gohy-341 marsh water from 13 m depth has a high  $\text{DI}^{14}\text{C}$  load. The same is true for groundwater originating from wetland conditions, i. e. deep groundwater south-east and east of the salt dome that were subject to considerable evaporation prior to recharge.

As mentioned above, agriculture soil has a high turnover of soil organic carbon. Therefore, as expected, there is a high inflow of  $\text{DI}^{14}\text{C}$  with recharge from such areas.



**Fig. E. 4.16** DI<sup>14</sup>C load from different Gorleben groundwater samples, grouped according to different recharge conditions (from /BUC 03/)

The analysis shows that different recharge conditions are reflected in the carbon inventory of groundwater. Another important observation is that the recharge conditions may change considerably with change in land-use or changes in vegetation with climatic variations. Where such changes are known from historical records, this knowledge can be combined with the observed differences in recharge conditions of present deep groundwater. Where such changes are not documented, considerable uncertainties in interpretation may arise.

The information in fig. E. 4.16 has several implications for the use of the carbon inventory with respect to concentration and its isotopic composition. Determination of the groundwater age from the DI<sup>14</sup>C decay requires knowledge of the actual recharge conditions of the groundwater contributors at the time of recharge. Sufficient knowledge about relevant chemical processes from recharge to the concerned present groundwater is also required.

Within all uncertainties, dating the Gorleben groundwater by <sup>14</sup>C decay either results in “no significant decay” or “considerable uncertainty”. Allocation of different groundwater carbon inventories shows that the aquifer system is sensitive to changes that are known from historical records, supporting a low age of the water in general.

## E.5 Summary and conclusions

The hydrological situation of the Gorleben aquifer system is assessed, reflecting different developments during the past two decades in process understanding and isotope geochemistry data analysis. The overburden on top of the salt dome shows that there is considerable exchange between recharge and groundwater and saturated brines at 230 m depth. In the area just west of the Gorleben Channel, ideal exponential mixing of these two components is found by two different ideal tracers, namely chloride as well as tritium originating from nuclear atmospheric testing. The tritium exchange can be monitored down to 140 m depth. In the central part of this area, also increased salt concentrations are found relative to the mixing line, showing that deep groundwater is also moving upwards in a higher rate than just by ideal mixing. This part of the overburden shows no effective groundwater exchange barriers.

The considerable vertical exchange is also verified further north and north-east along the Gorleben Channel itself, and westwards along the river Elbe. Here, groundwater with  $^{18}\text{O}$  recharge signatures is found at depths between 208 and 273 m depth (173 m depth for westward outside the Channel). Around these waters are also those that follow the general trend with increasing  $^{18}\text{O}$  depletion with increasing depth and salt content. This shows that a vertical flow of groundwater takes place, i. e. also here there is no efficient barrier for groundwater exchange.

Finally, in the general recharge area south and in the east of the salt dome, it is shown that below the present fresh water region, there is groundwater with an impact from surface evaporation prior to recharge. This signature is pronounced at depths down to 120 m, but is also visible as minor contribution at depths down to 170 m. The high load of  $\text{DI}^{14}\text{C}$  shows that the groundwater below the present fresh water region in this area originates from a wetland condition. This area was such a marsh until the land was drained between 1710 and 1750. This suggests that also in this part of the Gorleben area, there is no effective barrier against vertical groundwater exchange.

There is still a considerable amount of data on the carbon inventory of Gorleben groundwater that has not yet been thoroughly assessed with methods and approaches developed in the past two decades. This development has led to an improved understanding of processes determining the carbon inventory, i. e. the concentration of dissolved organic and inorganic carbon, as well as their isotopic composition. All data available on the carbon isotopic inventory should be reassessed making use of such

recent improvements in process understanding. Such a reassessment would be an important part in a Gorleben site description update.

## **E.6 Acknowledgement**

The data analyzed originate from own investigations, from the "BfS Gorleben database" (database on the Gorleben aquifer system made available from the "Federal Office for Radiation Protection" ("Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)"), and the PhD thesis of A. Suckow /SUC 93/. In addition, Mr. Fähmann (DBE) has given very valuable understanding of characteristic properties and local conditions of the area. Without this general understanding of the site, the present analysis would not have been meaningful.

## **E.7 References**

- /ART 00/ Artinger R., Buckau G., Geyer S., Wolf M., Kim J.I., Fritz P. "Characterization of Groundwater Humic Substances: Influence of Sedimentary Organic Carbon", *Applied Geochemistry*, 15/1, 2000, 97-116.
- /BUC 00a/ Buckau G., Artinger R., Fritz P., Geyer S., Kim J.I., Wolf M. "Origin and Mobility of Humic Colloids in the Gorleben Aquifer System", *Applied Geochemistry*, 15/2, 2000, 171-9.
- /BUC 00b/ Buckau G., Artinger R., Geyer S., Wolf M., Kim J.I., Fritz P. "<sup>14</sup>C Dating of Gorleben Groundwater", *Applied Geochemistry*, 15/5, 2000, 583-97.
- /BUC 00c/ Buckau G., Artinger R., Geyer S., Wolf M., Kim J.I., Fritz P. "Groundwater in-situ Generation of Aquatic Humic and Fulvic Acids and the Mineralization of Sedimentary Organic Carbon", *Applied Geochemistry*, 15/6, 2000, 819-32.
- /BUC 00d/ Buckau G., Artinger R., Kim J.I., Geyer S., Fritz P., Wolf M., Frenzel B. "Development of Climatic and Vegetation Conditions and the Geochemical and Isotopic Composition in the Franconian Albvorland Aquifer System", *Applied Geochemistry*, 15/8, 2000, 1191-1201.

- /BUC 00e/ Buckau G. (ed.) "Effects of Humic Substances on the Migration of Radionuclides: Complexation and Transport of Actinides", Report: EUR 19610 EN (2000).
- /BUC 03/ Buckau G., Wolf M., Geyer S., Artinger R., Kim J.I. "Origin and Mobility of Aquatic Humic Substances from Wetland Recharge in the Gorleben Aquifer System ", in: Humic Substances in Performance Assessment of Nuclear Waste Disposal: Actinide and Iodine Migration in the Far-Field (First Technical Progress Report), ed. G. Buckau, Report FZKA 6800, Research Center Karlsruhe, 2003.
- /BUC 04/ Buckau G., Artinger R. and Kim J.I. "Migration Case Gorleben" Annex 2 in: "Humic Substances in Performance Assessment of Nuclear Waste Disposal: Actinide and Iodine Migration in the Far-Field (Second Technical Progress Report)", Ed. G. Buckau, Report FZKA 6969, Research Center Karlsruhe, 2004, ISSN 0947-8620.
- /CRA 61/ Craig H. "Isotopic variations in meteoric waters", *Science*, 133, 1702-3.
- /GBD/ Gorleben Data-Base. A set of excel tables with lateral position and depth of 321 sampling wells (south of the river Elbe), water type, and chemical and isotope data together with pH, Eh, KMnO<sub>4</sub> consumption, temperature etc. from field and lab measurements. Comments are given with respect to improvement of the wells, i. e. justification for not regarding previous values. There are typically three to five analyses from a single sampling well, from a time period of typically 10 years, starting 1977.
- /KIM 95/ Kim J.I., Artinger R., Buckau G., Kardinal Ch., Geyer S., Wolf M., Halder H., Fritz P. "Grundwasserdatierung mittels <sup>14</sup>C-Bestimmungen an gelösten Humin- und Fulvinsäuren", Report RCM 00895, Technical University of Munich, May 1995.

- /SCH 04/ Schäfer T., Buckau G., Artinger R., Wolf M., Kim J.I., Geyer S., Bleam W.F., Wirick S. and Jacobsen C. "Vertical Exchange of Gorleben Fulvic Acids of Different Origin", Annex 1 in: "Humic Substances in Performance Assessment of Nuclear Waste Disposal: Actinide and Iodine Migration in the Far-Field (Second Technical Progress Report)", Ed. G. Buckau, Report FZKA 6969, Research Center Karlsruhe, 2004, ISSN 0947-8620.
- /SCH 05/ Schäfer T., Buckau G., Artinger R., Kim J.I., Geyer S., Wolf M., Bleam W. F., Wirick S. and Jacobsen C. "Origin and Mobility of Fulvic acids in the Gorleben Aquifer system: Implications from Isotopic Data and Carbon/Sulfur XANES", *Organic Geochemistry*, 36, 2005, 567–582.
- /SME 08/ Smellie J., Tullborg E.-L., Nilsson A.-Ch., Sandström B., Waber N., Gimeno M., Gascoyne M. "Explorative Analysis of Major Components and Isotopes, SDM-Site Forsmark", Report SKB R-08-84 (2008).
- /SUC 93/ Suckow A. "Isotopenhydrologische und Edelgaspaläotemperatur-Untersuchungen im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben", PhD Thesis, University of Heidelberg, 1993.





## **F Darstellung der Süß-/Salzwasserdynamik im Bereich der Gorlebener Rinne im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben**

H. Klinge<sup>1</sup>, R.-R. Ludwig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### **F.1 Einleitung**

Die standortspezifischen Untersuchungen des Deckgebirges haben sich von Beginn an in starkem Maße auf die Gorlebener Rinne konzentriert. Hier lagern Sedimente des Quartär über eine Fläche von mehreren Quadratkilometern direkt dem Hutgestein auf oder stehen kleinräumig sogar in direktem Kontakt mit Zechsteinsalzen /KLI 07/. Die Erkundungsergebnisse im Bereich der Rinne haben zusammen mit anderen Aussagen z. B. zur Grundwasserdynamik bereits zu einem recht frühen Zeitpunkt zu der pauschalen qualitativen Bewertung geführt, dass „die über dem zentralen Teil des Salzstocks Gorleben vorkommenden tonigen Sedimente keine solche Mächtigkeit und durchgehende Verbreitung haben, dass sie in der Lage wären, Kontaminationen auf Dauer von der Biosphäre zurückzuhalten“ /PTB 83/.

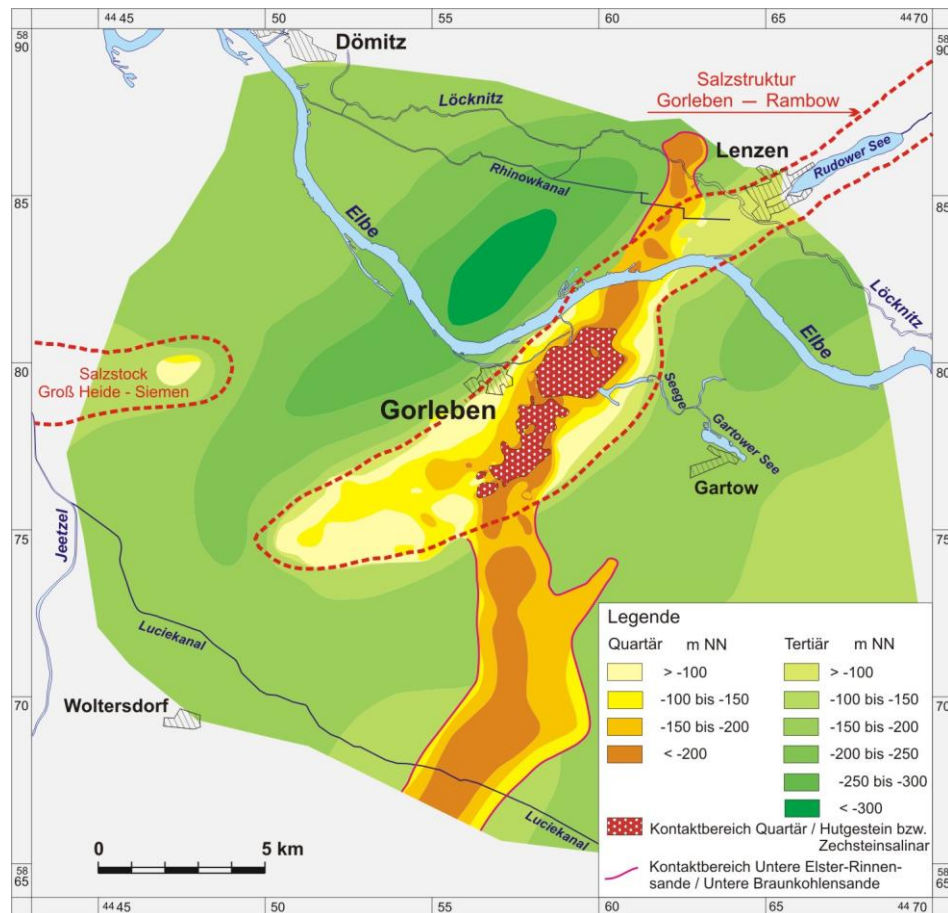
Es bestand die Notwendigkeit, das hydraulische System der Rinne zu erkunden, zu verstehen und – soweit möglich – darin ablaufende Strömungsvorgänge speziell auch mit Hilfe geohydraulischer Modelle zu quantifizieren. Dazu dienten die sehr umfangreichen und detaillierten Geländeuntersuchungen in diesem Bereich des Untersuchungsgebietes.

### **F.2 Süß-/Salzwasserdynamik in der Gorlebener Rinne**

#### **F.2.1 Hydrogeologische Charakterisierung**

Die Gorlebener Rinne ist hydrogeologisch wie folgt zu charakterisieren (vgl. Abb. A. 4.1):

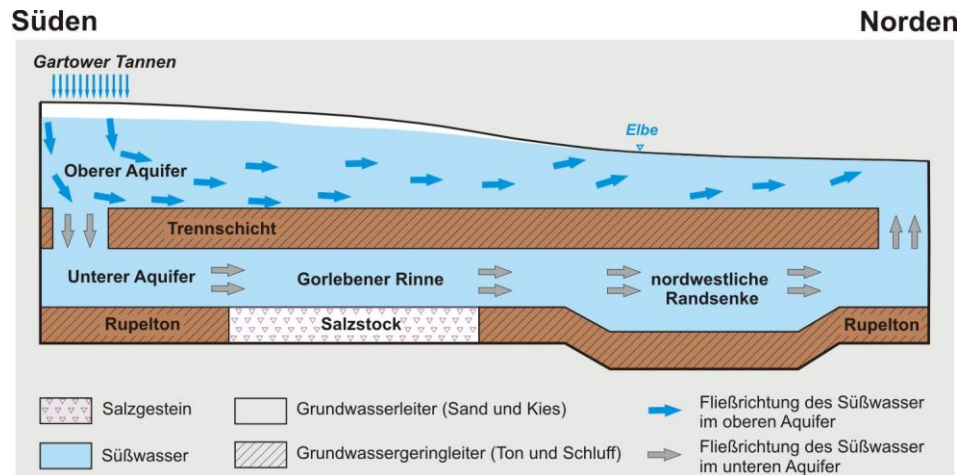
- Die rinnenförmige Eintiefung in Tertiärtonen und Hutgestein reicht über dem Salzstock bis in Tiefen von unter -290 m NN.
- Im Zentralteil stehen gut durchlässige elsterzeitliche Quartärablagerungen (qe) lokal begrenzt in direktem Kontakt mit leichtlöslichen Zechsteinsalzen.
- Der flächenhaft in der Rinne verbreitete Lauenburger-Ton-Komplex (qL) hat die Funktion eines stockwerkstrennenden Geringleiters, der den unteren, gut durchlässigen elsterzeitlichen Grundwasserleiter, welcher in Kontakt zum Zechsteinsalinar steht, vom oberen, regional verbreiteten Grundwasserleitersystem trennt. Allerdings wurden die oberen Partien des Tonkomplexes teilweise stark glazitektonisch beansprucht, so dass lokal mit erhöhten vertikalen Durchlässigkeiten in den oberen Partien des Lauenburger-Ton-Komplexes gerechnet werden muss.
- Der untere Rinnengrundwasserleiter ist im Süden und im Norden hydraulisch mit den Unteren Braunkohlensanden (tmiBS1) verbunden. Diese sind in den Randsenken durchgängig verbreitet und bilden einen überregional wichtigen Grundwasserleiter.
- Der Hamburg-Ton (tmiHT), der in den Randsenken als Grundwassergeringleiter die Unteren Braunkohlensande überlagert, hat im Südosten des Salzstocks größere Verbreitungslücken. Im Grundwassererneuerungsgebiet der Gartower Tannen besteht daher in Teilbereichen ein direkter hydraulischer Kontakt zwischen oberem und unterem Grundwasserleiter.
- In der nordwestlichen Randsenke sind beide Grundwassergeringleiter im Gebiet der Elbe durchgehend und lückenlos verbreitet. Kleinere hydraulische Fenster sind im Nordwesten von Dömitz sowie südlich der Elbe vorhanden.



**Abb. F. 2.1** Basis des unteren Grundwasserleiters (aus /KLI 07/)

Hydraulisch gesehen lässt sich der untere Grundwasserleiter der Gorlebener Rinne aufgrund der flächenhaften Verbreitung des Lauenburger-Ton-Komplexes innerhalb der Rinne als röhrenartige Struktur beschreiben, deren Südende in die Grundwasserhochlage der Gartower Tannen hineinreicht, während sie im Norden in der Elbeniederung mit dem unteren Grundwasserleiter der nordwestlichen Randsenke verbunden ist. Aus dem Druckpotenzialgefälle zwischen den Gartower Tannen und der Elbeniederung ergibt sich, dass der untere Grundwasserleiter parallel zur Rinnenachse von Süden nach Norden durchströmt werden würde, wenn Süßwasserbedingungen unterstellt werden.

Abbildung F. 2.2 stellt diese hydraulische Situation in einem Prinzipschnitt dar, der von den Gartower Tannen im Süden durch die Gorlebener Rinne und die nordwestliche Randsenke in der Elbe-Lössnitz-Niederung bis in den Nordwesten von Dömitz verläuft. Aufgrund des vermuteten hydraulischen Fensters im Nordwesten von Dömitz ist hier – unter Süßwasserbedingungen – mit einem Übertritt der aus der Gorlebener Rinne einströmenden Grundwässer in den oberflächennahen Grundwasserleiter zu rechnen.



**Abb. F. 2.2** Prinzipmodell der Wasserbewegung im unteren Grundwasserleiter unter Süßwasserbedingungen (Lage des schematischen Schnittes s. Abb. F. 3.1) (aus /KLI 07/)

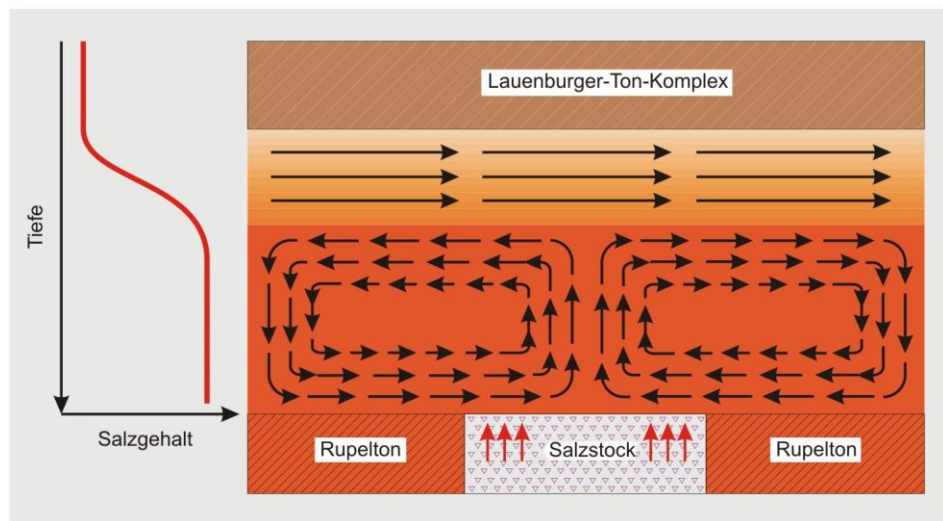
## F.2.2 Süß-/Salzwasserdynamik

Hydraulische Modellrechnungen unter Süßwasserbedingungen führten aufgrund der guten Durchlässigkeit der Rinnensedimente zu Wasserlaufzeiten durch die Rinne von wenigen tausend bis zehntausend Jahren /SCH 10/.

Die Wässer in der Gorlebener Rinne sind durch Salzablaugung im Kontaktbereich zwischen dem Zechsteinsalinar und dem Rinnengrundwasserleiter durchgängig stark salzhaltig. Dabei besteht eine charakteristische vertikale Salinitätsverteilung mit niedriger mineralisierten Wässern im oberen und hochsalinen bis salzgesättigten Wässern unterhalb einer geringmächtigen Übergangsschicht im unteren Teil des Grundwasserleiters.

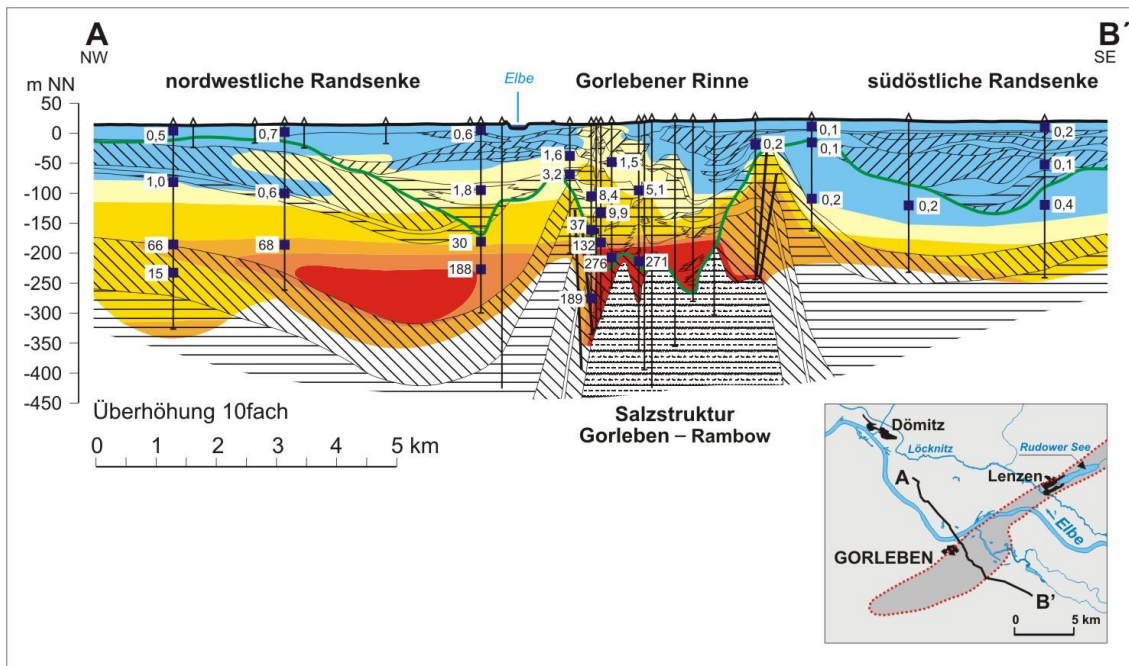
Die beobachtete vertikale Verteilung der Salzgehalte im Rinnenbereich in Verbindung mit Druckmessungen und theoretische Überlegungen zur Auswirkung hydraulischer Gradienten auf Grundwässer unterschiedlicher Dichte führen zu der Modellvorstellung, wonach das vorhandene Druckgefälle in der Gorlebener Rinne zu einer nordostwärts gerichteten Grundwasserbewegung der niedriger mineralisierten Wässern im oberen Teil des tiefen Rinnengrundwasserleiters führt. In die hochversalzene Wässer an der Basis der Rinne wird dieses Druckgefälle in verringertem Maße übertragen. Hier kann es zur Ausbildung von Strömungswalzen mit z. T. gegenläufigen Bewegungen kommen, wobei diese Tendenz durch lokal in Lösung gehendes Salz verstärkt werden

kann. Abbildung F. 2.3 stellt diese hydraulische Situation wiederum in einem vereinfachten Prinzipschnitt dar.



**Abb. F. 2.3** Prinzipmodell der Salzwasserbewegung im unteren Grundwasserleiter der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/)

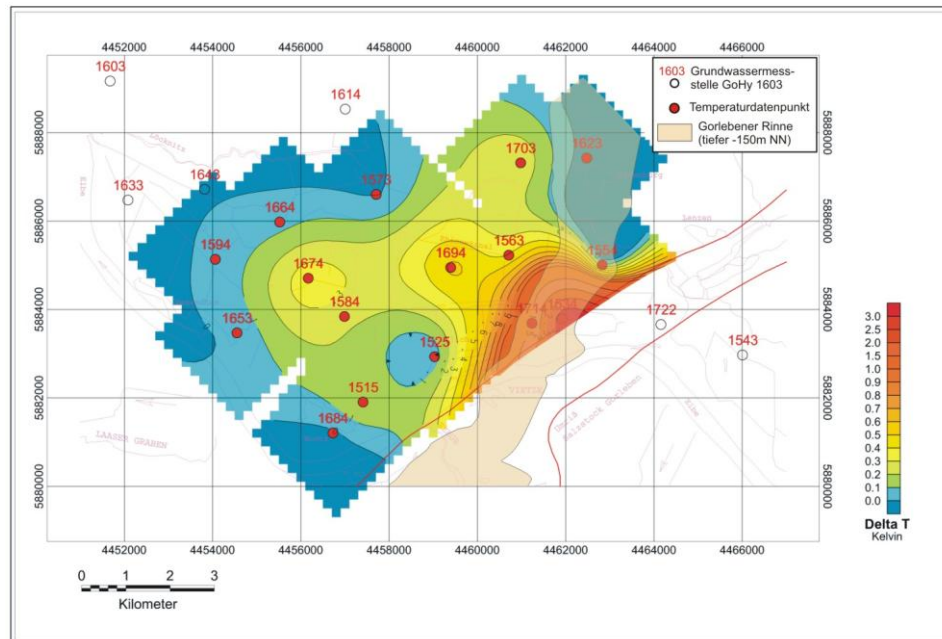
Für eine unterstellte Freisetzung von Radionukliden an der Basis der Rinne ist deshalb im Vergleich zu Süßwasserbedingungen mit tendenziell längeren Laufzeiten zu rechnen. 2D-Süß-/Salzwassermodellrechnungen auf einem Vertikalschnitt durch die Gorlebener Rinne zeigen unter den für die Modellrechnungen getroffenen Vereinfachungen (z. B. homogene isotrope Grundwasserleiter), dass der oberste Teil des tiefen Rinnengrundwasserleiters stärker durchströmt wird, die Geschwindigkeiten tendenziell nach unten abnehmen und ihre Richtungen umkehren können /SCH 10/.



**Abb. F. 2.4** Grundwassersalinitäten im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben (Legende s. Abb. F. 2.8)

Die Auswertung der bohrlochgeophysikalischen Messungen und die chemischen Analysen der Wasserproben haben gezeigt, dass im unteren Grundwasserleiter im zentralen Bereich der „schüsselförmigen“ Muldenstruktur der nordwestlichen Randsenke ein Salzwasserkörper mit Gesamtsalzgehalten von mehr als 200 g/l existiert /KLI 10/. Die chemische Zusammensetzung der Wässer weist diese als typische Halit-Ablaugungswässer aus. Die Oberfläche dieses Salzwasserkörpers ist nahezu horizontal ausgebildet, seine Unterfläche liegt im Bereich der Basis des Grundwasserleiters und bildet deren schüsselförmige Muldenstruktur nach. Ein in allen Bohrungen im Verbreitungsgebiet des Salzwasserkörpers angetroffenes charakteristisches Salinitätsprofil belegt, dass die Porenwässer der Geringleiter im Liegenden des Grundwasserleiters wesentlich niedrigere Salzgehalte aufweisen. Damit kann ein vertikaler Aufstieg von Salzwässern aus tiefen mesozoischen Grundwasserleitern als Quelle der Salzwässer mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Aus der Tatsache, dass sich diese Zone hoher Salzgehalte von > 200 g/l nach Süden in die Gorlebener Rinne fortsetzt, lässt sich ableiten, dass die Solen ihren Ursprung in der Gorlebener Rinne südlich der Elbe haben, wo sie durch Salzlösung des Zechsteinsalinars gebildet wurden.





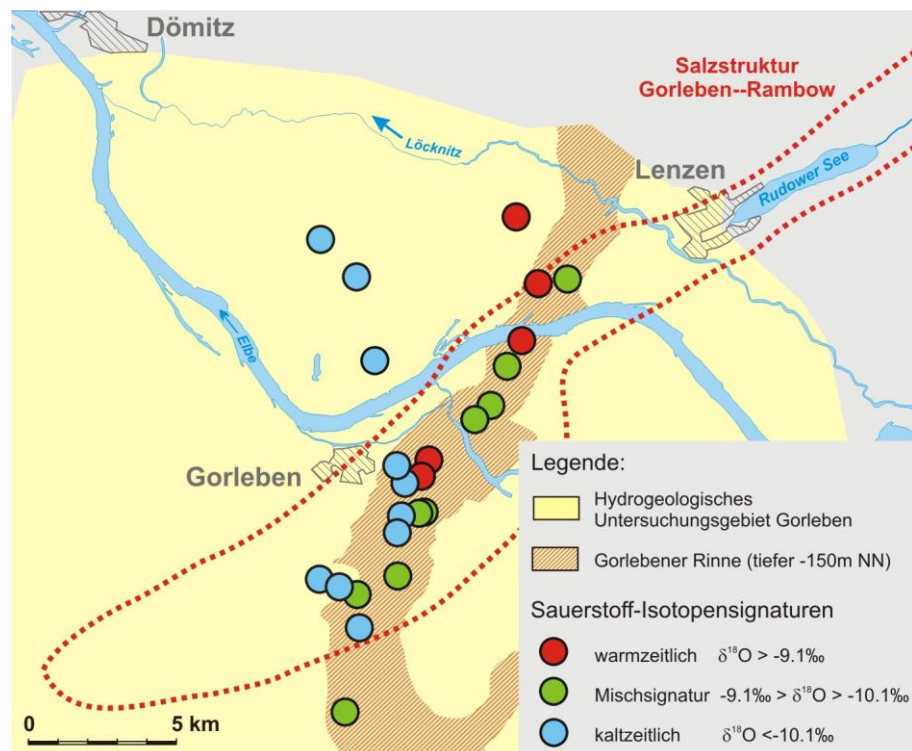
**Abb. F. 2.5** Verbreitung der advektiven Differenztemperaturen in der nordwestlichen Randsenke im Niveau -180 m NN (aus /KLI 07/)

Die nordwestliche Randsenke bildet, wie zuvor erläutert, eine geschlossene schüssel-förmige Muldenstruktur, die westlich von Lenzen von der in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Gorlebener Rinne gequert wird. Im Zentrum dieser Randsenke befindet sich die Basis des unteren Grundwasserleiters in den Unteren Braunkohlesanden in einer Tiefe von -320 m NN, während sie an den Rändern auf einem wesentlich höheren Niveau von etwa -150 m NN liegt (Abb. F. 2.1). Die Basis des Grundwasserleiters in der Gorlebener Rinne liegt nördlich der Elbe demgegenüber bei etwa -220 m bis -230 m NN. Die Basis des unteren Grundwasserleiters weist somit zwischen der Gorlebener Rinne und dem Zentrum der Randsenke eine Höhendifferenz von etwa 100 m auf. Die charakteristische Form und Verbreitung des Salzwasserkörpers im unteren Grundwasserleiter, d. h. seine weitgehend ebene Oberfläche und seine konvex ausgebildete Unterfläche, ist ein Abbild dieser Struktur. Sie hat ihre Ursache aber auch in der um 15 % bis maximal 20 % höheren Dichte der Salzwässer im Vergleich zu Süßwasser. Salzwässer, die aus der Gorlebener Rinne südlich der Elbe in Richtung Norden abströmen, folgen nicht dem weiteren Verlauf der Gorlebener Rinne, sondern werden dem Gefälle der Basis des Grundwasserleiters folgend nach Nordwesten zum Randsenkenzentrum abgelenkt. Dort sammeln sie sich aufgrund ihrer erhöhten Dichte an der Basis des Grundwasserleiters. Dabei belegt eine ausgeprägte Temperatur-

anomalie in der Gorlebener Rinne nördlich des Salzstocks ebenso wie die Verteilung der Porenwasserdrücke im Salzwasserkörper einen rezenten permanenten Salzwasseraustrag aus der Gorlebener Rinne in die nordwestliche Randsenke (Abb. F. 2.5).

### F.2.3 Isotopenhydrologische Untersuchungen

Die isotopenhydrologischen Untersuchungen an den Salzwässern aus der Gorlebener Rinne und der nordwestlichen Randsenke zeigen im Vergleich zu den Bohrlochtemperaturmessungen ein wesentlich komplexeres Bild. Innerhalb der Gorlebener Rinne herrscht ein engräumiger Wechsel zwischen Solen pleistozänen Alters und Solen mit Mischsignaturen pleistozänen und holozänen Alters vor. Daneben wurden aber auch vereinzelt Salzwässer eindeutig holozänen Alters nachgewiesen. Diese holozänen Solen treten bevorzugt an der Basis des Wasserleiters auf. In der nordwestlichen Randsenke im Verbreitungsgebiet der Unteren Braunkohlensande weisen die hochsalinen Wasser dagegen durchgängig ein pleistozänes kaltzeitliches Alter auf (Abb. F. 2.6).



**Abb. F. 2.6** Sauerstoff-Isotopensignaturen der Salzwässer mit  $> 200$  g/l Gesamtsalzgehalt im unteren Aquifer der Gorlebener Rinne und der nordwestlichen Randsenke (aus /KLI 07/)



Das Verteilungsmuster der Isotopensignaturen in der Gorlebener Rinne ist zunächst ein weiterer Beleg dafür, dass die rezente Grundwasserbewegung den unteren salzwassererfüllten Rinnengrundwasserleiter über dem Salzstock erfasst. Offensichtlich verdrängen dabei von Süden zuströmende holozäne Wässer ursprünglich vorhandene pleistozäne Wässer bzw. mischen sich mit diesen. Die teilweise Verdrängung der pleistozänen Solen durch junge holozäne Salzwässer beschränkt sich dabei bislang nur auf die Gorlebener Rinne bzw. die unmittelbar angrenzenden Bereiche. Der weitaus überwiegende Teil der Wässer in der nordwestlichen Randsenke weist dagegen ein pleistozänes Alter auf. Dies lässt auf einen insgesamt nur geringen Wasserdurchsatz durch den Rinnengrundwasserleiter im Holozän schließen. Der Befund steht somit im Einklang mit der Modellvorstellung, dass die Berücksichtigung der Salinität der Wässer im Vergleich zu Süßwasserbedingungen zu tendenziell längeren Laufzeiten führt.

Eine überschlagsmäßige Abschätzung der Volumina der Solen in der nordwestlichen Randsenke und der entsprechenden Wässer in der Gorlebener Rinne zeigt darüber hinaus, dass das in der nordwestlichen Randsenke gespeicherte Salzwasservolumen etwa dreifach höher als das in der Gorlebener Rinne ist /KLI 07/. Das große Volumen der Salzwässer in der Randsenke und deren durchweg pleistozän kaltzeitliche Isotopensignatur lassen darauf schließen, dass die Randsenke zu Beginn des Holozäns bereits zu einem großen Teil mit salinem Grundwasser erfüllt war. Der wesentliche Salzwasseraustrag aus der Gorlebener Rinne muss also in Verlauf der letzten pleistozänen Kaltzeit stattgefunden haben.

#### **F.2.4 Prinzipmodell zur Erklärung des Auftretens holozäner Grundwässer in der Gorlebener Rinne**

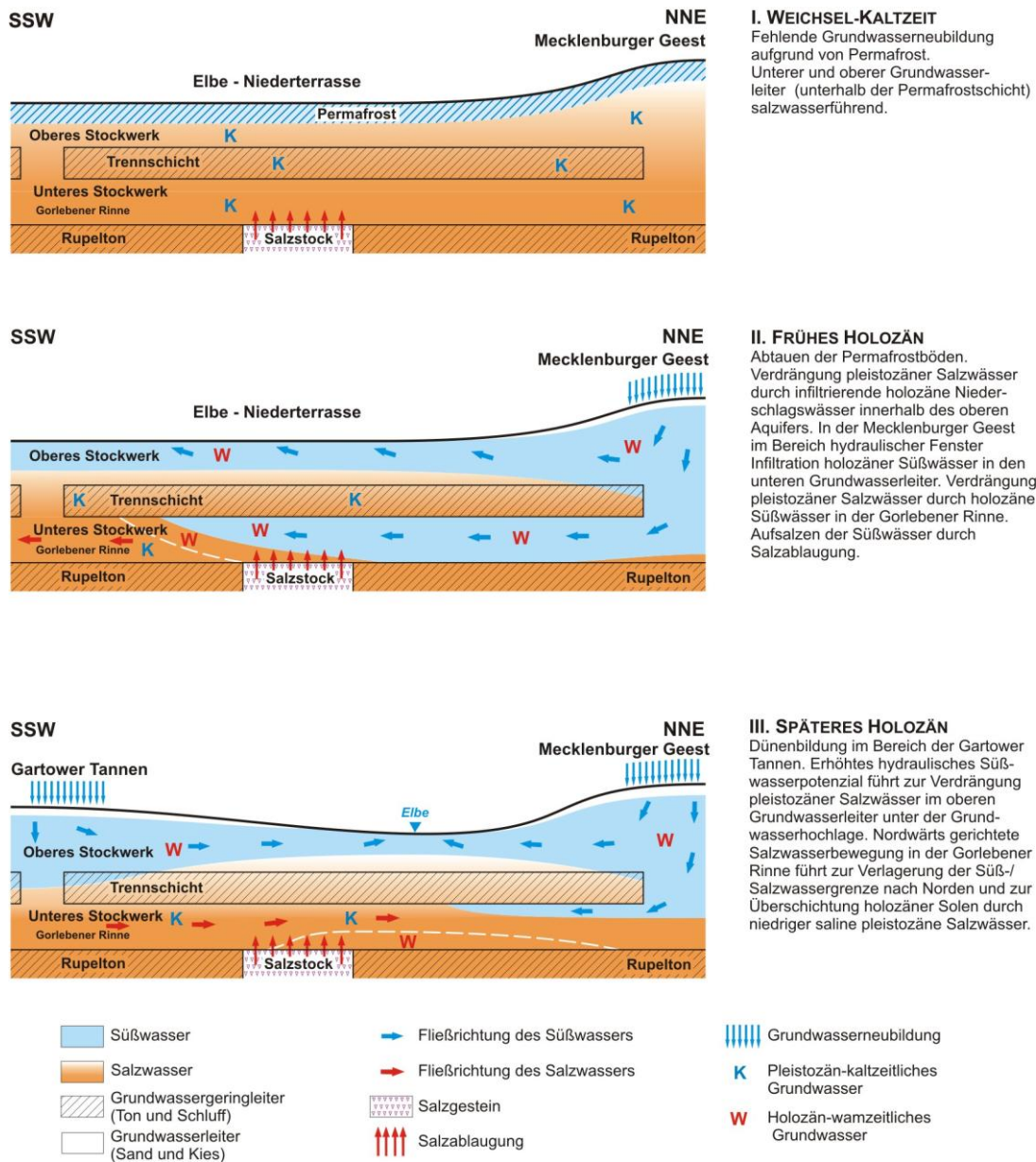
Nach dem oben skizzierten Modell einer Süd-Nord-gerichteten Salzwasserbewegung mit zur Tiefe hin abnehmenden Fließgeschwindigkeiten und sich zum Teil umkehrenden Bewegungsrichtungen müssten holozäne Wässer bevorzugt im oberen niedriger mineralisierten Teil des Grundwasserleiters angetroffen werden, während an der Basis des Grundwasserleiters bevorzugt pleistozäne Wässer zu erwarten wären. Tatsächlich treten Solen eindeutig holozänen Alters jedoch bevorzugt im hochsalinen Bereich an der Rinnenbasis auf. Diese Tatsache entzieht sich einer einfachen Deutung. Nachfolgend wird ein Modell skizziert, mit dem das Auftreten holozäner Solen an der Rinnenbasis prinzipiell erklärbar ist.

Generell stellt sich die prinzipielle Frage, in wie weit das Süß-/Salzwasser-Fließsystem im Untersuchungsgebiet während der pleistozänen Kaltzeiten vom rezenten Fließsystem abwich. Nach allgemeiner Kenntnis der klimatischen Bedingungen während der Weichsel-Kaltzeit kann angenommen werden, dass im Untersuchungsgebiet Gorleben eine mehr oder weniger geschlossene Permafrostdecke existierte /SCH 10/. Sie dürfte aufgrund fehlender Grundwasserneubildung zum Erliegen der lokalen Grundwasserfließsysteme und zu einem generellen Anstieg der Süß-/Salzwassergrenze unter topografischen Hochlagen geführt haben. Mit dem Auftauen der Permafrostböden im Zuge der Klimaerwärmung zu Beginn des Holozäns und dem erneuten Einsetzen der Grundwasserneubildung kam es dann unter den topografischen Hochlagen infolge der absteigenden Grundwasserbewegung zu einer Verdrängung der pleistozänen Salzwässer durch holozäne Süßwasser.

Bestimmend für das rezente hydraulische System der Gorlebener Rinne sind die Süßwasserpotenziale der Gartower Tannen im Süden und der Mecklenburger Geest im Norden der Rinnenstruktur. Das Druckpotenzial der Gartower Tannen, das im oberflächennahen Grundwasserleiter bei etwa 22 m NN liegt, induziert im Rinnengrundwasserleiter über dem Salzstock einen nordwärts gerichteten Salzwassertransport in die Elbe-Löcknitz-Niederung. Dem weiteren Transport nach Norden steht das Druckpotenzial der Mecklenburger Geest entgegen, das am Nordrand des Untersuchungsgebietes im Rinnengrundwasserleiter bei etwa 18 m NN liegt. Dieses wiederum führt im unteren Rinnengrundwasserleiter zu einem Süßwassereinstrom in die Elbe-Löcknitz-Niederung. Die südliche Verbreitungsgrenze dieses Süßwasserkörpers befindet sich innerhalb der Gorlebener Rinne derzeit unmittelbar nördlich der Elbe /KLI 07/.

Die topografische Hochlage der Gartower Tannen wird – im Gegensatz zu den saalezeitlichen Höhenrücken der Mecklenburger Geest – durch vergleichsweise junge, im Verlaufe des Holozäns entstandene Flugsandaufwehungen gebildet /KÖT 07/. Es ist daher vorstellbar, dass der Süßwasserkörper im unteren Grundwasserleiter aufgrund des noch nicht vorhandenen Gegenpotenzials im frühen Holozän weiter nach Süden bis in den Kontaktbereich zwischen Salinar und Rinnengrundwasserleiter über dem Salzstock gereicht hat und ursprünglich vorhandene pleistozäne Solen nach Süden verdrängte. Salzablaugung im Bereich der Kontaktzone führte zur Entstehung holozäner Solen. Mit der fortschreitenden Dünenbildung in den Gartower Tannen könnte das steigende Druckpotenzial im Süden dann wieder zu einer sukzessiven Verlagerung der Süß-/Salzwassergrenze nach Norden und zu einer Überschichtung holozäner Sol-

en durch niedriger saline pleistozäne Salzwässer bzw. durch niedriger saline Mischwässer geführt haben (vgl. Abb. F. 2.7).



**Abb. F. 2.7** Prinzipmodell zur Erklärung des Auftretens holozäner Solen an der Basis der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/)

Wie zuvor ausgeführt wurde, lässt sich aus der Verbreitung der Salzwässer im unteren Grundwasserleiter ableiten, dass ein Salzwasseraustrag der Abtragungswässer aus der Gorlebener Rinne in die nordwestliche Randsenke erfolgt. In Hinblick auf die Definition potenzieller Ausbreitungspfade vom Top der Oberfläche des Salzstocks ist in diesem Zusammenhang die Frage von Bedeutung, in wie weit ein Übertritt dieser

Salzwässer in oberflächennahe Grundwasserleiter erfolgt. Die charakteristische Form des Solenkörpers im unteren Grundwasserleiter der nordwestlichen Randsenke legt die Vermutung nahe, dass sich diese Salzwässer in der Randsenkenmulde an der Basis des unteren Grundwasserleiters sammeln, ohne dass ein nennenswerter Salzwasseraustrag in oberflächennahe Grundwasserleiter erfolgt. Gegen einen vertikalen Salzwasseraufstieg sprechen sowohl die lückenlose Verbreitung der stockwerkstrennenden Geringleiter in der Elbe-Löcknitz-Niederung sowie die Tatsache, dass aufgrund der Isotopenzusammensetzung der Porenwässer eine flächenhafte vertikale Wasserbewegung weitgehend ausgeschlossen werden kann /RÜB 00/. Da im Nordwesten des Gebietes im Bereich von Dömitz im Bereich einer vermuteten quartärzeitlichen Rinnenstruktur ein direkter hydraulischer Kontakt zwischen oberem und unterem Grundwasserleiter vermutet wird /KÖT 07/, könnte prinzipiell hier ein geringfügiger Austrag salzhaltiger Wässer in das oberflächennahe System infolge einer Vermischung von Süß- und Salzwässern in der Übergangszone zwischen dem Süßwasserkörper und den unterlagernden Solen erfolgen. Für diese Möglichkeit spricht die geringe Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze im Bereich von Dömitz.

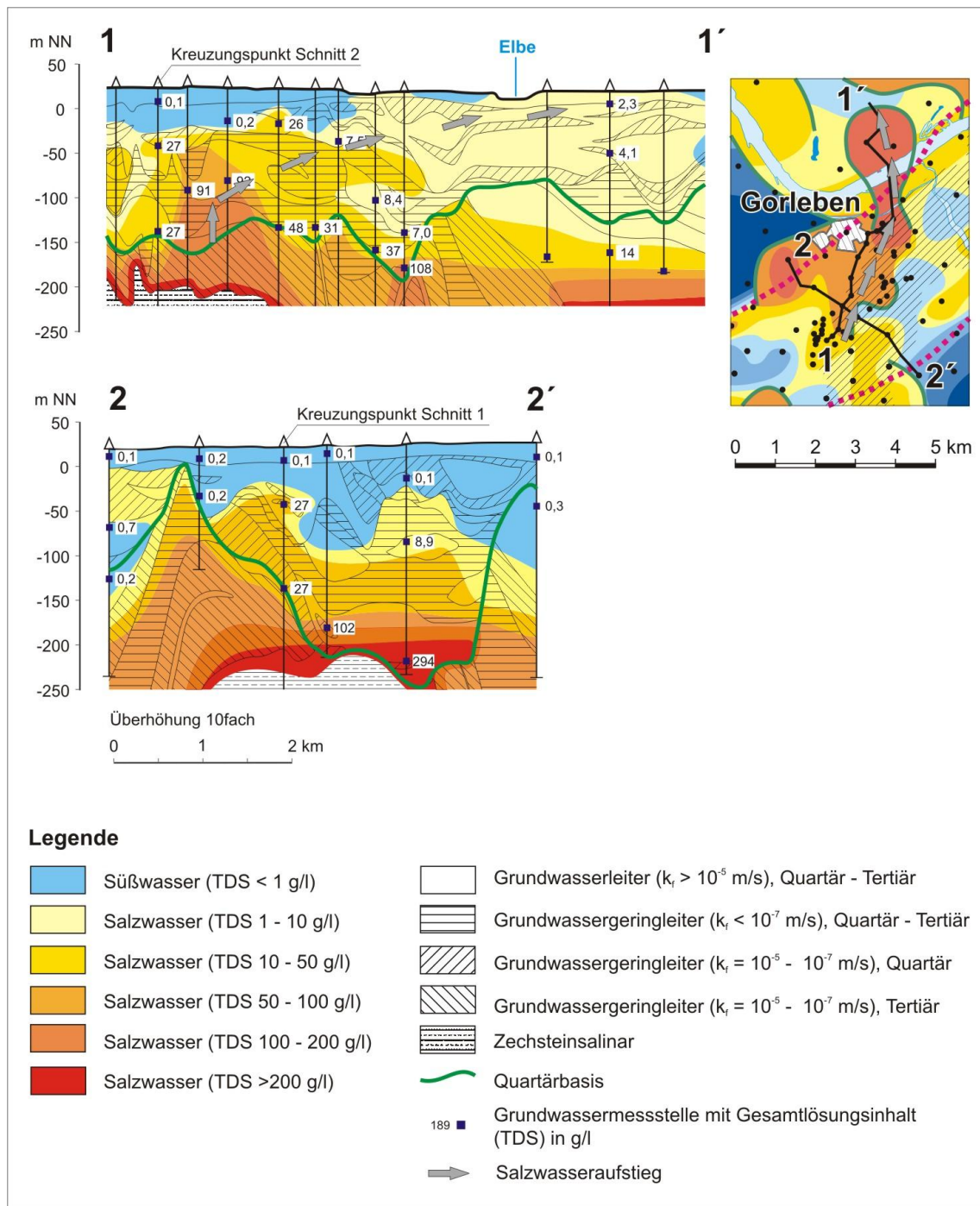
#### **F.2.5 Oberflächennahe Salzwasservorkommen**

Im Untersuchungsgebiet Gorleben treten in drei Bereichen oberflächennahe Salzwasservorkommen auf /KLI 10/ (vgl. Abb. F. 3.1). Im Einzelnen handelt es sich um:

- Versalzungsgebiete im weiteren Umfeld des Salzstocks Groß Heide–Siemen,
- in der Elbe-Löcknitz-Niederung insbesondere im Bereich des Rhinow-Kanals sowie
- eine weitere Hochlage am Westrand der Gorlebener Rinne über dem Salzstock Gorleben.

Die Versalzungsgebiete im weiteren Umfeld des Salzstocks Groß Heide–Siemen stehen aller Wahrscheinlichkeit mit Ablaugungswässer dieses Salzstocks in Verbindung, die in den Grundwasserentlastungsgebieten der Niederungen in den oberflächennahen Bereich gelangen. Bei den Salzwässern der Elbe-Löcknitz-Niederung handelt es sich um Wässer, die aufgrund eines direkten hydraulischer Kontakts zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasserleiter im Übergangsbereich der Salzstöcke Gorleben und Rambow aus dem unteren in den oberen Grundwasserleiter übertreten. Mit dem

elbabwärts gerichteten oberflächennahen Grundwasserabstrom gelangen diese Salzwässer dann in verdünnter Form bis in die den Rhinowkanal umgebende Niederung /KLI 07/.



**Abb. F. 2.8** Hydrochemische Vertikalschnitte durch die Salzwasserhochlage am Westrand der Gorlebener Rinne (verändert nach /KLI 07/)

In Hinblick auf den Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne ist eine weitere Hochlage am Westrand der Gorlebener Rinne von Bedeutung. Diese erstreckt sich in Richtung des Grundwasserabstroms in Nord-Süd-Richtung über eine Länge von etwa 6 km von dem Bereich unmittelbar nördlich des Schachtgeländes bis ans Nordufer der Elbe (Abb. F. 2.8). Im Süden dieser Hochlage wurde im Rahmen der Erkundung im oberen Grundwasserleiter eine eng begrenzte Zone sehr hoher Salzgehalte von bis ca. 90 g/l angetroffen. Allein aufgrund der hohen Salzgehalte ist eine direkte Anbindung an den unteren Rinnengrundwasserleiter wahrscheinlich, auch wenn in den Aufschlussbohrungen durchgängig Lauenburger Ton in unterschiedlicher Mächtigkeit angetroffen wurde. Die Süß-/Salzwassergrenze im Bereich dieser Zone steigt von Süden nach Norden an und erreicht an der Elbe die Grundwasseroberfläche, parallel dazu gehen die Salzgehalte der Grundwässer bis auf Werte um 2 g/l /KLI 07/. Zusammengenommen deuten diese Fakten darauf hin, dass hochsaline Wässer aus dem unteren Rinnengrundwasserleiter über eine räumlich begrenzte vertikale hydraulische Verbindung am westlichen Rinnenrand in den oberen saalezeitlichen Grundwasserleiter übertreten und sich in Richtung des Grundwasserabstroms zur Elbe ausbreiten. Ursache der vertikalen Verbindung könnte die starke glazitektonische Überprägung der primären Lagerungsverhältnisse im Verlaufe der saalezeitlichen Vereisungsphase sein /KÖT 07/.

### **F.3 Zusammenfassende Diskussion**

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die bestehende Süß-/Salzwasserverteilung eindeutige Rückschlüsse auf den Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne erlaubt und damit die Definition von zwei unterschiedlichen potenziellen Ausbreitungspfaden von der Salzstockoberfläche in die Grundwasser leitenden Schichten zulässt. Abbildung F. 3.1 illustriert diese beiden Ausbreitungspfade in Form einer schematischen Darstellung:

1. Ein Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne in die Randsenke im Nordwesten des Salzstocks. Aufgrund der im Vergleich zu Süßwasser erhöhten Dichte der hochkonzentrierten Solen sammeln sich diese an der Basis der geschlossenen Muldenstruktur der nordwestlichen Randsenke, ohne dass ein nennenswerter direkter vertikaler Austrag in oberflächennahe Grundwasserleiter erfolgt. Möglicherweise kommt es weiter Elbe abwärts westlich von Dömitz im Bereich eines

vermuteten hydraulischen Fensters zu einem Austrag verdünnter Salzwässer in das oberflächennahe System.

2. Ein wahrscheinlich direkter vertikaler Salzwasseraufstieg in den oberen Grundwasserleiter im Bereich eines lokal begrenzten hydraulischen Fensters am Westrand der Gorlebener Rinne. Die Salzwässer breiten sich mit dem regionalen Grundwasserabstrom nach Norden aus und erreichen in den Grundwasseraufstromgebieten der Elbeniederung in verdünnter Form die Grundwasseroberfläche.

Wesentlich schwieriger gestaltet sich die Quantifizierung des Salzwassertransports, d. h. die Angabe von Salzwasser-Transportraten und -Fließgeschwindigkeiten. Für den Ausbreitungspfad im unteren Grundwasserleiter führten dreidimensionale Süßwasser-Strömungsmodelle zu Laufzeiten in der Größenordnung von 10 000 Jahren. Eine direkte vertikale Ausbreitung von Wässern aus dem unteren Rinnengrundwasserleiter in den oberen Grundwasserleiter über lokal begrenzte vertikale hydraulische Fenster im Lauenburger-Ton-Komplex wurde bei Modellrechnungen bisher nicht betrachtet. Erwartungsgemäß führen solche Süßwassermodelle generell zu vergleichsweise kurzen Laufzeiten, spiegeln jedoch die in der Realität stark Dichte-beeinflussten Strömungsvorgänge der Salzwässer in der Gorlebener Rinne nur in sehr eingeschränktem Maße wider. Zweidimensionale Süß-/Salzwasser-Modellrechnungen durch die Gorlebener Rinne zeigen, dass mit tendenziell kleineren Fließgeschwindigkeiten und Transportraten der Salzwässer zu rechnen ist. Diese Ergebnisse decken sich mit den Isotopensignaturen der Salzwässer in der Gorlebener Rinne. Die Tatsache, dass etwa 10 000 Jahre nach Ende der letzten pleistozänen Kaltzeit die Salzwässer teilweise noch kaltzeitlich geprägt sind, bzw. Anteile kaltzeitlicher Wässer enthalten, lässt auf eine insgesamt geringere Durchströmung der Rinne im Vergleich zu Süßwasserbedingungen schließen. Bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten und Transportraten aus der Gorlebener Rinne können die Ergebnisse der dreidimensionalen Süßwassermodelle daher als konservativ angesehen werden. Eine weitergehende Quantifizierung von Salzwasser-Transportraten und -Fließgeschwindigkeiten erfordert den Einsatz realitätsnäherer dreidimensionaler Fließmodelle, welche die ortsvariable Dichte der Grundwässer berücksichtigen.







## **F.4 Literaturverzeichnis**

- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, H., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.R., Rübel, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A., Standortbeschreibung Gorleben, Teil 1, Die Hydrogeologie des Salzstocks Gorleben, Geol. Jb., C71, 147 S., 2007, Hannover.
- /KLI 10/ Klinge, H., Ludwig, R.-R. & Willscher, B., Die Süß-/Salzwasserverteilung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben, in Vorber., 2010.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M. & Zwirner, R., Standortbeschreibung Gorleben, Teil 2, Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geol. Jb., C72, 201 S., 2007, Hannover.
- /PTB 83/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Zusammenfassender Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben. – Unveröff. Ber., 1983, Braunschweig.
- /RÜB 00/ Rübel, A. P., Stofftransport in undurchlässigen Gesteinsschichten. Isotopenuntersuchungen im Grund- und Porenwasser. - ISBN 3934366376, Der Andere Verlag, Osnabrück, 2000.
- /SCH 10/ Schelkes, K., Vogel, P. & Schmidt, G., in Vorber., Modelluntersuchungen zur Grundwasserbewegung im Zusammenhang mit Erkundung und Langzeitsicherheit am Standort Gorleben, 2010.



## **G            Bedeutung von ausgewählten eiszeitlichen Prozessen für die Langzeitsicherheit von Endlagerstandorten in Norddeutschland**

S. Keller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### **G.1            Einleitung**

In Deutschland werden Steinsalz und Tongestein als Wirtsgesteine zur Aufnahme hochradioaktiver, wärmeentwickelnder Abfälle (HAW) diskutiert. Die Gesteine sollen in Tiefen zwischen 300 und 1 000 m die Abfälle aufnehmen und über einen Zeitraum von einer Million Jahre sicherstellen, dass sie dort isoliert bleiben und nicht über einen Wasserpfad vom Endlager bis zur Biosphäre gelangen. Dementsprechend müssen im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse die geologische Entwicklung der Wirtsgesteine aber auch die der darüber liegenden Deckgebirgsschichten und die damit verbundenen Änderungen der hydrogeologischen Verhältnisse betrachtet werden.

Die Gesteine an einem möglichen Endlagerstandort können durch endogen oder exogen bedingte Ursachen verändert werden. Zu den endogenen gehören z. B. tektonische oder magmatische Prozesse. Bei einer sorgfältigen Wahl des Standortes sollten diese Prozesse allerdings nur langsam ablaufen und nur geringe Auswirkungen auf die Gesteine am gewählten Endlagerstandort in der nächsten Million von Jahren haben /vgl. AKE 02/. Als exogene Kräfte kommen im Wesentlichen die sich aus den klimatischen Veränderungen ergebenden Prozesse in Frage. Sie laufen im geologischen Zeitmaß betrachtet sehr viel schneller ab und waren in den vergangenen Hunderttausenden von Jahren für die drastische Umgestaltung der norddeutschen Landschaft und der Gesteine der obersten Erdkruste verantwortlich.

Im Folgenden werden die klimatisch bedingten Prozesse aus den Geschehnissen der letzten Million von Jahren beschrieben und darauf aufbauend die Auswirkungen der maßgeblichen Prozesse für die zukünftige Entwicklung der Gesteinsschichten und die Gestaltung der hydrogeologischen Verhältnisse abgeschätzt. Die sich daraus ergebende Relevanz für die Bewertung einer Eignung beider Wirtsgesteine Steinsalz und Tongestein für die sichere Einlagerung von radioaktiven Abfällen wird zur Diskussion gestellt.

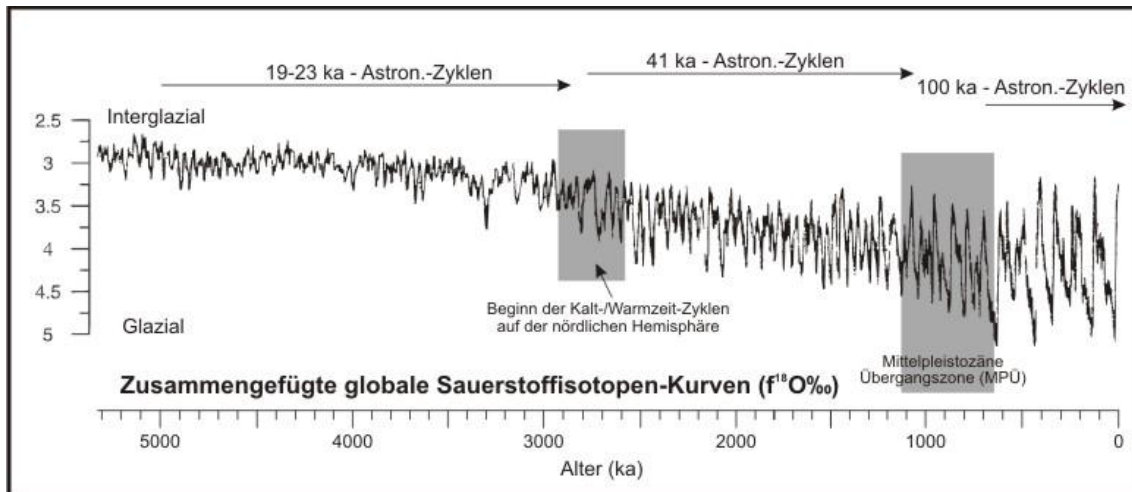
## **G.2 Die klimatische Vergangenheit Norddeutschlands abgeleitet aus weltweit gewonnenen Klimadaten**

Erklärungen für den globalen und damit den für Norddeutschland gültigen Klimaverlauf während der vergangenen Millionen von Jahren beruhen auf den Veränderungen, die sich weltweit aus der Umstellung von Meeresströmungen, dem Entstehen junger Faltengebirge, plattentektonischer Vorgänge, dem Auftreten neuer Pflanzen in Verbindung mit dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre, usw. ergaben /vgl. SMI 08: fig. 9.9/. Eine allgemein gültige Theorie, die die Ursachen des Klimaverlaufs erklärt, ist bislang allerdings noch nicht akzeptiert worden. Als Fakt bleibt festzuhalten, dass die mittleren globalen Temperaturen ab Mitte des Tertiärs stetig sanken, was letztlich mit Annäherung an die Jetzt-Zeit zu einem Wechsel von Warm- und Kaltzeiten führte.

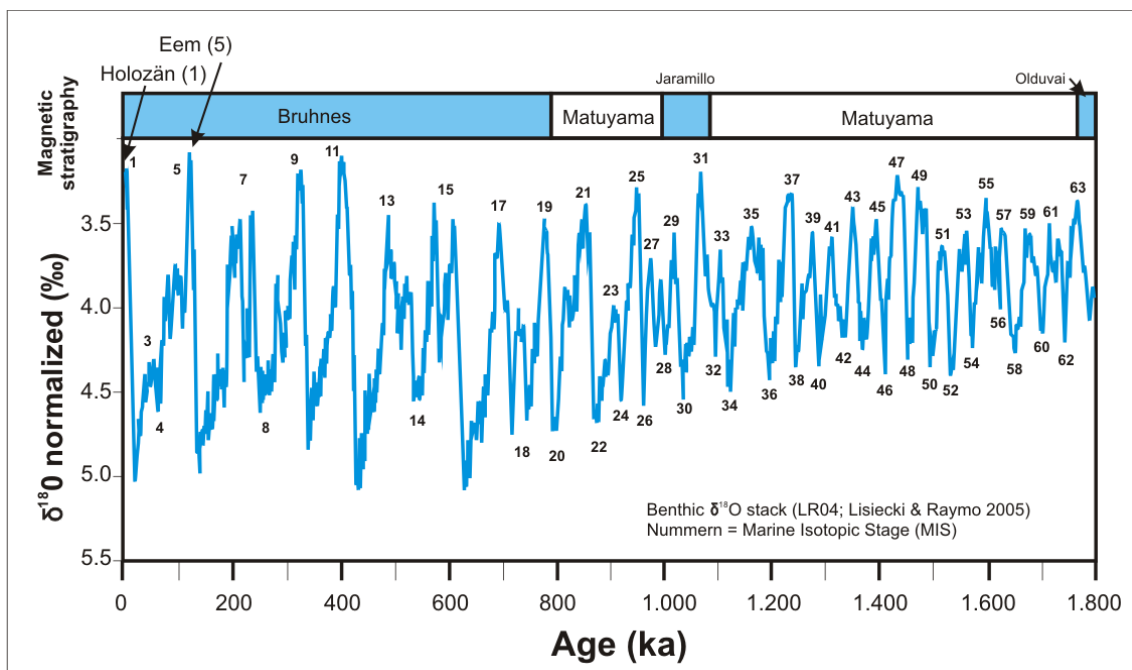
Mit dem Beginn des Tertiärs vor etwa 65 Millionen Jahre herrschten für die Dauer von weiteren 30 Mio. Jahre durchgängig warme Verhältnisse vor, wie sie schon aus der vorangegangenen Zeit der Oberkreide bekannt sind. Ab 35 Mio. Jahre vor heute kam es zunächst zu einer zeitweisen und später zu einer vollständigen Vereisung der Antarktis. Die nördliche Halbkugel blieb dagegen bis etwa 2,7 Mio. Jahre vor heute eisfrei /LIS 05/. Die mit diesem Zeitpunkt einsetzende Vereisung zeigt eine deutliche Zyklizität zwischen Kalt- und Warmphasen. Erklärt wird dies mit einer Theorie, die mit dem Namen des serbischen Astrophysiker M. Milanković verbunden ist. Nach Milanković hängt der Energieeintrag an Solarstrahlung in das irdische Klimasystem u. a. von der Position und Orientierung der Erde gegenüber der Sonne ab. Astronomische Parameter wie die Exzentrizität der Erdumlaufbahn, die Schiefe der Ekliptik sowie die Präzession der Erdrotationsachse unterliegen aufgrund gravitativer Einwirkungen von Sonne, Mond und Planeten charakteristischen Variationszyklen (Milanković-Zyklen), die mit knapp 100 000 Jahren (Exzentrizität), ca. 41 000 Jahren (Obliquität) und etwa 19 000 – 23 000 Jahren (Präzession) entsprechend lang andauernde klimatische Veränderungen auslösen sollen. Die breiten- und saisonabhängigen Insolationsschwankungen aus diesen Milanković-Zyklen waren bei den langfristigen globalen Klimavariationen offenbar modifizierend wirksam und werden heute als Schrittmacher der pleistozänen Klimazyklen mit Wechseln von Glazialen (Kaltzeiten) und Interglazialen (Zwischeneiszeiten = Warmzeiten) angesehen /vgl. a. LIS 07/.

Der Klimaverlauf während der letzten fünf Millionen Jahre ist durch die Sauerstoffisotopen-Kurve in Abbildung G. 2.1 dargestellt. Die Messwerte von <sup>18</sup>O- und <sup>16</sup>O-Isotopen

können als Klimaindikatoren genutzt werden, da sich das  $^{18}\text{O}$ -Isotop in Kaltphasen durch ein Wiederholen von Verdunstung und Niederschlag im Ozeanwasser anreichert. Der  $^{18}\text{O}$ -Kurvenverlauf kann daher mit dem Klimaverlauf gekoppelt werden, der aus den Veränderungen der oben genannten astronomischen Parameter abzuleiten ist.



**Abb. G. 2.1** Klimaentwicklung aus Sauerstoffisotopendaten. Zusammengeführte globale Sauerstoffisotopen-Kurven (verändert aus /BAR 07/: zit. /LIS 05/)

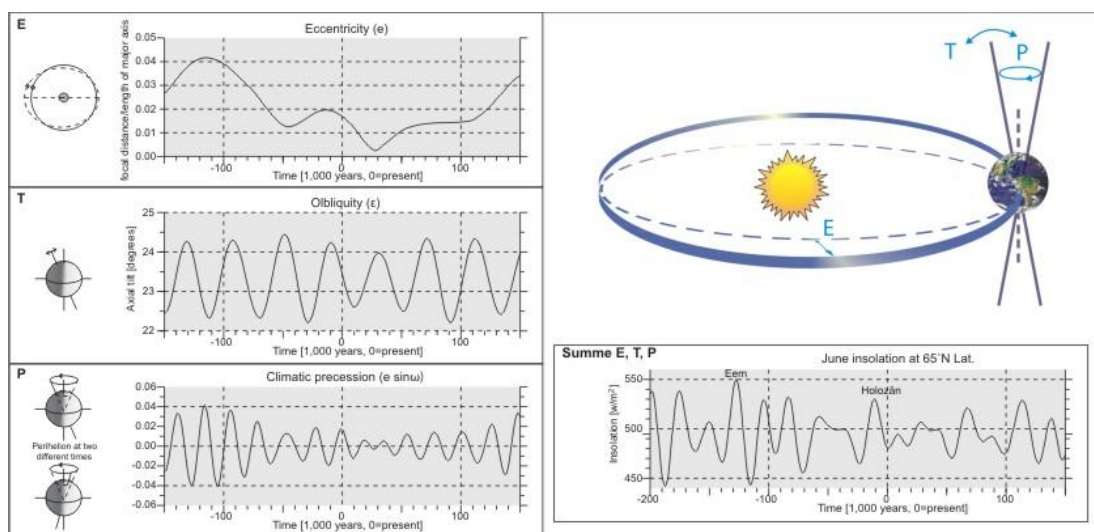


**Abb. G. 2.2** Sauerstoffisotopen-Kurve der letzten 1,8 Mio. J. (/BAS 07/: zit. /LIS 05/)

Im Laufe der Zeit ergeben sich aber deutliche Veränderungen im  $^{18}\text{O}$ -Kurvenverlauf. Während bis etwa 3 Mio. Jahre die durch die Präzession bedingten Zyklen vorherrschen, sind danach bis etwa 800 Jahre die 41 000 Jahreszyklen mit ihren ersten nachgewiesenen Vereisungen auf der Nordhalbkugel dominant im Klimageschehen zu erkennen. Nach einer Übergangszone im Mittelpleistozän werden ab 800 000 Jahre diese von Zyklen mit einer Dauer von ca. 100 000 Jahre abgelöst (vgl. a. Abb. G. 2.2). Im Kurvenverlauf ist eine Spreizung, aber auch eine Amplitudenerhöhung ersichtlich, was eine Intensivierung der Temperaturgegensätze dokumentiert und auf die damit einhergehende Ausbreitung großer Inlandgletscher nach Mitteleuropa hinweist.

### G.3 Klimatische Zukunft

Da zwischen den Milanković-Zyklen und den Messwerten von Klimaindikatoren (vgl. Sauerstoffisotopen-Kurve der Abb. G. 2.1, Abb. G. 2.2, bzw. Abb. G. 3.1) ein Zusammenhang besteht, ist eine Extrapolation des vergangenen Klimageschehens auf Grundlage der Milanković-Zyklen möglich. Voraussetzung ist, dass die gültigen klimasteuernden Gesetzmäßigkeiten der letzten Hunderttausende von Jahren in Zukunft weiter bestehen. Das schließt insbesondere einen anthropogen verursachten Klimawandel durch den gesteigerten Ausstoß von Treibhausgasen aus. Dieser würde aber vorrangig warmzeitliche Verhältnisse stabilisieren als eine weitere Kaltzeit fördern.



**Abb. G. 3.1** Milanković-Zyklen und Prognose für die klimatische Zukunft bis 150 000 Jahre (vergl. /COC 06/; verändert aus /MOR 01/)

Auf diesen Postulaten aufbauend ergibt sich ein hypothetisches Klimabild für den Zeitrahmen der nächsten Million Jahre. Demnach muss die Entwicklung von zehn weiteren Kalt-/Warmzeit-Abfolgen bei einem Fortbestehen der Hunderttausendjahreszyklen unterstellt werden, von denen bei entsprechenden Randbedingungen (z. B. Niederschlag, Temperaturverhältnisse) einige auch das Ausmaß der Elster- oder Saale-Kaltzeit erreichen können. Während dieser Kaltzeiten gelangte das Inlandeis von Skandinavien kommend bis an den Fuß der deutschen Mittelgebirge. Abbildung G. 3.1 zeigt beispielhaft die mögliche klimatische Entwicklung anhand der errechneten Sonneneinstrahlung für den Monat Juni entlang des 65. Breitengrades. Der Verlauf der Strahlungskurve entspricht etwa dem für die Holstein-Warmzeit (MIS 11) vor mehr als 300 000 Jahren /BER 07, MÜL 07/, die verglichen mit anderen Warmzeiten lang andauerte. Entsprechend ist zu vermuten, dass sich die augenblicklich bestehenden warmzeitlichen Verhältnisse für eine gewisse Dauer und unterbrochen von kühleren Phasen fortsetzen. In der darauffolgenden Zukunft werden die Temperaturen weiter sinken, was ab 100 000 Jahre nach heute letztlich eine erneute Kaltzeit mit einem weiteren Gletschervorstoß bis nach Norddeutschland ermöglichen würde.

#### **G.4      Beeinflussungen und Randbedingungen der             Deckgebirgshydrogeologie aufgrund von eiszeitlichen             Prozessen**

Das im vorausgehenden Kapitel dargestellte hypothetische Klimabild für die Zukunft der nächsten Million Jahre bedeutet für die hydrogeologischen Verhältnisse eines über dem Wirtsgestein eines Endlagers für radioaktive Abfälle liegenden Deckgebirges weit reichende Konsequenzen. Im Wechsel der Kalt- und Warmzeiten kommt es durch die allmähliche Abkühlung zur Ausbildung von Permafrost und bei entsprechenden Voraussetzungen auch zu einer Ausbreitung von Inlandeis. Beides beeinflusst die Grundwasserhydraulik, indem klimatisch bedingte Prozesse die entsprechenden hydrogeologischen Parameter der Deckgebirgsschichten verändern. Im Extremfall eines Gletschervorstoßes mit der Eisüberdeckung eines Standortes kann das Deckgebirge insgesamt oder in Teilbereichen umgestaltet werden. Der dem extremen Temperaturwechsel zugrunde liegende Auf- und Abbau der Inlandeisgletscher bedingt eine Absenkung oder Hebung des Meeresspiegels um mehr als 100 m.

#### G.4.1 Permafrost

Permafrost ist als ein Boden definiert, der wenigstens zwei Jahre in Folge Temperaturen von 0 °C oder darunter aufweist /ETZ 05/. Er entsteht, wenn die Jahresmitteltemperaturen niedriger als -2 °C sind. Vereinfacht sind drei Typen des Permafrostes zu unterscheiden: kontinuierlicher Permafrost (durchgehend flächig), diskontinuierlicher Permafrost (flächig, mit einzelnen ungefrorenen Teilbereichen) und sporadischer Permafrost (flächig ungefroren, mit einzelnen gefrorenen Teilbereichen).

/DEL 07/ simulieren die Mächtigkeitentwicklungen des Permafrostes in Norddeutschland für das Pleistozän auf Basis der Sauerstoffisotopendaten (Tiefseebohrkerne ODP 659 u. 677) und den daraus abgeleiteten mittleren Jahresbodentemperaturen. Die maximalen Mächtigkeitwerte im Altpleistozän liegen danach zwischen ca. 50 und 80 m. Sie wachsen ab ca. 800 ka bis etwa 450 ka BP im Laufe der verschiedenen Kaltzeiten kontinuierlich auf ca. 170 m an. Aus Klimadaten leiten /FRE 92/ Permafrostmächtigkeiten bis zu 200 m für die Weichsel-Kaltzeit in Norddeutschland ab.

Durch den Permafrost werden die Grundwasserverhältnisse nachhaltig beeinflusst. Der Grundwasserfluss findet nur in der sommerlichen Auftauschicht an der Erdoberfläche oder unterhalb des Permafrostes statt. Der Grundwasserstrom kann dort durch ein entsprechendes hydraulisches Potential über anstehende Schmelzwässer in einem nahen Inlandeisgletscher stark erhöht sein /BOU 01/. Wenn solch ein hohes hydraulisches Potential fehlt, weil die im Gletscher anfallenden Schmelzwässer nicht vorhanden und die Grundwasserneubildungsgebiete durch den Permafrost versiegelt sind, dann können sich geringere Fließgeschwindigkeiten einstellen.

Wassergesättigte, gefrorene Gesteinsschichten haben eine deutlich reduzierte hydraulische Leitfähigkeit. Wegen des höheren Wasseranteils gefrieren tonige Sedimente bei tieferen Temperaturen langsamer als sandige.

Die Grundwasserneubildung ist in den Gebieten mit kontinuierlichem Permafrost äußerst begrenzt und erfolgt über saisonal beständige hydrothermale Taliki oder eingeschränkt über eine mögliche Klüftung. Grundwasseraustrittsgebiete sind im Wesentlichen auf offene Taliki unterhalb größerer Oberflächengewässer beschränkt. Durch das Gefrieren reichern sich die im Grundwasser enthaltenen Mineralien in bestimmten Zonen des Permafrostes an (Cryopegs), um bei entsprechenden hydraulischen Voraus-



setzungen als hochsalinare Wässer in Form von Salzwasser-Quellen zu Tage zu treten (hydrochemische Taliki; vgl. /GAS 00/).

Zusammenfassend gilt für Zeiten mit kontinuierlichem Permafrost:

- Der gefrorene Boden weist eine geringe Permeabilität auf und verhält sich wie ein Grundwassergeringleiter.
- Das Grundwasserfließgeschehen beschränkt sich überwiegend auf die aktive, saisonal aufgetaute Schicht an der Oberfläche oberhalb vom Permafrost.
- Unterhalb von größeren Seen oder Flüssen sind ungefrorene Bereiche, so genannte Taliki möglich, durch die eine Grundwasserneubildung oder ein Grundwasseraustritt stattfinden kann.

#### **G.4.2 Eismächtigkeiten**

Eine zukünftige Inlandvereisung wird wie in der Vergangenheit von Skandinavien ausgehen. Dementsprechend ist in Skandinavien mit den größten Eismächtigkeiten zu rechnen. Aus den Kenntnissen über die vergangenen Kaltzeiten sind auch zukünftig Eismächtigkeiten von etwa 2 bis 3 km möglich. In Norddeutschland fallen die Eismächtigkeiten wegen der Ferne zum Nährgebiet mit nur einigen Hundert Metern geringer aus. Für den Bereich der Rehburger Endmoräne werden beispielsweise 300 bis 350 m und für den Außenrand des saalezeitlichen Inlandeises am Südrand der westfälischen Bucht Mächtigkeiten von 130 bis 170 m bzw. für den Oberweserraum von etwa 200 m genannt /SKU 03/. Nach /FEL 02: 71ff.; Abb. 37/ kann die Mächtigkeit des Inlandeises im Bereich Gorleben zur Saale-Kaltzeit mit ca. 500 bis 700 m abgeschätzt werden.

Mit fortschreitender Dauer der Inlandvereisung und bei großen Eismächtigkeiten von mehreren hundert Metern erfolgt unterhalb des Eises ein Permafrostrückgang. In Folge dessen ändert sich die hydraulische Durchlässigkeit der Sedimente. Die Fließrichtungen oder Fließgeschwindigkeiten des Grundwassers bei einer mächtigen Inlandvereisung lassen sich nicht genau prognostizieren. Allerdings erlauben die Eismächtigkeiten über einem bestimmten Punkt Rückschlüsse auf das zu vermutende hydraulische Potential, das sich aus der Wassersäule der von der Gletscheroberfläche über Spalten und Gletschermühlen zur Basis des Gletschers strömenden Schmelzwässer ergibt. Generell wird wegen des hydraulischen Wirkens der Schmelzwässer die Grundwasserfließrichtung senkrecht auf den Gletscherrand ausgerichtet sein. Das Gefälle der Glet-

scherstirn ist zusammen mit anderen Einflussgrößen nach einigen Autoren (z. B. /KRI 08/) verantwortlich für die Grundwasserströmungsverhältnisse und für Auswirkungen des strömenden Grundwassers im Bereich der Gletscherstirn.

Es ist bei Eismächtigkeiten über 1 000 m zu vermuten, dass weniger Schmelzwässer anfallen, da aufgrund der Höhenlage geringere Temperaturen herrschen, was nur zu einem geringen Abschmelzen des Eises an seiner Oberfläche führt. Einen Zusammenhang zwischen Temperatur, Schmelzwassermengen und der Bildung von glaziären Rinnen sehen z. B. /DIJ 96/, woraus indirekt eine Begründung der Nordgrenze von Rinnenvorkommen abgeleitet werden könnte.

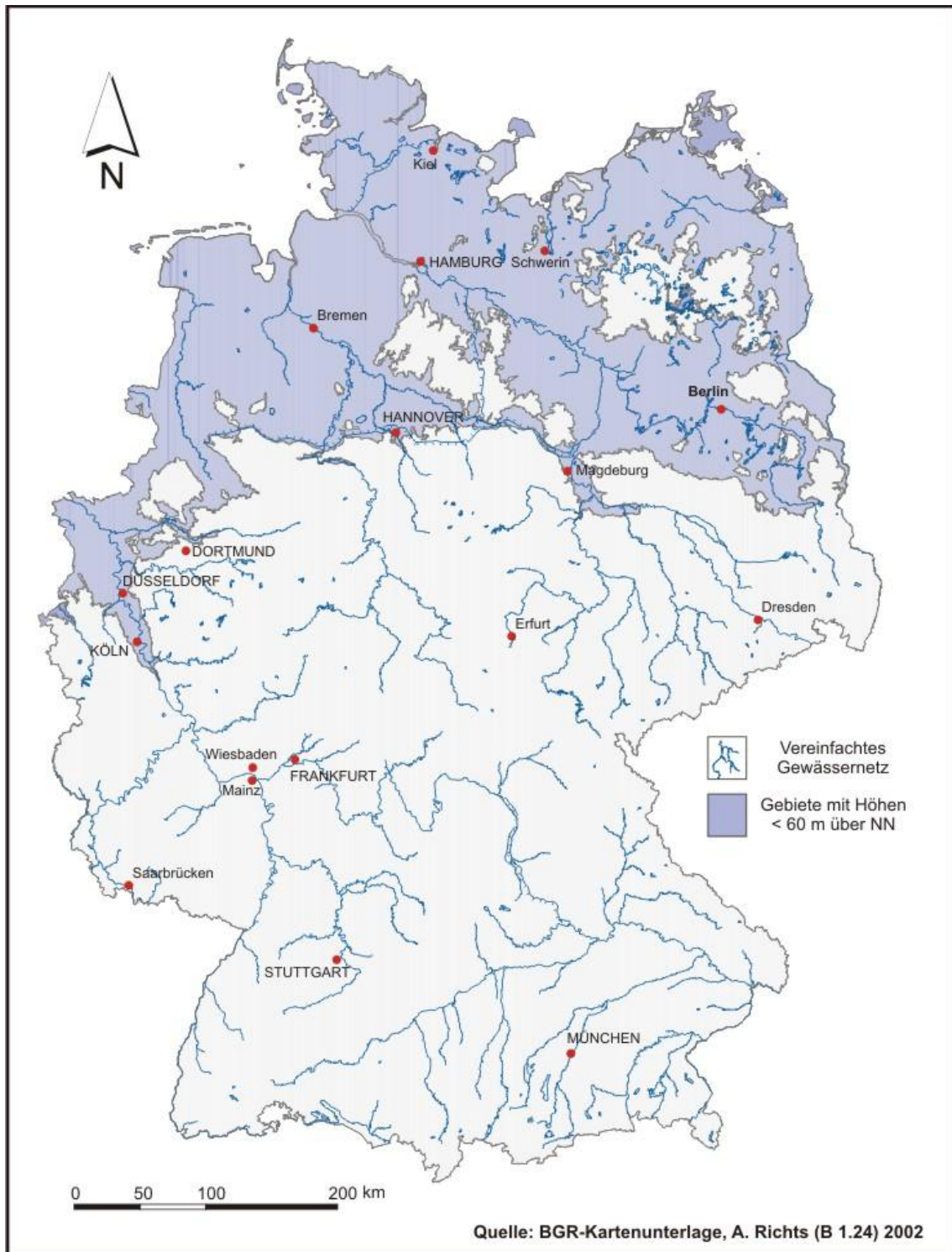
#### **G.4.3 Eistektonik und Exaration**

Durch die Eisüberfahrung werden oberflächennahe Schichten erodiert (Exaration) und/oder eistektonisch gestört. Beide Möglichkeiten beinhalten eine Destruktion bestehender Lagerungsverhältnisse, die zu einer Zu- oder Abnahme der hydraulischen Durchlässigkeit der wasserstauenden und -leitenden Schichten führt. Gestörte Lagerungsverhältnisse sind in Norddeutschland von verschiedenen Stellen bekannt, die eine Überdeckung mit Inlandeis erfuhren /EIS 87; HAN 95/. Sie reichen in Tiefen von 200 bis 300 m. Der Höhbeck bei Gorleben stellt ein Beispiel für Gebiete mit vom Gletscher verursachten Lagerungsstörungen dar. Dort wurden eistektonische Deformationen von ca. 120 – 150 m u. GOK in quartären Sedimenten festgestellt, die in den darunter liegenden tertiären Ton- und Schluffsteinen allmählich ausklingen /DUP 83/. Die Auswirkungen der Gletscher bedingten Tektonik sind insbesondere für die Deckgebirge möglicher Endlager im Tongestein zu berücksichtigen, die in einer relativ geringen Tiefe von 300 – 500 m angelegt werden sollen.

#### **G.4.4 Meeresüberdeckung**

Im Verlauf einer Kaltzeit erfolgt nach Erreichen des Maximums rasch eine Erhöhung der mittleren Jahrestemperaturen, was zu einem Abschmelzen der Gletscher und einem Anstieg des Meeresspiegels führt. Je nach Ausmaß der Erwärmung schmelzen ein Teil oder das gesamte auf der Erde befindliche Inlandeis ab. Ein teilweises Abschmelzen führte z. B. während der vergangenen Warmzeiten zu einer regional unterschiedlichen Überflutung Norddeutschlands, wobei das Meerwasser die durch das vorausgehende Gletscherwirken entstandenen Depressionen bevorzugt auffüllte. Bei

einem vollständigen Abschmelzen kann der Meeresspiegel auf eine Höhe steigen, die verglichen mit der heutigen um einige Zehnermeter höher liegt. Norddeutschland würde dann in weiten Teilen überflutet werden. Das Ausmaß der Überflutung bei einem vollständigen Abschmelzen der heute noch vorhandenen Inlandgletscher wird durch Abbildung G. 4.1 deutlich. Dieses Szenario kann auch zur Beschreibung der Auswirkungen herangezogen werden, die mit den Folgen des Treibhausgasausstoßes durch den Menschen und eines damit möglichen Klimawandels verbunden sind. Das vollständige Abschmelzen aller Eismassen hat das Potential, den Meeresspiegel um ca. 60 – 70 m anzuheben /vgl. LEX 00; ALL 05/. Die Meeresüberdeckung kann im Deckgebirge zu einer Aufsatzung des Grundwassers führen. Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse werden von /FLÜ 07; NOS 09/ simuliert. Sie zeigen, vereinfachend zusammengefasst, die Ablösung der advektiven durch diffusive Transportprozesse mit einer Aufsatzung der Schichten zur Tiefe hin.



**Abb. G. 4.1** Meeresspiegelanstieg mit Überflutungen von Gebieten (< 60 m ü. NN) nach einem vollständigen Abschmelzen aller Gletscher

#### **G.4.5 Grundwasserneubildung und -austritt**

Die mit der Überführung eines Gebietes durch mächtige Inlandgletscher, dem Rückzug und Tauen der Eismassen verbundenen Gesteinsumlagerungen bewirken eine nachhaltige Umgestaltung der Erdoberfläche. Aus dieser umgestalteten Morphologie ergeben sich Änderungen für die Lage von Grundwasserneubildungs- und Grundwasseraustrittsgebieten. Die Höhe der Grundwasserneubildungsraten hängt dabei vom jeweils herrschenden Klima, der Vegetation und den neu geschaffenen Bodenverhältnissen ab.

#### **G.4.6 Grundwasserchemie**

Die Chemie des Grundwassers kann sich während einer Kaltzeit durch verschiedene Ursachen ändern. Bei anhaltend tiefen Temperaturen und einer darauf aufbauenden Bildung von Permafrost reichern sich durch das Gefrieren die im Grundwasser gelösten Mineralien in bestimmten Zonen des Permafrostes an (Cryopegs), um bei entsprechenden hydraulischen Voraussetzungen als hochsalinare Wässer in Form von Salzwasser-Quellen zu Tage zu treten (hydrochemische Taliki; vgl. /GAS 00/).

Rezent nimmt in der Norddeutschen Tiefebene die Mineralisation des Grundwassers zur Tiefe hin zu. Lokal sind auch oberflächennahe hochsaline Vorkommen z. B. in Küstennähe oder im Bereich von Salzstöcken möglich (vgl. /MAG 05/). Diese Vorkommen können im Zuge der Gletscherdynamik bei entsprechenden hydraulischen Verhältnissen durch Süßwässer ausgetauscht werden. Für Salzstöcke bedeutet dies, dass sie während Kaltzeiten einer verstärkten Subrosion am Salzspiegel ausgesetzt sein können, wenn sich dieser in einer entsprechend geringen Tiefenlage befindet und damit eine geringe bzw. fehlende Gesteinsüberdeckung aufweist /KEL 90/.

#### **G.4.7 Kaltzeitliche Rinnen**

Kaltzeitliche Rinnenbildungen beruhen auf dem oberflächigen Abfluss großer Wassermengen, die durch ihre hohen Transportleistungen tiefe Einschnitte in den Untergrund verursachen können. Speziell aus der Elster-Kaltzeit und in geringem Maße auch aus der Saale- und Weichsel-Kaltzeit ist die Bildung von Rinnensystemen **unterhalb** der großen Inlandgletscher bekannt. Die Rinnen gehören zu den auffälligsten Phänomenen einer Kaltzeit. Die mit ihrer Entstehung verbundenen Prozesse besaßen

eine extreme und verglichen mit anderen kaltzeitlichen Phänomenen besondere Auswirkung auf die oberflächennahen Sedimentschichten und die Grundwasserverhältnisse. Damit gewinnen zukünftige Rinnenbildungen, die im Rahmen von zukünftigen Kaltzeiten zu unterstellen sind, für die Deckgebirge von potentiellen Endlagerstandorten eine überragende Bedeutung. In diesem Zusammenhang wird nachfolgend auf die Genese der Rinnen näher eingegangen.

Ein anderer Rinnentyp ist nicht unterhalb, sondern **vor** dem jeweiligen Gletscherrand entstanden. Er steht im Zusammenhang mit dem durch das Inlandeis verursachten Aufstauen von Schmelz- und anderen Fließgewässern.

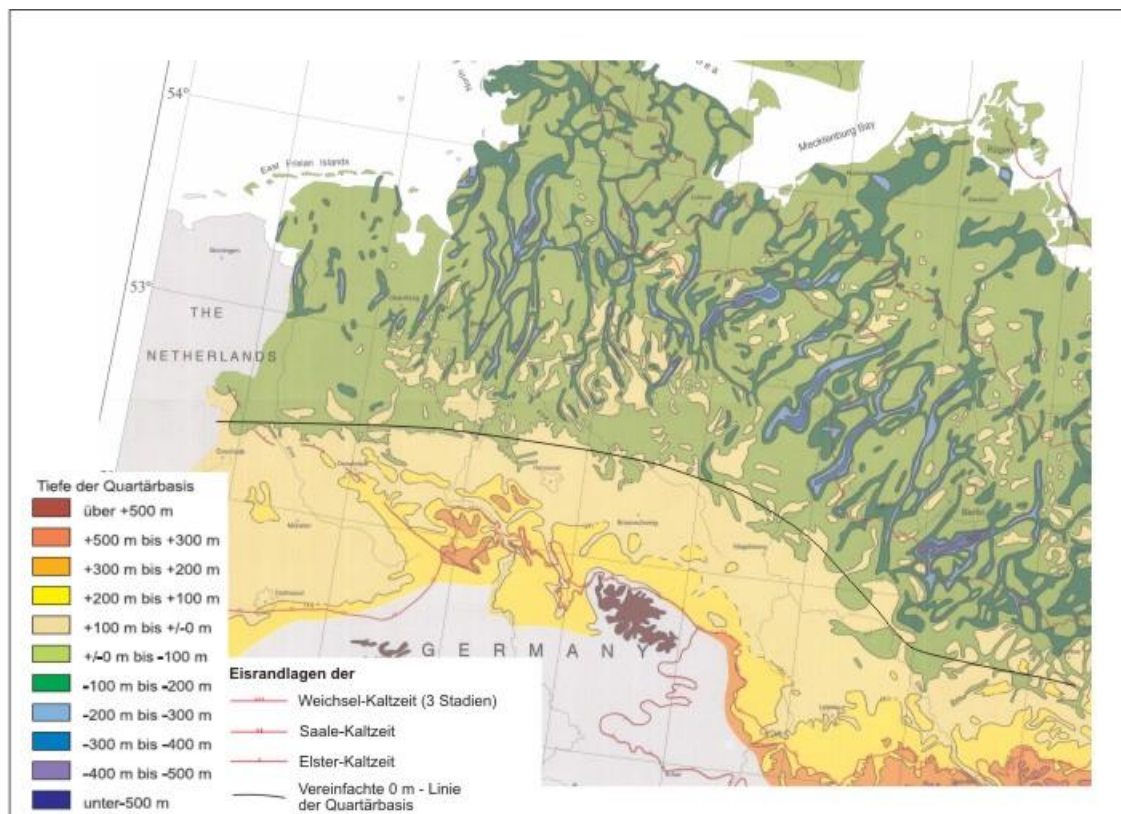
#### **G.4.7.1 Verbreitung und Ausbildung von subglazialen Rinnen**

Die tiefsten in Norddeutschland vorhandenen Rinnen sind der Elsterkaltzeit zuzuordnen. Sie entstanden unterhalb (subglazial) des Inlandeises und erreichen Tiefen von bis zu 500 m, Breiten von mehreren Kilometern und Längen bis über Hundert Kilometer. Rinnenbildungen der jüngeren Kaltzeiten sind dagegen in Norddeutschland seltener und weisen nur geringere Dimensionen mit Tiefen bis maximal ca. 100 – 150 m auf.

Die elsterzeitlichen Rinnen haben einen Abstand von einigen Zehner Kilometern und sind generell senkrecht auf den ehemaligen Gletscherrand hin orientiert. Im östlichen Teil Norddeutschlands besitzen sie eine nordöstliche, im westlichen Teil eine mehr von Nord nach Süd gerichtete Orientierung. Nach /STA 09/ sollen die Vorkommen eng an die Dimensionen der mitteleuropäischen Subsidenzzone gebunden sein, die sich durch oberflächennahe, leicht erodierbare Lockersedimente auszeichnet. Sie bilden ein unregelmäßiges Netzwerk aus einer Hauptrinne und davon abgehenden Nebenrinnen, die sich z. T. überschneiden. Ihr Verlauf scheint keinen erkennbaren Gesetzmäßigkeiten zu folgen. Offenbar war die Bildung der Rinnen an beliebigen Stellen möglich. Die jeweilige lokale Morphologie mit Senken und Erhebungen, Art und Permeabilität des Gesteinsuntergrundes mag das Entstehen einer Rinne initial beeinflusst, nicht aber die weitere Ausformung und den Verlauf gesteuert haben. Es müssen offenbar auch spezielle überregional gültige Randbedingungen wie z. B. Niederschlagsverhältnisse, mittlere Jahrestemperaturen, Eismächtigkeiten, stabile Eisrandlagen während eines generellen Rückzugstrends und evtl. eine besondere großräumige Morphologie vorhanden

gewesen sein, die dazu führten, dass zu den verschiedenen Kaltzeiten der Verlauf und die Ausbildung der Rinnen ganz unterschiedlich ausfielen.

Entlang einer Linie von Magdeburg über Hannover bis Osnabrück enden die glaziären elsterzeitlichen Rinnen relativ abrupt. Ein Grund hierfür ist nicht ersichtlich. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass das Elster-Eis bis an den Rand der Mittelgebirge vorstieß. Dies hätte während der Rückzugsphase des Eises schon südlich dieser Linie zu Rinnenbildungen führen müssen. Entweder erfolgte der Rückzug des Eises zu rasch, oder die Eismächtigkeit reichte nicht aus, entsprechende für die Rinnenbildungen notwendige hydraulische Verhältnisse zu schaffen (vgl. folgende Kap.). /KUS 79/ vermuten einen Zusammenhang mit dem Vorkommen oberflächennaher oligozäner bis untermiozäner Schluffe und Tone, der aber nicht für die gesamten norddeutschen Rinnenvorkommen oder auch für die Begrenzung der Nordseerinnen (vgl. /HUU 00/) hergestellt werden kann. Vermutlich spiegelt sich in dieser Linie eine Elster-Eisrandlage mit bestimmten für die Entstehung und Ausformung der Rinnen günstigen, bislang nicht bekannten Bedingungen wider.



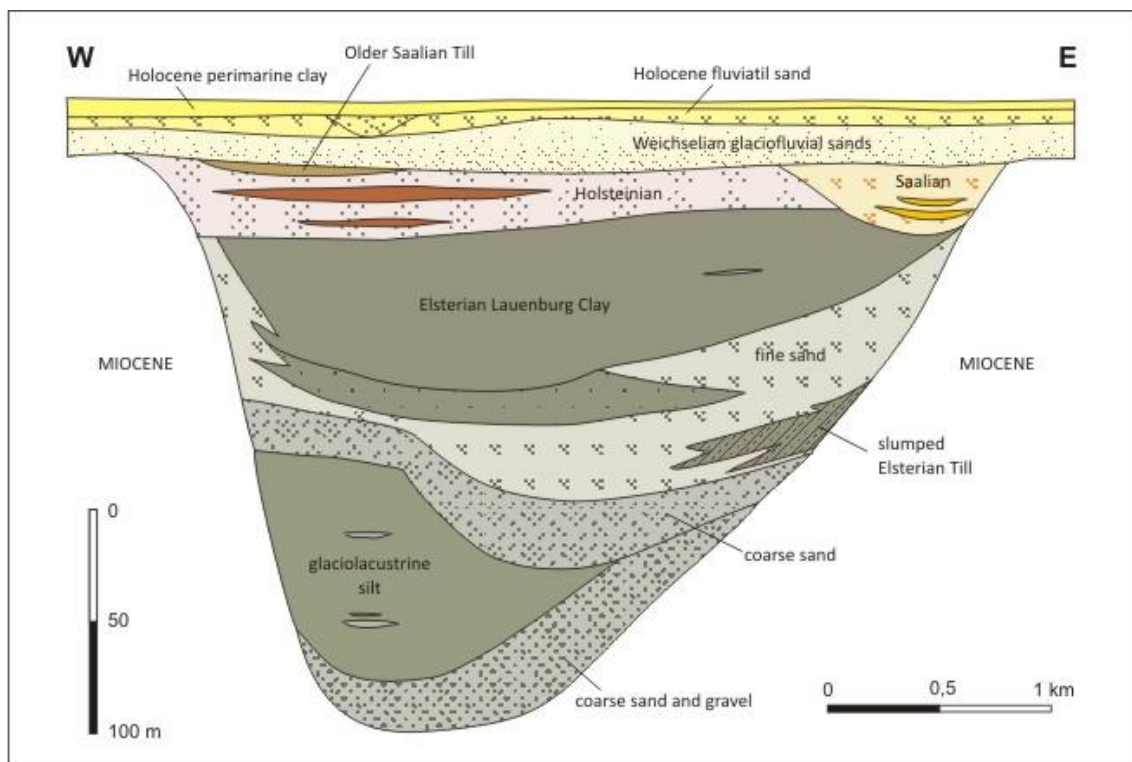
**Abb. G. 4.2** Verbreitung elsterzeitlicher Rinnensysteme dargestellt durch die Tiefenlage der Quartärbasis (aus: /STA 01/)



Das Relief der Rinnenböden ist unregelmäßig und im Bereich der ehemaligen Gletscherstirn rampenartig entgegen der Gletscheroberflächenneigung gestaltet. Zum Teil sind größere Gesteinsblöcke an der Basis angereichert, was auf eine hohe Geschwindigkeit des transportierenden Wassers hindeutet.

Die Füllung der Rinnen besteht hauptsächlich aus Sanden und Kiesen. Randlich und an der Rinnenbasis kommen vereinzelt Grundmoränen vor. Grundmoränenmassen oder Sedimentrutschungen sind an den Rändern von Rinnen entwickelt, die sich in weiche, unkonsolidierte Schichten einschnitten. Die Rutschmassen werden mit der Rinnenverbreiterung in Verbindung gebracht (z. B. /STA 09/). Daneben schalten sich kaltzeitliche Seesedimente in die Sedimentabfolge der Rinnen ein, wozu auch der eine Rinnensequenz abschließende, in Norddeutschland weit verbreitete und teilweise mächtige Lauenburger-Ton-Komplex gehört.

Die Füllung der Rinnen muss relativ rasch nach ihrer Entstehung erfolgt sein, da Rinnensedimente von ungestörten Schichten der Holstein-Warmzeit flächig überlagert werden, ohne dass es bei diesen jüngeren Schichten zu einer ungewöhnlichen Mächtigkeitzunahme im Bereich der Rinnen kam.



**Abb. G. 4.3** Schnitt durch eine quartäre Rinne im unteren Elbe-Gebiet (aus: /EIB 07/ nach /KUS 79/)



Die gesamte Abfolge wird nach oben durch Sedimentablagerungen der jüngeren Kalt- und Warmzeiten abgeschlossen.

Aus den Sedimentfüllungen lässt sich ableiten, dass mehrere Bildungsereignisse stattfanden, die zu unterschiedlichen übereinander liegenden Rinnengenerationen führten. Das Beispiel eines Rinnenquerschnitts zeigt Abbildung G. 4.3.

#### **G.4.7.2 Rinnengenese**

Durch die zahlreichen Explorationsbohrungen im Rahmen der Grundwassererkundung, geophysikalischen Untersuchungen, der Erkundung von Sand-Kieslagerstätten und vor allem durch die Aufschlüsse des mitteldeutschen Braunkohlebergbaus ist die Kenntnis über die Lage und Verbreitung der tiefen kaltzeitlichen Rinnensysteme stark erweitert worden. Gleichwohl stehen für die Rinnengenese bislang keine abschließenden Erklärungen zur Verfügung, die alle mit den Rinnenvorkommen verbundenen Geländebeobachtungen und die für die Entstehung der Rinnen notwendigen Voraussetzungen miteinander verbinden.

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Thesen kurz vorgestellt und diskutiert. Davon ausgenommen sind die vor dem Rand des Inlandeises entstandenen flacheren Rinnenbildungen, die zufriedenstellend durch den plötzlichen Abfluss aufgestauter Oberflächengewässer erklärt werden können (vgl. Kap. G.4.8).

##### **G.4.7.2.1 Entstehung durch fluviale Prozesse**

Nach dieser These sollen die tiefen elsterzeitlichen Rinnen durch das Wirken von großen Flüssen entstanden sein. Obwohl sich vom Erscheinungsbild der Rinnen (vgl. Abb. G. 4.2) eine gewisse Ähnlichkeit mit großen Flusssystemen aufdrängt, sprechen z. B. die Vernetzung der Rinnen, die Art und Abfolge der Rinnenfüllungen, das Profil der Rinnenböden mit örtlichen Übertiefungen und Unregelmäßigkeiten (z. T. bestehen Differenzen zwischen 50 – 100 m zwischen den Schwellen und Senken im Längsprofil /JØR 06/), das Vorkommen von Grundmoränen innerhalb der Abfolge, einer nicht zum Meer (Vorfluter), sondern zum ehemaligen Inlandeisrand hin gerichteten Orientierung des Verlaufs und ein abruptes Ende der Rinnen dagegen.

#### **G.4.7.2.2 Tektonische Ursachen**

Die Entstehung der Rinnen wird nach dieser These auf eine post-pliozäne epirogenetische Hebung Norddeutschlands zurückgeführt (vgl. Eiß 07/). Die damaligen Flüsse schnitten sich in die Landschaft ein, was eine Hebung von mehr als 400 m bedeuten würde. Solch eine Hebung und die spätere prälsterzeitliche Absenkung um einen entsprechenden Betrag würden für die zu erwartende Gesteinsabfolge im norddeutschen Raum Konsequenzen erwarten lassen, die durch die Geländebefunde nicht gedeckt sind /KUS 79/.

#### **G.4.7.2.3 Subrosions und halokinetisch bedingte Entstehung**

Die These wird auf Untersuchungen zurückgeführt, die im Wesentlichen in Schleswig-Holstein gewonnen wurden. Allerdings sind auch aus Niedersachsen ähnliche Beispiele bekannt, wo an halokinetisch aktiven Salzstöcken ein bevorzugter Verlauf der Rinnen in den Randsenken erfolgt und bei hoch liegenden Salzstöcken vorhandene Subrosionssenken in den Rinnenverlauf mit einbezogen werden /FEL 02/. Dabei haben sich am Salzstock Gorleben, aber z. B. auch an den Strukturen Bramel, Hamwiede, Soltau, Dethlingen, Sülze, Lutterloh und Bokel die Rinnen bis zum Gipshut eingeschnitten. Über den drei letzt genannten enden die Rinnen abrupt, nachdem sie zuvor noch tief eingeschnitten waren /KUS 79/. Diese Untersuchungsergebnisse sind dadurch zu erklären, dass sich Salzstöcke als Härtlinge gegenüber einer durch die Rinnen bedingten Erosion verhalten, wie die Beispiele von gänzlich unbeeinflussten, nahe der Oberfläche liegenden Salzstrukturen Stade, Lüneburg oder Segeberg zeigen. Damit würde der Rinnenverlauf im Wesentlichen durch eine unter dem Eis vorhandene Morphologie mit Senken in Kombination mit dem Härtegrad des Gesteins gesteuert werden. Salzstrukturen sind somit nicht der Auslöser für Rinnenbildungen, sondern können durch die Art ihrer überlagernden Sedimente mit Subrosionssenken, durch Randsenken und durch den Härtegrad ihrer Salzminerale den Verlauf der Rinnen beeinflussen.

#### **G.4.7.2.4 Entstehung durch Gletscherschurf (Exaration)**

Der Nachweis von Grundmoränen an der Basis der Rinnen oder in der Sedimentabfolge der Rinnenfüllungen förderte u. a. die These von einer Rinnenentstehung durch Gletscherschurf (Exaration). Daneben wurde die immense Breite der Rinnen als Argument gegen eine alleinige Entstehung durch subglazial abfließende Schmelzwässer

vorgebracht. Wären die Rinnen mit ihren km-großen Breiten und ihres engen Netzwerkes durch kontinuierliche Schmelzwassererosion entstanden, müssten ungeheure Mengen Schmelzwasser kurzfristig zur Verfügung gestanden haben, die als Konsequenz eine enorme Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen und ein damit einhergehendes vollständiges Abschmelzen großer Teile des Inlandeises bedeutet hätten.

Auf der anderen Seite spricht gegen eine alleinige Entstehung der Rinnen durch Exaration die Tatsache, dass bei der überwiegenden Anzahl der Rinnen in Norddeutschland glazifluviatile Sedimente überwiegen, die Rinnenflanken z. T. sehr steil ausgebildet sind und eine elsterzeitliche Grundmoräne an der Basis der Rinnen fehlt bzw. nur in den höheren Teilen der Rinnenfüllung vorkommen kann. Flachere, U-förmige Flanken und der Erhalt solcher Moränen in einem weit größeren Ausmaß wäre aber eine Voraussetzung, um die Entstehung der Rinnen durch Exaration allgemein gültig erklären zu können. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass Exaration lokal bei der Ausformung der Rinnen wirksam war oder einen substantiellen Beitrag zur Entwicklung der enormen Rinnenbreite lieferte /KUS 79/.

#### **G.4.7.2.5 Entstehung durch Sedimentverflüssigung („Liquefaction“, „Piping“)**

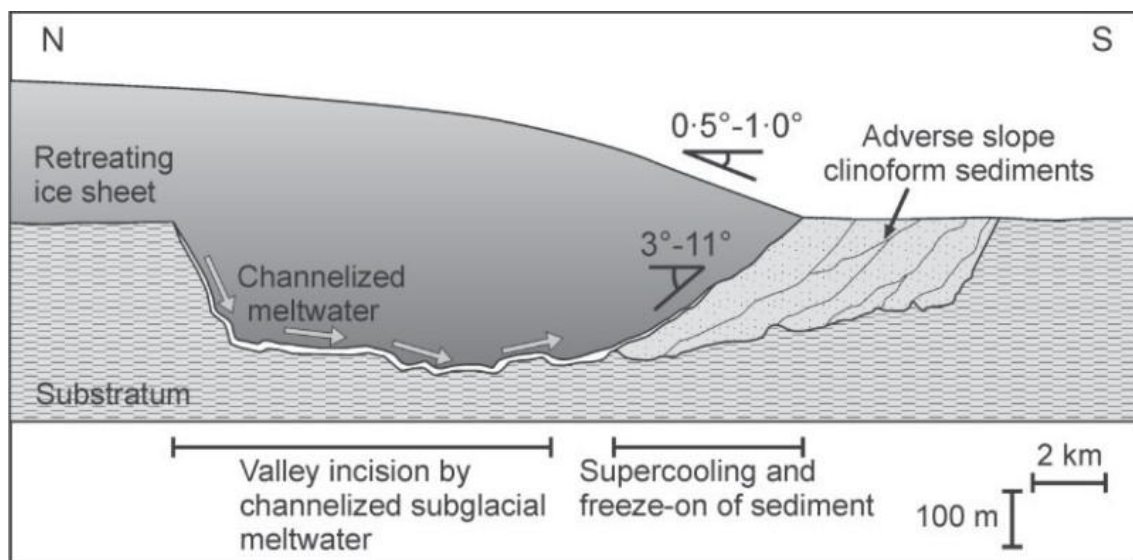
Diese These beruht auf der Annahme, dass der Wasserdruck von im Gletschereis gespeicherten Schmelzwässern den Überlagerungsdruck des Gletschers übersteigt und es dadurch zu einer Verflüssigung von unkonsolidierten Sedimenten (Grundbruch) an der Gletscherbasis kommt /EHL 94/. Das verflüssigte Material soll danach zur Gletscherstirn durch die Schmelzwässer abtransportiert worden sein. Eine Modifikation der Vorstellungen besteht darin, dass unter Druck stehende, ständig fließende Schmelzwässer wegen einer geringen Permeabilität der an der Gletscherbasis liegenden deformierten Schichten nicht in den Untergrund infiltrieren können und sich aufgrund eines Druckausgleichs gegenüber dem überlagernden Gletschereis röhrenförmige Abflusswege schaffen, die in der Summe der Ereignisse zu Rinnenbildungen führen /KEH 07; HOO 06/.

Einwände gegen die These begründen sich im Fehlen von mit dem Verflüssigungsvorgang zu erwartenden Sedimentstrukturen, in den diskontinuierlich (Sommer/Winter) anfallenden Schmelzwassermengen und in der subglazialen Bildung von Rinnen im Festgestein, bei der eine Verflüssigung des Gesteins nicht vorauszusetzen ist.

#### G.4.7.2.6 Entstehung durch Unterkühlung („Supercooling“)

Diese relativ junge, in den letzten Jahrzehnten entwickelte These beruht auf der Vorstellung, dass der Abfluss von Sediment beladenen Wässern aus übertiefen Rinnen und einem Aufstieg im Bereich der Gletscherstirn zu einem Gefrieren des Wassers und der Anlagerung (Akkretion) von Sediment reichen Eismassen an der dortigen Gletscherunterseite führt. Voraussetzung für das Eintreten des „Supercooling“-Effektes soll die Existenz einer gegen die Abflussrichtung geneigten Aufstiegsbahn sein, die steiler ist als die Neigung der Gletscheroberfläche in Richtung Gletscherstirn (/KRI 08/, Abb. G. 4.4). Beim Aufstieg der Wässer entlang der steilen Aufstiegsbahn kommt es zu einer Druck bedingten Erhöhung des Eisschmelzpunktes, die bei den an der Gletscherstirn herrschenden Temperaturen zu einem spontanen Gefrieren des Sediment beladenen Wassers führt /ALL 98/. Dabei wird der Eisblock gleichsam an der Unterseite des Gletschers angeheftet. Unterschiedliche, z. B. jahreszeitlich bedingte Wassermengen mit variierenden Sedimentinhalten führen zu glazigenen Schichtabfolgen, die nach dem Abschmelzen des Gletschers als typische Rinnenfüllungen nachweisbar sind. Abbildung G. 4.4 zeigt ein schematisches Bild dieser These.

Der Prozess kann allerdings nicht den Beginn einer Rinnenbildung erklären, sondern höchstens das weitere Eintiefen und die Ausgestaltung mit entsprechenden Rinnen typischen Schichtabfolgen, da eine übertiefe Rinne und steile Aufstiegsbahnen vorausgesetzt werden.



**Abb. G. 4.4** Modell des „Supercooling“-Effektes für die Entwicklung von subglazialen Rinnen anhand eines schematischen Längsprofils (aus: /KRI 08/)

#### **G.4.7.2.7 Entstehung durch subglaziale Schmelzwässer ( → Sporadische, plötzliche subglaziale Flutereignisse von im Eis aufgestauten Schmelzwässern)**

Diese These wird von den meisten Quartärgeologen bevorzugt, da dadurch die Summe der Geländebefunde am ehesten erklärt werden kann /SME 98/. Danach ist die Entstehung der Rinnen an die Rückzugsphasen des Eises und an die Verhältnisse im Bereich der Gletscherbasis gebunden, wo unter Druck stehende große Schmelzwassermengen sowie unkonsolidierte und ungefrorene Sedimente vorhanden sein sollten. Außerdem ist zunächst im Bereich der Gletscherstirn eine Blockade (z. B. Permafrost) des zum Gletscherrand gerichteten Abstroms der Wässer notwendig, die nach ihrem Bruch ein katastrophales Entleeren des gespeicherten Wasserreservoirs mit entsprechenden Erosionsleistungen ermöglicht /KEH 07/. Für den katastrophalen Abfluss wird als Begründung auch angeführt, dass ein nur konstanter aus Grundwasser und Schmelzwässern gespeister Abstrom innerhalb des umfangreichen Gesamtrinnensystems wegen der dafür notwendigen großen Wassermengen nicht plausibel erscheint.

Die Breite der Rinnen ergibt sich aus der Summe von nacheinander folgenden Einzelereignissen im Wechsel aus hohen Schmelzwasseraufkommen im Frühjahr und geringen im Winter, die jeweils in vertikaler und/oder horizontaler Richtung durch das Erosionsergebnis für die beobachteten Rinnendimensionen verantwortlich waren /SME 98/. Damit dürfte sich der Wasserabfluss für jedes Ereignis in einem begrenzten Bereich abgespielt haben. Beim Nachlassen des Abflusses sollte das Gletschereis nachgesackt sein /EHL 90/. Mit dieser neuen, tiefer gelegten Gletscherbasis als Ausgangszustand für das nächste Abflussereignis würde sich eine kontinuierliche Vertiefung und Verbreiterung der Rinnen erklären lassen.

Da die Rinnenbildung in den Eisrückzugsphasen stattfinden soll, ist nach dem Einbrechen des Gletschereises in die neu geschaffene Depression von einer Eisbewegung nicht mehr auszugehen, so dass eine unterstützende Wirkung durch Exaration zur Verbreiterung des Rinnenprofils entfallen würde. Ergibt sich in der Rückzugsphase des Eises ein ständiger Schmelzwasserfluss an der Basis des Eises zumindest an einigen Stellen, wäre die Rinnenbildung aber auch durch Sedimentverflüssigung und „Piping“ oder beim Vorliegen besonderer Verhältnisse an der Gletscherstirn durch „Supercooling“ zusätzlich zu erklären.

Die Füllung der Rinnen resultiert aus der Sedimentfracht des strömenden Wassers, der aus dem basalen Tauen anfallenden Gletscherfracht und aus möglichen Rutschungen an den Rinnenflanken.

#### **G.4.8 Fluviale Erosion vor dem Gletscherrand**

Neben den unterhalb des Eises entstandenen Rinnensystemen der Elster-Kaltzeit verliefen am Rand des Inlandeises Fließsysteme, die die großen Schmelzwassermengen und Niederschläge in Richtung Nordsee abführten. Solche Fließsysteme manifestieren sich z. B. durch die aus der Weichsel-Kaltzeit bekannten Urstromtäler /HEN 97: Abb. 2.27/. Sie bildeten markante Landschaftsformen aus, die auch heute noch gut zu erkennen sind. Ähnliche Fließsysteme müssen während der älteren Kaltzeiten vorhanden gewesen sein, die aber durch jüngere Ereignisse überprägt wurden.

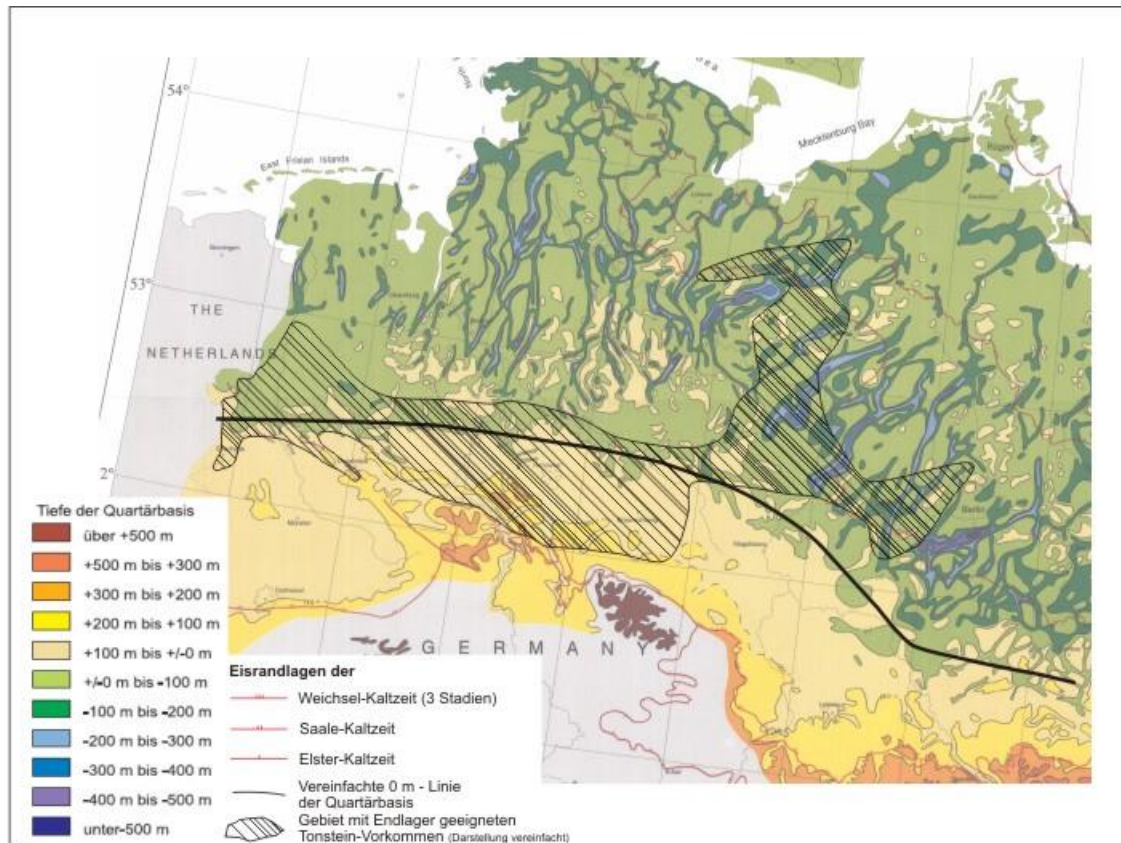
Besondere Verhältnisse herrschten während der Elster- und Saale-Kaltzeit. Da ihre weitesten Eisvorstöße bis an den Rand der deutschen Mittelgebirge reichten (vgl. Abb. G. 4.2), wurden die aus dem Süden kommenden Flüsse wie z. B. die Weser oder die aus dem Osten kommenden am Gletscherrand verlaufenden Schmelzwässer durch die Eismassen aufgestaut /FEL 02/. Es bildeten sich Eisstauseen, die bis zum Brechen des Stauriegels Bestand hatten. Die dadurch abströmenden Wassermassen bahnten sich in einem einzigen extremen Abflussereignis ihren Weg und schnitten sich dabei in den Untergrund ein. Wenngleich die bekannten Erosionsleistungen von einigen Zehner Metern Tiefe verglichen mit denen der Rinnenbildungen relativ gering ausfielen, so beinhalten diese Ereignisse generell das Potential für die tief greifende Erosion der jeweiligen Landschaftsoberfläche. Erosionsereignisse von sehr viel größerer Dimension sind aus Nordamerika bekannt, wo sich riesige Wassermassen in einem katastrophalen Abflussereignis in die dortigen Festgesteine einschneiden (z. B. /KEH 07/).

#### **G.5 Langzeitsicherheitsliche Bedeutung von eiszeitlichen Prozessen für ein Deckgebirge**

Die für ein Deckgebirge über dem Wirtsgestein eines Endlagerstandortes in Norddeutschland bedeutendsten kaltzeitlichen Prozesse sind in der Bildung von bis zu 500 m tiefen Rinnen und bis zu einem gewissen Grade in dem plötzlichen Entleeren von Eisstauseen oder der Eistektonik zu sehen. Da nach dem vorangehend entworfe-

nen hypothetischen Klimabild in der nächsten Million Jahre bis zu zehn weitere Kaltzeiten zu erwarten sind, ist im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen prinzipiell an jeder Stelle in Norddeutschland nördlich einer Linie von Magdeburg über Hannover bis Osnabrück die Bildung von mindestens einer weiteren tiefen Rinne als wahrscheinlich zu unterstellen. Dies hat insbesondere für Standorte eine Bedeutung, bei denen der Einschluss wirksame Gebirgsbereich (vgl. /AKE 02/) durch mesozoische Tonsteine gewährleistet wird. An solchen Standorten ist eine Einlagerung von radioaktiven, wärmeerzeugenden Abfällen aus gesteinsphysikalischen, technischen und ökonomischen Gründen in einer Tiefe von 300 bis 500 m sinnvoll (vgl. /AME 07/, /BGR 07/, /HOT 07/, /JOB 06/, /UHL 07/). In diesen Tiefen vorkommende Tongesteine liegen bevorzugt nördlich der oben genannten Linie vor (siehe vereinfachte 0 m-Linie der Quartärbasis; Abb. G. 5.1). Südlich davon befinden sich geeignete Tonvorkommen oft in größeren Tiefen. Es muss daher unterstellt werden, dass zumindest die nördlichen Tonsteinvorkommen mit der Eigenschaft von potentiellen Wirtsgesteinen während zukünftiger Kaltzeiten durch mögliche Rinnenbildungen einer erheblichen Beanspruchung oder Erosion unterliegen.

Dagegen können in geeigneten norddeutschen Salzlagerstätten radioaktive, wärmeerzeugende Abfälle in weitaus größeren Tiefen von 800 bis 1 000 m eingelagert werden, die nicht von dem Wirken zukünftiger kaltzeitlicher Prozesse mit ihren Rinnenbildungen beeinträchtigt werden können. Im auf seine Eignung als Endlagerstandort untersuchten Salzstock Gorleben wurden beispielsweise keine Beeinflussungen durch frühere Kaltzeiten in der möglichen Einlagerungstiefe von über 800 m gefunden, obwohl über dem Salzstock eine quartärzeitliche Rinne verläuft, die bis zum Salzspiegel die Deckschichten erodierte. Auch eine weitere Rinnenbildung am Standort Gorleben würde das Salzgestein aufgrund seiner gesteinsphysikalischen Eigenschaften nicht wesentlich tiefer als in der Vergangenheit beeinflussen (vgl. /KEL 09/).



**Abb. G. 5.1** Verbreitung von untersuchungswürdigen Tongesteinsvorkommen, Eisrandlagen der Maximalvorstöße und vereinfachte 0 m-Linie der Quartärbasis (ergänzt nach /HOT 07/)

## G.6 Zusammenfassung

Ausgehend von einem aus der Vergangenheit abgeleiteten Klimabild für die nächste Million von Jahren müssen bis zu zehn zukünftige Kaltzeiten im Rahmen von Langzeitsicherheitsbetrachtungen für Endlager mit radioaktiven Abfällen unterstellt werden. Voraussetzung ist, dass die „normale“ Klimaentwicklung nach der Milanković-Theorie erfolgt, der dominierende 100 000 -Zyklus auch zukünftig Bestand hat und eine Störung der „Normal“-Entwicklung durch anthropogen verursachte Einflüsse auf das Klima ausbleibt.

Aus dem Klimabild abzuleitende weitere Kalt- und Warmzeitabfolgen bewirken in einem bestehenden hydrogeologischen System durch die Bildung von Permafrost, der Überführung durch einen Inlandeisgletscher oder durch einen Meeresspiegelanstieg



mit Überflutung der norddeutschen Landschaft enorme Veränderungen, die die heutigen Verhältnisse ablösen. Entsprechendes gilt durch den Wechsel zukünftiger Kalt- und Warmzeiten für Veränderungen im Aufbau der oberflächennahen Gesteinsschichten, wobei insbesondere Rinnenbildungen mit Tiefenwirkungen bis 500 m zu berücksichtigen sind.

Aufgrund möglicher Rinnenbildungen werden potentielle Endlagerstandorte im Wirtsgestein Tongestein (Tiefe < 500 m) durch eiszeitliche Rinnenbildungen massiv gestört und müssen deshalb gegenüber Standorten im Salzgestein als weniger gut geeignet eingestuft werden. Eine Einlagerung in Salzgestein ermöglicht die Unterbringung der Abfälle in größeren Tiefen von > 800 m, die von zukünftigen kaltzeitlichen Vorgängen unbeeinflusst bleiben.

## **G.7 Literaturverzeichnis**

- /AKE 02/ akend (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd.-- Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): 260 S., 30 Abb., 14 Tab., 3 Anh.; Berlin.
- /ALL 05/ Alley, R. B., Clark, P. U., Huybrechts, P. & Joughin, I. (2005): Ice-sheet and Sea-Level Changes.-- Science, Vol. 310, 5747: 456-471, 5 Fig.; Washington, DC.
- /ALL 98/ Alley, R. B., Lawson, D. E., Evenson, E. B., Strasser, J. C. & Larson, G. J. (1998): Glaciohydraulic supercooling: a freeze-on mechanism to create stratified, debris-rich basal ice: II. Theory.-- Journal of Glaciology, Vol. 44, No. 148: 563-569, 3 Fig., 1 Tab.; Cambridge.
- /AME 07/ Amelung, P., Jobmann, M. & Uhlig, L. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - (Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein).-- DBETec-Bericht, veröffentl. im Internet Stand 04/2009: 67 S., 38 Abb., 3 Tab.; Peine.

- /BAR 07/ Bartlein, P. J. (2007): Time Scales of Climate Change. (In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science).-- ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 3: 1873-1883; Amsterdam.
- /BAS 07/ Bassinot, F. C. (2007): Oxygen Isotope Stratigraphy of the Oceans. (In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science).-- ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 3: 1740-1748; Amsterdam.
- /BER 07/ Berger, A. & Loutre, M.-F. (2007): Milankovitch Theory and Paleoclimate. (In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science).-- ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 3: 1017-1022; Amsterdam.
- /BGR 07/ BGR (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen.-- Bundesanstalt für Geowissenschaften u. Rohstoffe (BGR): 17 S., 3 Abb., 3 Tab.; Hannover.
- /BOU 01/ Boulton, G. S., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, J. & Moren, L. (2001): Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (Pagepa). Final report.-- Office for Official Publications of the European Communities. Nuclear Science and Technology, EUR 19784 EN: 147 S., 2 Ann.; Luxemburg.
- /COC 06/ Cochelin, A.-S. B., Mysak, L. A. & Wang, Z. (2006): Simulation of long-term future climate changes with the green McGill paleoclimate model: The next glacial inception.-- Climatic Change, 79: 381-401, 10 Fig.; New York.
- /DEL 07/ Delisle, G., Grassmann, S., Cramer, B., Messner, J. & Winsemann, J. (2007): Estimating episodic permafrost development in northern Germany during the Pleistocene. (In: Hambrey, M. J., Christoffersen, P., Glasser, N. F. & Hubbard, B. (Eds.): Glacial Sedimentary Processes and Products).-- Int. Ass. Sedimentologists (IAS), Spec. Publ., 39: 109-119, 8 Fig., 1 Tab.; Oxford/U.K. (Blackwell publ.).

- /DUP 83/ Duphorn, K., Kabel, C., Schneider, U. & Schröder, P. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben, Abschl.-Bericht Univ. Kiel.-- Univ. Kiel (PTB-Bestell-Nr. 73760; BGR-Archiv-Nr. 103 714): 265 S., 40 Abb., 5 Tab., 48 Anl.; Kiel.
- /EHL 90/ Ehlers, J. (1990): Untersuchungen zur Morphodynamik der Vereisungen Norddeutschlands unter Berücksichtigung benachbarter Gebiete.-- Bremer Beitr. z. Geographie u. Raumplanung, Studiengang Geographie, Univers. Bremen, Heft 19: 166 S., 84 Abb., 2 Tab.; Bremen.
- /EHL 94/ Ehlers, J. (1994): Allgemeine und historische Quartärgeologie.-- Ferdinand Enke Verlag, 1. Aufl.: 358 S., 176 Abb.; Stuttgart.
- /EIB 07/ Eißmann, L. (2007): Alter und Genese der quartären Tiefrinnen im Norddeutschen Tiefland am Beispiel der Region Mitteldeutschland/Niederlausitz und Hamburg. Eine Casehistory des Älteren quartären Destruktionsstockwerkes im Skandinavischen Vereisungsgebiet. (In: Ehlers, J., Grabe, J. & Taug, R. (Hrsg.): 74. Tagung der Arbeitsgemeinschaft norddeutscher Geologen 2007).-- Geol. Landesamt Hamburg, Tagungsband und Exkursionsführer: 27-38, 5 Abb.; Hamburg.
- /EIS 87/ Eissmann, L. (1987): Lagerungsstörungen im Lockergebirge. Exogene und endogene Tektonik im Lockergebirge des nördlichen Mitteleuropa.-- Geophys. u. Geol., Veröff. der KMU Leipzig, Bd. III, 4: 7-77; Berlin.
- /ETZ 05/ Etzelmüller, B. & Hagen, J. O. (2005): Glacier-permafrost interaction in Arctic and alpine mountain environments with examples from southern Norway and Svalbard. (In: Harris, C. & Murton, J. B. (eds.): Cryospheric Systems: Glaciers and Permafrost).-- Geol. Soc. London, Spec. Publ., 242: 11-27, 8 Fig.; London (Cromwell Press).
- /FEL 02/ Feldmann, L. (2002): Das Quartär zwischen Harz und Allertal mit einem Beitrag zur Landschaftsgeschichte im Tertiär.-- Clausthaler Geowissenschaften, Band 1: X + 149 S., 72 Abb., 7 Tab.; Clausthal-Zellerfeld.

- /FLÜ 07/ Flügge, J., Brewitz, W., Fein, E., Noseck, U., Schneider, A. & Pohl, W. (2007): Impacts of Extreme Climatic Scenarios on Groundwater Flow and Radionuclide Transport in the Overburden of a Nuclear Waste Repository in a Salt Dome. (In: Radioactive Waste Disposal in Geological Formations; Int. Conf., Braunschweig, Nov. 6-7, 2007; Proceedings).-- GRS-S-49: 307-318, 11 Fig., 1 Tab.; Braunschweig.
- /FRE 92/ Frenzel, B., Pécsi, M. & Velichko, A. A. [eds] (1992): Atlas of Paleoclimates and Paleoenvironments of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene - Holocene.-- Geogr. Res. Inst., Hungarian Acad. Sc.; Stuttgart, Budapest (Gustav Fischer Verlag)./GAS 00/Gascoyne, M. (2000): A review of published literature on the effects of permafrost on the hydrogeochemistry of bedrock.-- Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), R-01-56: 49 S., 17, 3; Stockholm.
- /HAN 95/ Hannemann, M. (1995): Intensität und Verbreitung glazigener Lagerungsstörungen im tieferen Quartär und Tertiär.-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 2: 51-59; Kleinmachnow.
- /HEN 97/ Hendl, M. & Liedtke, H. (1997): Lehrbuch der allgemeinen physischen Geographie.-- J. P. Verlag Gotha, 3. Aufl.: 866 S., 274 Abb., 160 Tab.; Gotha.
- /HOO 06/ Hooke, R. L. & Jennings, C. E. (2006): On the formation of the tunnel valleys of the southern Laurentide ice sheet.-- Quaternary Science Reviews, 25: 1364-1372; Amsterdam.
- /HOT 07/ Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.-- Bundesanstalt f. Geowiss. u. Rohstoffe: 118 S., 44 Abb., 5 Tab.; Berlin.
- /HUU 00/ Huuse, M. & Lykke-Anderson, H. (2000): Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin.-- Quaternary Science Reviews, 19, 12: 1233-1253, 11 Fig.; Amsterdam.

- /JOB 06/ Jobmann, M., Amelung, P., Uhlig, L., Polster, M., Schonebeck, M. & Schmidt, H. (2006): Untersuchungen zur Sicherheitstechnischen Auslegung eines Generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS -. (In: FZKA (Hrsg.): Untertägige Entsorgung. Siebtes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 3. und 4. Mai 2006 in Karlsruhe).-- Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (FZKA) Wassertechnologie und Entsorgung, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 9: 167-181, 17 Abb., 4 Tab.; Karlsruhe.
- /JØR 06/ Jørgensen, F., Sandersen, P. B. E. & Bakker, M. (2006): Buried valleys - nature and groundwater interests. (In: Kirsch, R., Rumpel, H.-M., Scheer, W. & Wiederhold, H. (Hrsg.): Groundwater Resources in Buried Valleys. A Challenge for Geosciences).-- GGA (Leibniz Institute for Applied Geosciences): 11-18, 190 Fig.; Hannover.
- /KEH 07/ Kehew, A. E., Lord, M. L. & Koslowski, A. L. (2007): Glacifluvial Landforms of Erosion. (In: Elias, S. A. (ed.): Encyclopedia of Quaternary Science).-- ELSEVIER, 1. Aufl., Vol. 1: 818-831; Amsterdam.
- /KEL 90/ Keller, S. (1990): Das Ablaugungsverhalten der Salzstöcke in NW-Deutschland (Abschl.-Ber. des BMFT-Förderungsvorhabens KWA 5801 9 "Langzeitsicherheit der Barriere Salzstock", Teilprojekt III).-- BGR, unveröffentl. Ber., 106570: 87 S., 17 Abb., 9 Tab., 3 Anl.; Hannover.
- /KEL 09/ Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland.-- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): 24 S., 5 Abb.; Hannover.
- /KRI 08/ Kristensen, T. B., Piotrowski, J. A., Huuse, M., Clausen, O. R. & Hamberg, L. (2008): Time-transgressive tunnel valley formation indicated by infill sediment structure, North Sea - the role of glaciohydraulic supercooling.-- Earth Surf. Process. Landforms, 33, DOI: 10.1002/esp.1668: 546-559; [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com).

- /KUS 79/ Kuster, H. & Meyer, K.-D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nord-östlichen Niedersachsen.-- *Eiszeitalter u. Gegenwart*, 29: 135-156, 5 Abb., 3 Tab., 1 Kt.; Hannover.
- /LEX 00/ Lexikon der Geowissenschaften. Edu-Insti (2000).-- Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 2; Berlin - ISBN 3-8274-0421-5.
- /LIS 05/ Lisiecki, L. E. & Raymo, M. E. (2005): A Plio-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records.-- *Paleoceanography*, Vol. 20: PA1003: 1-17, 12 Fig., 4 Tab.; Washington/USA.
- /LIS 07/ Lisiecki, L. E. & Raymo, M. E. (2007): Plio–Pleistocene climate evolution: trends and transitions in glacial cycle dynamics.-- *Quaternary Science Reviews*, Vol. 26: 56-69, 7 Fig.; Amsterdam.
- /MAG 05/ Magri, F., Bayer, U., Jahnke, C., Clausnitzer, V., Diersch, H. J., Fuhrman, J., Möller, P., Pekdeger, A., Tesmer, M. & Voigt, H. J. (2005): Fluid-dynamics driving saline water in the North East German Basin.-- *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, 94, 5/6: 1056-1069, 10 Fig., 1 Tab.; Berlin.
- /MOR 01/ Morén, L. & Pässe, T. (2001): Climate and shoreline in Sweden during Weichsel and the next 150,000 years.-- Svensk Kärnbränslehantering AB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co /SKB/), Technical Report TR-01-19: 67 S., Fig. 1-1 bis 4-17; Stockholm.
- /MÜL 07/ Müller, U. C. & Pross, J. (2007): Lesson from the past: present insolation minimum holds potential for glacial inception.-- *Quaternary Science Reviews*, 26: 3025-3029; Amsterdam.
- /NOS 09/ Noseck, U., Fahrenholz, C., Fein, E., Flügge, J., Pröhl, G. & Schneider, A. (2009): Impact of climate change on far-field and biosphere processes for a HLW-repository in rock salt.-- *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-241*: 272 S.; Braunschweig.

- /SKU 03/ Skupin, K., Speetzen, E. & Zandstra, J. G. (2003): Die Eiszeit in Nordost-Westfalen und angrenzenden Gebieten Niedersachsens. Elster- und saalezeitliche Ablagerungen und ihre kristallinen Leitgeschiebengesellschaften.- Geol. Dienst Nordrhein-Westfalen: 95 S., 15 Abb., 10 Tab., Anh. 1-3; Krefeld.
- /SME 98/ Smed, P. (1998): Die Entstehung der dänischen und norddeutschen Rinnentäler (Tunneltäler) - Glaziologische Gesichtspunkte.-- Eiszeitalter u. Gegenwart, 48: 1-18, 17 Abb.; Hannover.
- /SMI 08/ Smithson, P., Addison, K. & Atkinson, K. (2008): Fundamentals of The Physical Environment.-- Routledge, 4. Aufl.: 776 S.; London/U.K.
- /STA 09/ Stackebrandt, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany - a brief review.-- Z. dt. Ges. Geowiss., 160/3: 203-210, 4 Fig.; Stuttgart.
- /STA 01/ Stakebrandt, W., Ludwig, A. O. & Ostaficzuk, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). (In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G. & Stackelbrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346).-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 13-19, 2 Fig.; Kleinmachnow.
- /UHL 07/ Uhlig, L., Amelung, P., Billaux, D., Polster, M. & Schmidt, H. (2007): Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - (Abschlussbericht).-- DBETec-Bericht, veröffentl. im Internet Stand 04/2009: 84 S., 77 Abb., 14 Tab.; Peine.
- /DIJ 96/ Van Dijke, I. J. & Veldkamp, A. (1996): Climate-controlled glacial erosion in the unconsolidated sediments of northwestern Europe, based on a genetic model for tunnel valley formation.-- Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 21, 4: 327-340, 7 Fig., 1 Tab.; Chichester/U.K.





## **H Modelluntersuchungen zur Grundwasserbewegung im Zusammenhang mit Erkundung und Langzeitsicherheit am Standort Gorleben**

K. Schelkes<sup>1</sup>, P. Vogel<sup>1</sup>, G. Schmidt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

### **H.1 Einleitung**

Um hydrogeologische Befunde möglichst widerspruchsfrei zu einem geschlossenen quantitativen Bild über die Strömungsvorgänge im Grundwasser zusammenzufügen, werden numerische Grundwassermodelle eingesetzt. Entsprechende Modellrechnungen begleiten von Beginn an die Standortuntersuchungen im Bereich des Salzstocks Gorleben. Ihre Ziele sind die Beschreibung des Ist-Zustandes des Grundwassersystems und die Unterstützung bei Aussagen zur Langzeitsicherheit. Damit sind ihre Ergebnisse Grundlage für die Berechnung der Auswirkungen von Szenarien zum Transport radioaktiver Substanzen, falls solche aus dem Salzstock austreten würden und durch das Deckgebirge mit der Grundwasserströmung in die Biosphäre gelangen könnten.

Die Methoden und Betrachtungsweisen wurden während der Zeit fortlaufend weiterentwickelt und den sich wandelnden Anforderungen angepasst. Auf Grund des umfassenden hydrogeologischen Untersuchungsprogramms stand eine sehr gute Datenbasis im lokalen und regionalen Maßstab für die Erfordernisse der verschiedenen Modellsätze zur Verfügung.

Die ersten Modelle waren dreidimensionale Süßwassermodelle, die die oberflächennahen hydraulischen Verhältnisse gut repräsentieren konnten. Die komplexen dichteabhängigen Strömungsverhältnisse in weiten Teilen des Aquifersystems über dem Salzstock Gorleben waren damit jedoch nicht abbildbar. Dazu wurden in der folgenden Zeit dichteabhängige Salz-/Süßwassermodelle entwickelt, zuerst im lokalen Maßstab, später für die gesamte umgebende Region.

Die Schwerpunkte der Modellentwicklung lagen bei der möglichst genauen Abbildung der hydrogeologischen Gegebenheiten, der Erfassung der instationären hydraulischen Verhältnisse sowie der Berechnung von potentiellen Fließwegen und zugehörigen

Fließzeiten vom Salzstockrand bis an die Geländeoberfläche. Als Randparameter mussten Einflüsse der klimatischen Verhältnisse, z. B. während der letzten Eiszeit, ebenso berücksichtigt werden wie Altersdatierungen der Grundwässer an Hand von Isotopenmessungen.

Im Folgenden werden verschiedene Modellansätze, ihre Ziele und Ergebnisse vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Ergebnissen der Modellrechnungen mit variabler Dichte u.a. im Rahmen einer paläohydrogeologischen Systembetrachtung.

## **H.2 Grundwassermodelle mit konstanter Dichte (Süßwassermodelle)**

Das Deckgebirge des Salzstocks Gorleben besteht aus Sanden und Tonen des Quartär und Tertiär, dessen Poren mit Wasser gefüllt sind. Das Grund- oder Porenwasser ruht nicht. Seine Bewegung wird in weiten Bereichen bestimmt durch unterschiedliche Grundwasserspiegelstände in den Niederungen und den topographischen Hochlagen. Bei gleich bleibenden Verhältnissen (Klima, Topographie) stellt sich langfristig näherungsweise ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Grundwasserneubildung auf den Hochlagen, Grundwasserabfluss in Richtung auf die Niederungen und Grundwasseranstieg in den Talauen ein. Die so erzeugte Grundwasserbewegung reicht bis in die tiefen Bereiche der Grundwasserleiter des Miozäns in den Randsenken sowie direkt über dem Salzstock herunter. Über dem Salzstock wird dabei Salz abgelaugt, wodurch die Dichte des Grundwassers erhöht und damit das Fließsystem beeinflusst wird /GIE 85/.

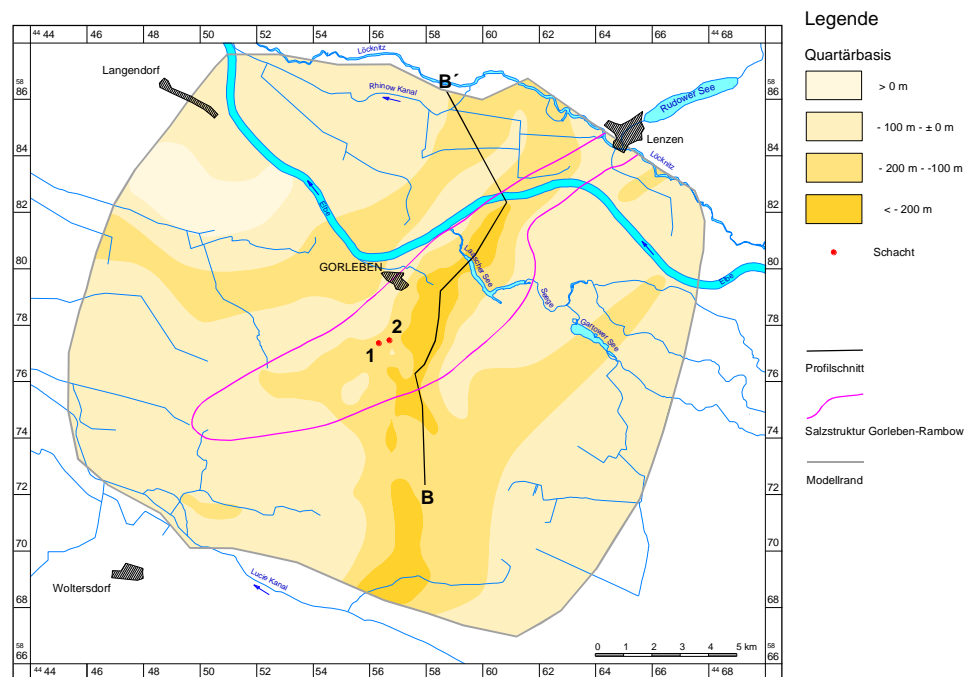
### **H.2.1 Stationäres dreidimensionales Grundwassermodell**

Die Betrachtung eines langfristig gleich bleibenden Grundwasserkreislaufs und seine ausschließliche Berücksichtigung in einem numerischen Modell stellte entsprechend dem Kenntnisstand zu Beginn des Untersuchungsprogramms eine gute Näherung für die tatsächlich ablaufende Grundwasserbewegung im Deckgebirge dar. Der Einfluss der Dichte des Porenwassers aufgrund hoher Versalzung konnte nach dem damaligen Stand der Technik nicht berücksichtigt werden. Für das dreidimensionale Grundwassermodell wurde deshalb eine stationäre Grundwasserströmung bei raum-zeitlich konstanter Dichte des Porenwassers unterstellt.

Für erste orientierende Modellrechnungen wurde das Programm GS4000 verwendet /SCH 91b/. Das Programm basiert auf dem Darcy-Gesetz und der Kontinuitätsgleichung, die mit Hilfe eines Differenzenverfahrens gelöst werden. In /SCH 91b/ werden das Programm, seine numerischen Grundlagen und die Rechentechnik näher beschrieben.

Zur Festlegung des Modellgebietes wurde die räumliche Verteilung von Höhenlagen und Niederungsgebieten herangezogen /FIE 84/. Grundwasserscheiden und Grenzstromlinien stellen Ränder des Modellraumes dar, die vertikal von der Geländeoberfläche bis zu den Tonschichten des Tertiärs gezogen wurden. Im Westen, Südwesten und Süden verläuft die Modellgrenze entlang von Hauptvorflutern, im Norden bildet die Lößnitz die Modellgrenze (Abb. H. 2.1).

Die Ergebnisse des Hydrogeologischen Untersuchungsprogramms /VIE 84/ lieferten die Informationen über die Verteilung der hydrostratigrafischen Einheiten und ihre hydraulischen Eigenschaften. Im Rahmen der Modellrechnungen wird angenommen, dass über die vertikalen Ränder und die Basisfläche des Modellgebietes, die von Tonschichten des Tertiär oder dem Salzstock selbst gebildet wird, abgesehen von einem Ein- und Ausstromstrom in der Elbeniederung, kein Grundwasseraustausch stattfindet. Der Grundwasserstrom im Modellraum wird daher im Wesentlichen gespeist von der Grundwasserneubildung am oberen Rand des Modellgebietes. Dies hat einen in der Summe gleich großen Grundwasseraustritt in den Niederungen, die zum Modellgebiet gehören, zur Folge.



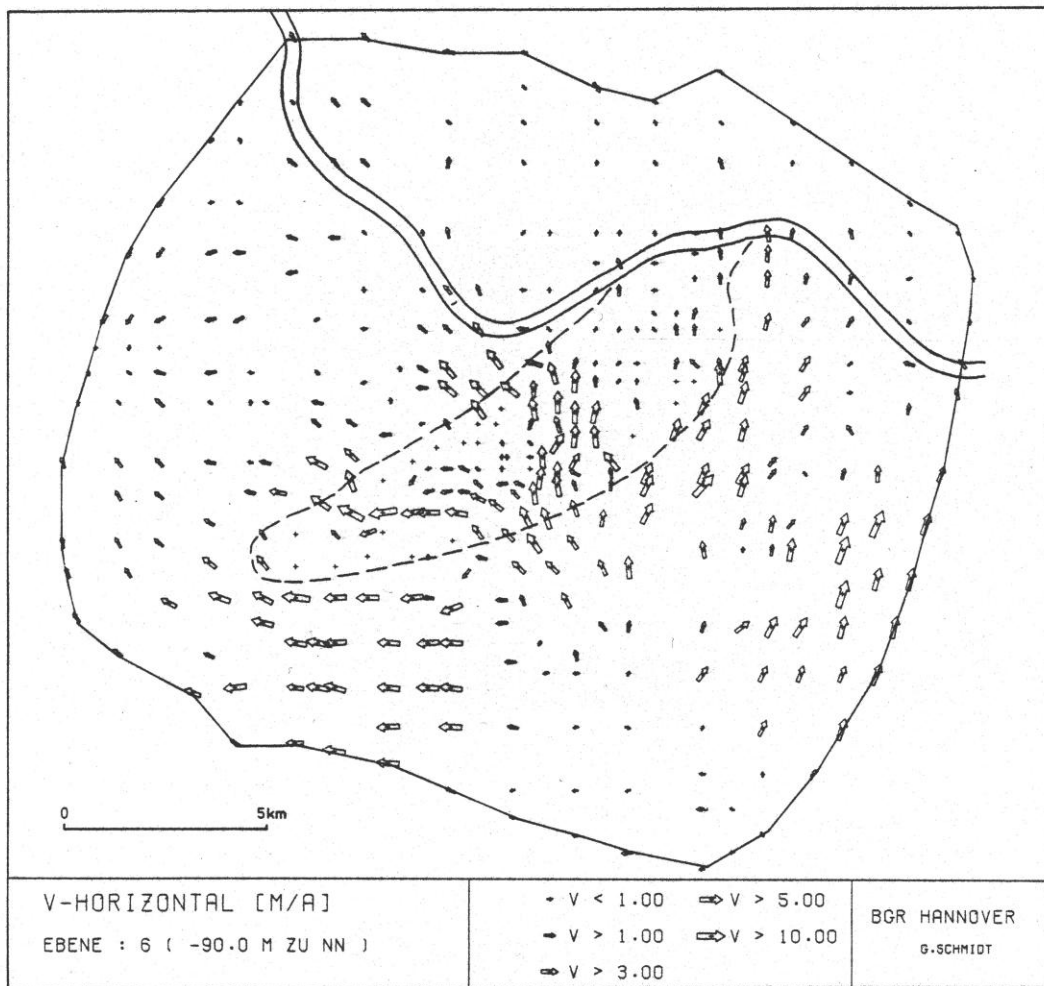
**Abb. H. 2.1** Modellgebiet mit Quartärbasis und Lage des Profilschnitts in Abb. H. 3.1 (nach /LUD 01/)

Dieses ca. 350 km<sup>2</sup> große Modellgebiet wurde für die numerischen Berechnungen durch Diskretisierung in 380 unterschiedlich große Flächen in Abhängigkeit von Informationsdichte, Bedeutung lokaler Strukturen und Anforderungen an die Aussagegenauigkeit unterteilt. Die räumliche Aufgliederung erfolgte durch 15 untereinander liegende Rechenebenen zwischen 15 m ü. NN und 350 m u. NN. Die durch die Diskretisierung entstandenen Raumelemente sind Repräsentanten bestimmter mittlerer hydrogeologischer Eigenschaften. Ihnen wird je ein mittlerer Wert für die vertikale bzw. horizontale hydraulische Leitfähigkeit und für die effektive Porosität zugeordnet. Es wurde unterschieden zwischen Grundwasserleitern, -hemmern und -nichtleitern<sup>3</sup>. Zum Zeitpunkt der Modellerstellung lagen über die Niederung nördlich der Elbe im Gebiet der damaligen DDR keine belastbaren Daten vor. Als sogenannter konservativer Ansatz wurde für das Modell daher am nördlichen Modellrand eine Verbreitungslücke der Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex unterstellt /SCH 87/.

<sup>3</sup> Dies entspricht der im Rahmen dieses Berichts verwendeten Unterteilung in Grundwasserleiter ( $k_f > 10^{-5}$  m/s), Grundwassergeringleiter ( $10^{-7} < k_f \leq 10^{-5}$  m/s) und Grundwassergeringleiter ( $k_f \leq 10^{-7}$  m/s) in Anlehnung an AD-HOC-ARBEITSGRUPPE HYDROGEOLOGIE (1997) /ADH 97/

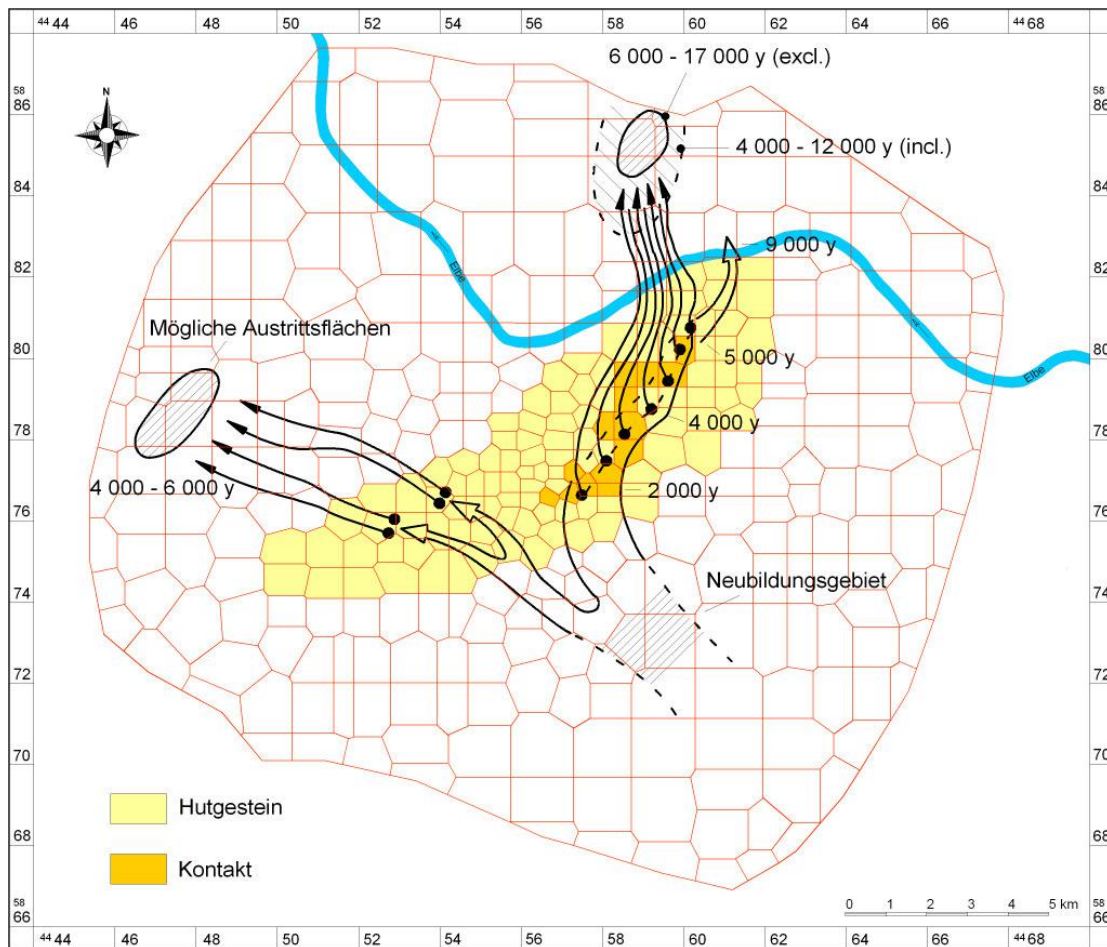
Das Modell ließ sich gut kalibrieren. Bis zu einer Teufe von ca. 150 m stimmen die jeweiligen Standrohrspiegelhöhen aus Naturbeobachtungen und Modellrechnungen, unter Berücksichtigung eines für großmaßstäbliche Strömungsmodelle üblichen Toleranzbereiches von 1 m, gut überein. Das oberflächennahe Fließgeschwindigkeitsfeld (oberste Rechenebene) wird sehr gut nachgebildet, die Geschwindigkeitsbeträge liegen dabei zumeist bei 10 bis 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a. Für den tieferen Bereich bilden sich in der Darstellung der horizontalen Komponenten der Filtergeschwindigkeiten die geologischen Strukturen ab. Beispielhaft zeigt dies Abb. H. 2.2 für eine Tiefe von 90 m u. NN /GIE 85/. Deutlich erkennbar ist die Verzweigung im südlichen Teil des Ringwallbereichs. Der Hauptstrom zeigt in nördlicher Richtung entsprechend dem Verlauf der Gorlebener Rinne, ein Nebenzweig nach Westen auf einen Durchlass im nordwestlichen Bereich des Ringwalls. In größeren Tiefen zeichnet sich dann sehr deutlich die Gorlebener Rinne mit Filtergeschwindigkeiten bis zu mehreren m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>a ab, wobei in diesen Tiefen, in denen hochsaline Wässer vorherrschen, Angaben zu Strömungsvorgängen nur orientierenden Charakter haben können.

Eine entsprechend gute Anpassung wie für die Standrohrspiegelhöhen im Bereich des Süßwasserkörpers ergibt sich auch für die Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser. Die Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete im Modell stimmen lagemäßig mit denen in der Natur überein.



**Abb. H. 2.2** Berechnete Horizontalkomponenten der Filtergeschwindigkeiten in der Modellebene von 90 m u. NN

Von besonderem Interesse sind berechnete Laufzeiten und Fließwege, wobei bevorzugt auf Wege durch die Gorlebener Rinne und durch den Westteil des Salzstockdeckgebirges geachtet wurde. Im ersten Fall betragen die Laufzeiten des Porenwassers für den Weg bis zur Biosphäre, je nach gewähltem Aufpunkt an der Salzstockoberfläche, mehrere tausend Jahre (4 000 – 17 000 Jahre). Die Austrittspunkte liegen in den Niederungsgebieten nördlich der Elbe (Abb. H. 2.3). Im selben Zeitbereich liegen die Laufzeiten vom Neubildungsgebiet der Gartower Tannen bis zu den Aufpunkten an der Salzstockoberfläche. Insgesamt kürzere Laufzeiten (4 000 – 6 000 Jahre) ergeben sich für Fließwege über den Westteil des Salzstocks von Aufpunkten, die in Teufen bis zu 150 m unter Gelände liegen, bis in den Bereich des Naturschutzgebietes Lucie /SCH 87, KLI 02b/.



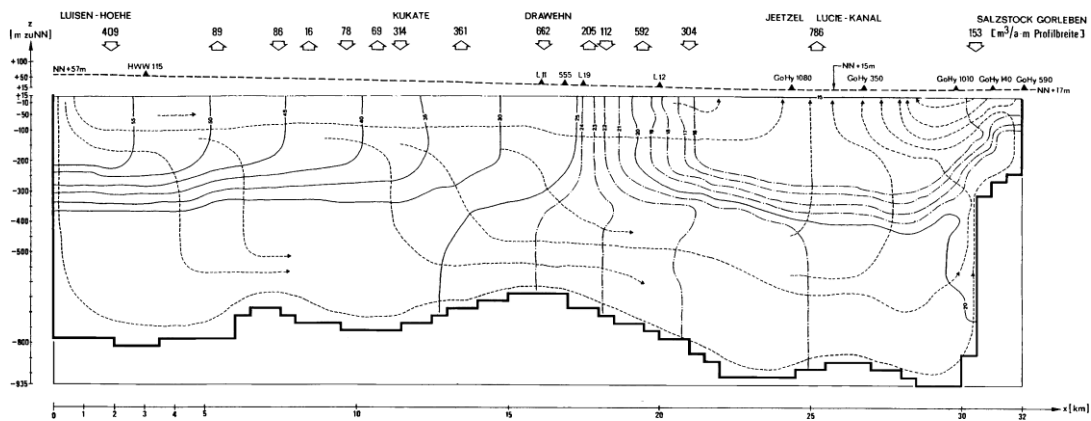
**Abb. H. 2.3** Modellalter des Grundwassers im Rinnenbereich und Fließzeiten bis zum Erreichen der Biosphäre von Aufpunkten an der Aquiferbasis ohne (excl.) und mit (incl.) Berücksichtigung des Hutgesteins (nach /SCH 87/)

## H.2.2 Zweidimensional vertikale Strömungsmodelle

Zur Untersuchung der überregionalen Grundwasserbewegung wurde bereits Anfang der achtziger Jahre auf zwei senkrechten Schnittebenen, die von Süden bzw. Westen auf den Salzstock zulaufen, die Grundwasserbewegung berechnet /GIE 85/. Die Schnitte folgen in etwa dem Geländegefälle und damit im Großen und Ganzen dem Grundwassergefälle. Es wird unterstellt, dass sich das Grundwasser in der Schnittebene bewegt. Dabei sind auch tiefere tertiäre und mesozoische Grundwasserleiter im Liegenden des Rupelton eingeschlossen. Die Schnitte enden jeweils im Bereich des Salzstocks Gorleben und beginnen in der östlichen Lüneburger Heide (W-E-Profil ab Luisen-Höhe; 32 km lang) bzw. am Elm (SSW-NNE-Profil ab Elm; 119 km lang).

Es werden die gleichen Vereinfachungen wie beim dreidimensionalen Grundwassermodell getroffen. Es wird unterstellt, dass sich eine stationäre Grundwasserströmung eingestellt hat. Die höhere Dichte des Grundwassers, die in der Realität gerade im tieferen Grundwasser stark vom Salzgehalt abhängen kann, wird nicht berücksichtigt.

Mit diesen Modellrechnungen sollte abgeschätzt werden, ob am Salzstock Gorleben Grundwasser aus größerer Tiefe aufsteigen kann, das aus großer Entfernung antransportiert wird. Als Beispiel sind in Abb. H. 2.4 die Potentialverteilung und Stromlinien für das W-E-Profil dargestellt. Dabei ist die Grundwasserbewegung auf das Jeetzel und Lucie Vorflutgebiet ausgerichtet. Der tiefe Grundwasserstrom baut sich von West nach Ost teilweise ab. Die im Bereich des Salzstocks Gorleben aufwärts gerichtete Strömung wird vom lokalen Grundwassersystem überlagert und in westliche Richtung in das Vorflutgebiet abgelenkt.



**Abb. H. 2.4** Potentialverteilung und Stromlinien für das W-E-Profil

Insgesamt zeigen die Rechnungen, dass eher kleinregionale Grundwasserströmungssysteme das Bild prägen. Demgegenüber sind Beiträge zur Grundwasserbewegung, die über lange Wege in diese Profilen laufen, vernachlässigbar gering.

Der Modellansatz für diese zwei- und dreidimensionalen Modelle beruht, wie bereits ausgeführt, im Ansatz auf der grundlegenden Vereinfachung einer konstanten Porenwasserdichte. Durch die Nichtberücksichtigung der z. T. hohen Salzgehalte der Grundwässer insbesondere in der Gorlebener Rinne ist Aussagekraft der Modellergebnisse aus dem dreidimensionalen Modell eingeschränkt. Denn generell sind bei Berücksichtigung der Salzgehalte tendenziell längere Laufzeiten zu erwarten.

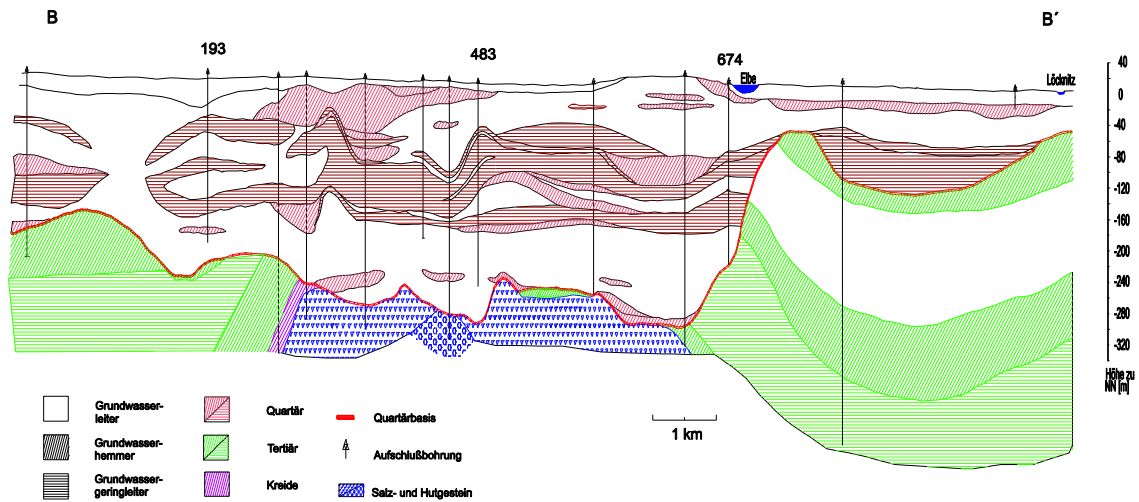


Auch bei den zweidimensionalen Modellstudien wurden die hohe Versalzung des Tiefengrundwassers und damit dessen größere Dichte als wesentliche Einflussfaktoren auf die Grundwasserbewegung vernachlässigt. Diese Rechnungen stellen daher ebenfalls nur eine den damaligen Möglichkeiten der Modellrechnung entsprechende Abschätzung zur Tiefenwasserbewegung dar, bei der Fließgeschwindigkeiten im Tiefenwasser überschätzt werden. Spätere Modellrechnungen zur Tiefenwasserbewegung im regionalen Maßstab bestätigten, dass bei Berücksichtigung der Dichte die Fließgeschwindigkeiten im Bereich des versalzten Grundwassers im Allgemeinen stark verringert werden, wobei sich teilweise andere Strömungsmuster einstellen /VOG 90, SCH 91a/.

### **H.3      Zweidimensionale Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung mit variabler Dichte**

Um Aussagen über den Einfluss der vom Salzgehalt abhängigen Wasserdichte auf das Strömungsfeld im Untersuchungsgebiet Gorleben zu erhalten, wurde im Jahre 1989 mit Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung unter Berücksichtigung der variablen Wasserdichte begonnen. Diese Untersuchungen erwiesen sich als notwendig, nachdem sowohl Rechnungen der BGR als auch Arbeiten verschiedener internationaler Gruppen zeigten, dass sich in Salz-/Süßwassersystemen zumeist gänzlich andere Strömungsmuster mit durchschnittlich kleineren Fließgeschwindigkeiten im Salzwasserbereich einstellten, bei denen in Teilbereichen oft Konvektionszellen auftreten /SCH 91a, NEA 88/.

Die zweidimensionalen Modellrechnungen wurden für Vertikalschnitte durchgeführt, denen die Situation in der Gorlebener Rinne zugrunde liegt /SCH 01/. Als Grundlage wurde ein verallgemeinerter hydrogeologischer Schnitt verwendet, der sich vom Neubildungsgebiet der Gorlebener Tannen durch den tiefsten Bereich der Gorlebener Rinne bis in die nordwestliche Randsenke erstreckt (vgl. Abb. H. 3.1). In der Tiefe der Rinne über dem Salzstock ist das Porenwasser nahezu gesättigt. Es wurde unterstellt, dass diese Versalzung durch den bereichsweise direkten Kontakt des Porenwassers mit dem Salinar bedingt ist. Die Modellstudien sollten zur Klärung der Fragen beitragen, ob sich das vorgefundene Grundwassersystem in einem stationären Zustand befindet und auf welche Variationen hydrogeologischer und hydraulischer Parameter das System sensitiv reagiert.

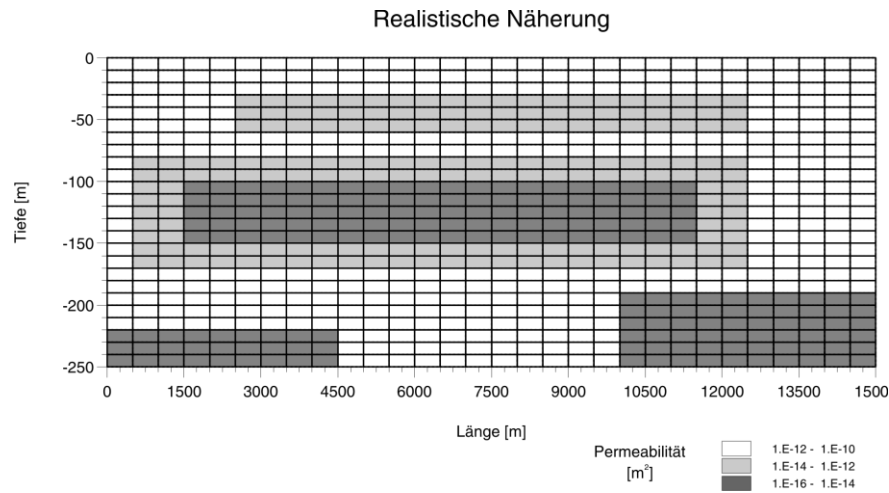


**Abb. H. 3.1** Verallgemeinerter hydrogeologischer Schnitt (nach /VOG 96a/)

Die Modellierung des Salz-/Süßwassersystems beruht auf dem Darcy-Gesetz in der allgemeinen Form, der Kontinuitätsgleichung und der Transportgleichung, die über die variable Dichte als Funktion der Salzkonzentration gekoppelt sind. Die Viskosität wird als konstant angesetzt. Für die Berechnungen wurde das Programm SUTRA verwendet /VOS 84/. Im Vergleich zu Modellrechnungen mit konstanter Dichte gestalten sich diese Modellrechnungen extrem rechenaufwändig. Die Modellierung insgesamt führte an die Grenzen von Wissenschaft und Technik, zumal zum damaligen Zeitpunkt international noch keine Erfahrungen mit der Modellierung von komplexen Süß-/Salzwassersystemen mit hohen Konzentrationsunterschieden vorlagen.

### H.3.1 Modellstudien mit vereinfachten Geometrien

In ersten Rechnungen wurden die hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse stark vereinfacht. Die Vertikalschnitte (15 km lang, 250 m tief) führen entlang der Gorbener Rinne. Am oberen Rand wird ein vom Neubildungsgebiet zu den Niederungen hin abfallender Wasserdruckspiegel vorgegeben. Kein Wasser- und Stofftransport erfolgt über die anderen Ränder mit Ausnahme des Bereichs, in dem der Salzstock den unteren Rand des Modellgebiets bildet und die Konzentration einer gesättigten Salzlauge vorgeschrieben ist. Die geometrische Gestalt der geologischen Strukturen im Modellschnitt wurde Schritt für Schritt durch Änderungen in der Permeabilitätsverteilung mehr an die Realität angepasst. Abb. H. 3.2 zeigt beispielhaft die Modellgeometrie der sog. realistischen Näherung.



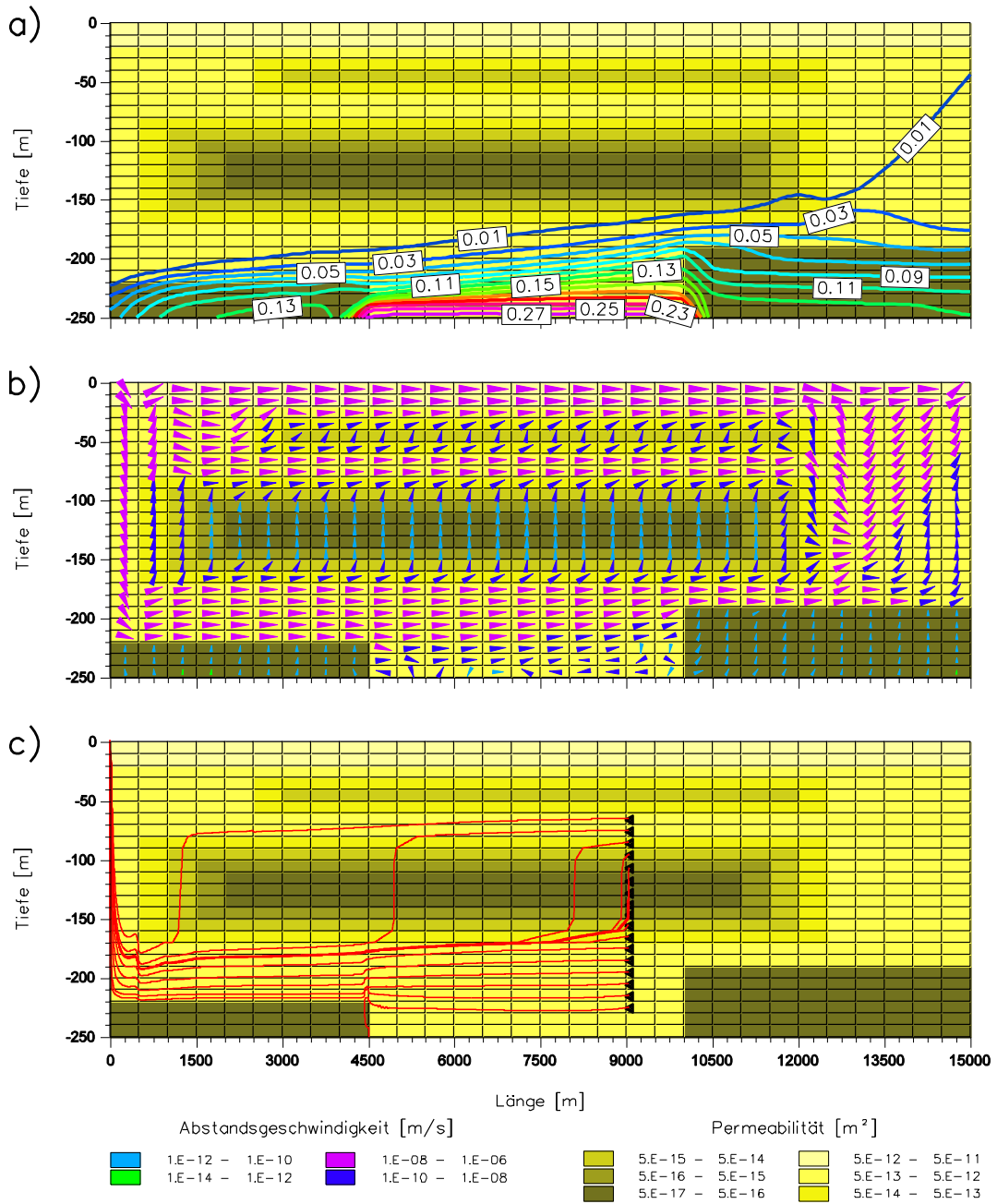
**Abb. H. 3.2** Beispiel einer einfachen Modellgeometrie: räumliche Lage der hydrostratigrafischen Einheiten für die realistische Näherung

Da gleichzeitig untersucht werden sollte, ob sich das Salz-/Süßwassersystem in einem transienten oder stationären Zustand befindet, erfolgten zeitabhängige Rechnungen für eine maximale Modellzeit von 200 000 Jahren, ausgehend von verschiedenen physikalisch sinnvollen Anfangsbedingungen, darunter die einer gesättigten Lösung mit einem scharfen Übergang zu Süßwasser im unteren Teil des tiefen Aquifers /VOG 93/.

Diese Anfangsbedingung wurde auch für Rechnungen mit dem realistischen Modellsystem aus Abb. H. 3.2 gewählt, deren Ergebnisse in Abb. H. 3.3 dargestellt sind. Dabei bleibt die Verteilung der hochsalinen Wässer im tiefen Rinnenbereich über die Zeit relativ stabil und nahe der heutigen Situation. Vergleichbar mit Feldbeobachtungen ist auch der Anstieg der Isolinien in der Übergangszone von Süden nach Norden (Abb. H. 3.3 a). Um Aussagen über Laufzeiten von Wasserteilchen bis in den tiefen Rinnenbereich treffen zu können, wurde das nach 10 000 Jahren Modellzeit errechnete Geschwindigkeitsfeld festgehalten (Abb. H. 3.3 b) und Fließwege mittels Rückwärts-Tracking von der Rinnenmitte aus verfolgt (Abb. H. 3.3 c). Sehr lange Laufzeiten ergaben sich für Teilchen, die im Bereich schwer durchlässiger Schichten gestartet wurden. Für Startpunkte im mittleren Tiefenbereich des Rinnenaquifers liegen die Laufzeiten bei weniger als 20 000 Jahre. Eine Konvektionszelle direkt über dem Salzstock ist maßgeblich für das Fließverhalten im tiefsten Teil dieses Aquifers. Ansatzweise waren diese Ergebnisse bereits vergleichbar mit Interpretationen von Isotopendaten /SCH 93/.

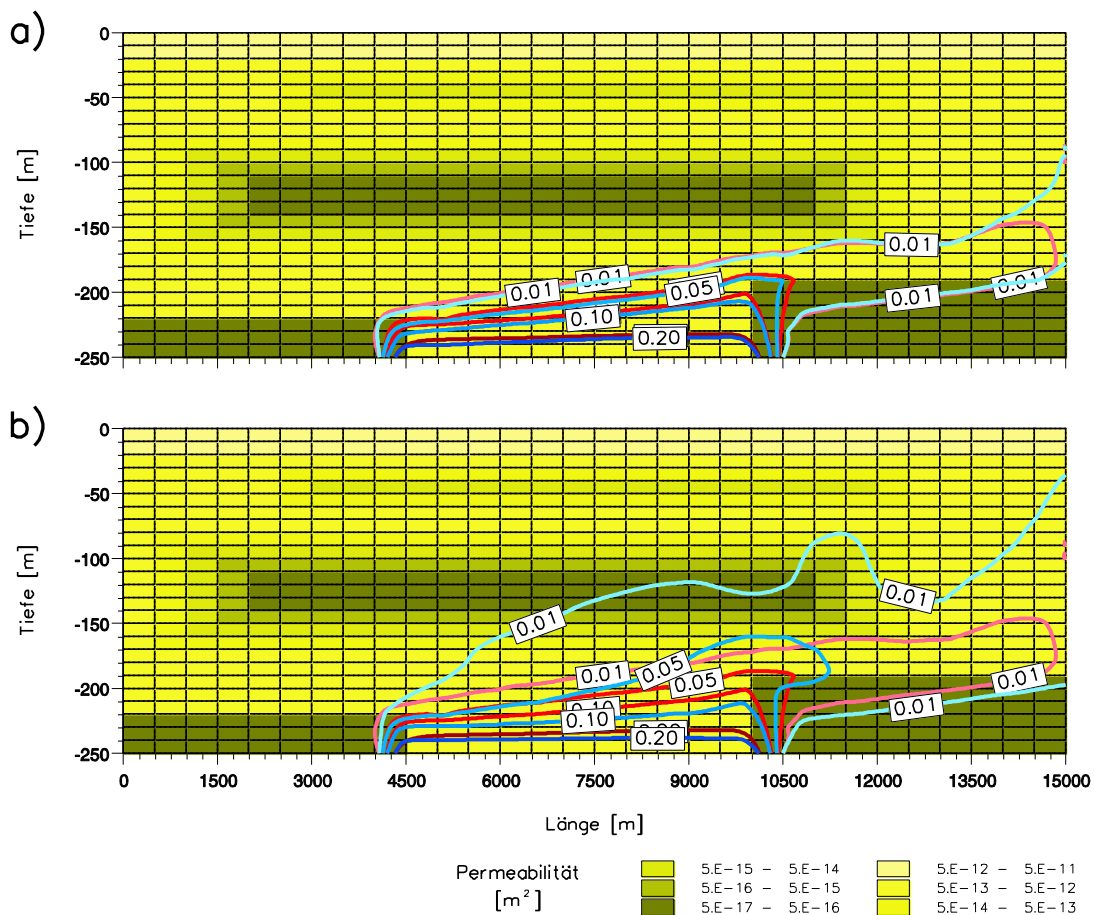
Generell zeigte sich, dass die sich einstellende Salinitätsverteilung in dem betrachteten Zeitrahmen sehr sensitiv auf die geometrische Anordnung verschieden permeabler

Schichten und auf die Länge der Kontaktzone mit dem unterlagernden Salinar, an dem Ablaugung erfolgen kann, reagiert. Als sensitiv erwies sich weiterhin die Wahl der Anfangsverteilung für die Salzkonzentration und die Länge des zu betrachtenden geologischen Zeitraumes. Bei den betrachteten Modellzeiten sind recht breite Bandbreiten in den Ergebnissen möglich.



**Abb. H. 3.3** Ergebnisse für die realistische Näherung nach 10 000 Jahren Modellzeit: a) Berechnete Isolinien des Salzgehalts (Gew. %); b) das zugeordnete Geschwindigkeitsfeld; c) Fließwege von Wasserteilchen

Zur Stützung der Parameterwahl für diese Modellrechnungen wurde – neben einer Prüfung der Auswirkungen einer Netzverfeinerung – der Einfluss der Dispersion auf die Ergebnisse näher untersucht. Dabei erweist sich, dass der Einfluss einer anisotropen Longitudinaldispersion auf die berechneten Salzkonzentrationsverteilungen nur von untergeordneter Bedeutung ist. Sehr sensitiv reagiert die berechnete Dichteverteilung jedoch auf die Größe der transversalen Dispersivität, insbesondere in dem Zeitrahmen, der für zeitabhängige Rechnungen vermutlich in Betracht zu ziehen ist (Abb. H. 3.4). Die Ergebnisse der Rechnungen untermauerten die Auswahl der Parameter und die Aussagen zum Verhalten des Grundwassersystems /VOG 92/.



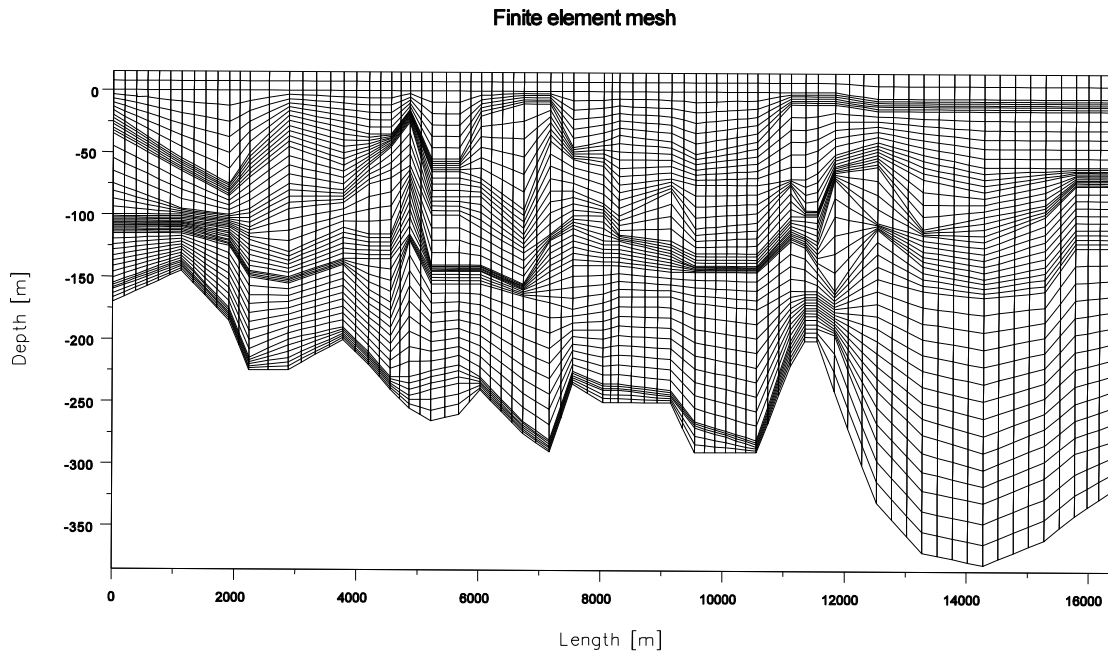
**Abb. H. 3.4** Vergleich von Isolinien des Salzgehalts [Gew. %] nach 10 000 Jahren Modellzeit : a) isotrope (rote Linien) zu anisotroper (blaue Linien) Längsdispersion; b) transversale Dispersionslänge 0,0 m (rote Linien) zu 0,5 m (blaue Linien)

Im Vergleich mit Geländebefunden zur Dichteverteilung wiesen die Ergebnisse darauf hin, dass sich die heutige Salzwasserschichtung und das dazu gehörende Fließsystem noch nicht in einem stationären Zustand befinden /VOG 93/. Es war nicht möglich, die

beobachtete Dichteverteilung näherungsweise als stationären Zustand herzuleiten. Auch wenn sie direkt als Anfangsverteilung für die Modellrechnungen angesetzt wurde, liefen die zeitabhängigen Rechnungen auf eine Verbreiterung speziell der beobachteten Übergangszone von hochsalinen zu gering salinen Wässern hin, wobei in einigen Bereichen die Tendenz zu einer linearen Dichteverteilung erkennbar war. Die relativ unbekannte Salzwasserverteilung, die sich unter früheren Klimabedingungen – während Eiszeiten – einstellte, wirkt auf das gegenwärtige Grundwassersystem im Bereich der Gorlebener Salzstocks offenbar entscheidend nach /SCH 93/.

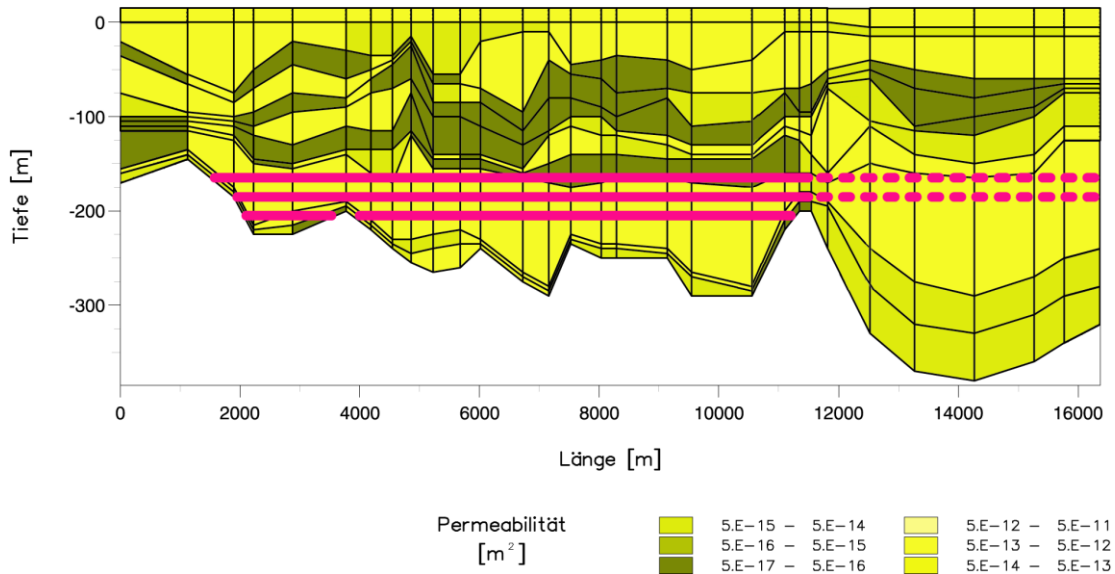
### **H.3.2 Modellstudien für einen realistischen Schnitt**

Für weitere Rechnungen wurden die hydrogeologischen Strukturen des verallgemeinerten hydrogeologischen Profils (Abb. H. 3.1) so realistisch wie möglich übernommen. Im Einstrombereich wurden Verbreitungslücken des Lauenburger-Ton-Komplexes dadurch berücksichtigt, dass eine Verbindung zwischen dem oberflächennahen und dem tiefen Grundwasserleiter geschaffen wurde. Der hydrogeologische Bau der Rinne am nordwestlichen Salzstockrand sowie die Rolle einer möglicherweise unvollständigen Verbreitung Stockwerks-trennender Grundwassergeringleiter in der Elbe-Löcknitz-Niederung wurden in Parametervariationen untersucht. Zur Kalibrierung der Modellrechnungen wurden die Angaben zur Dichte- und Salzgehaltsverteilung sowie die Informationen aus den Isotopenanalysen des Untersuchungsprogramms am Standort Gorleben verwendet /KLI 98, KLI 02a/. Erschwerend für einen Vergleich der Ergebnisse der Modellrechnungen mit Naturdaten wirkte sich aus, dass für den Bereich zwischen Elbe und Löcknitz zu der Zeit kaum Daten zur Dichte des Tiefengrundwassers vorlagen, was zusätzliche Freiheitsgrade für die Festlegung einer Anfangsverteilung gab. Der Modellzeitraum wurde aufgrund der Ergebnisse der vorherigen Studien auf 10 000 Jahre festgelegt. Das entspricht etwa der Zeit seit dem Ende der letzten Eiszeit /VOG 96a/.



**Abb. H. 3.5** Finite Elemente Gitternetz des Modells für den realistischen Schnitt

Die Diskretisierung orientierte sich an der Lage der Schichteinheiten (Abb. H. 3.5). Die Randbedingungen ebenso wie die hydraulischen Parameter wurden wie in den orientierenden Rechnungen gewählt bzw. aufgrund der Ergebnisse geeignet angepasst. Für den Wasserdruck am oberen Rand wurde jedoch ein realistischerer Verlauf, abgeleitet aus dem bekannten Grundwasserspiegelplan, gewählt. Die Kontaktzone mit dem Salzstock, in der Ablaugung möglich sein sollte, wurde zwischen 6 und 10 km angenommen. Da die hydrogeologische Situation im Bereich des tiefen Aquifers am Rinnenausgang nicht bekannt war, wurden dafür verschiedene, hydrogeologisch mögliche Varianten zur Gestalt des Rinnenausgangs in die Modellrechnungen eingebracht. Die Anfangsbedingung für die Salzkonzentration bildete eine im tiefen Rinnenbereich gelegene Zone gesättigter Lösung mit einem sehr schmalen Übergangsbereich zum überlagernden Süßwasser, die durch Änderung ihrer Tiefenlage und ihrer Ausdehnung auf den tiefen Aquifer im Nordgebiet variiert wurde (Abb. H. 3.6) /VOG 96b/.

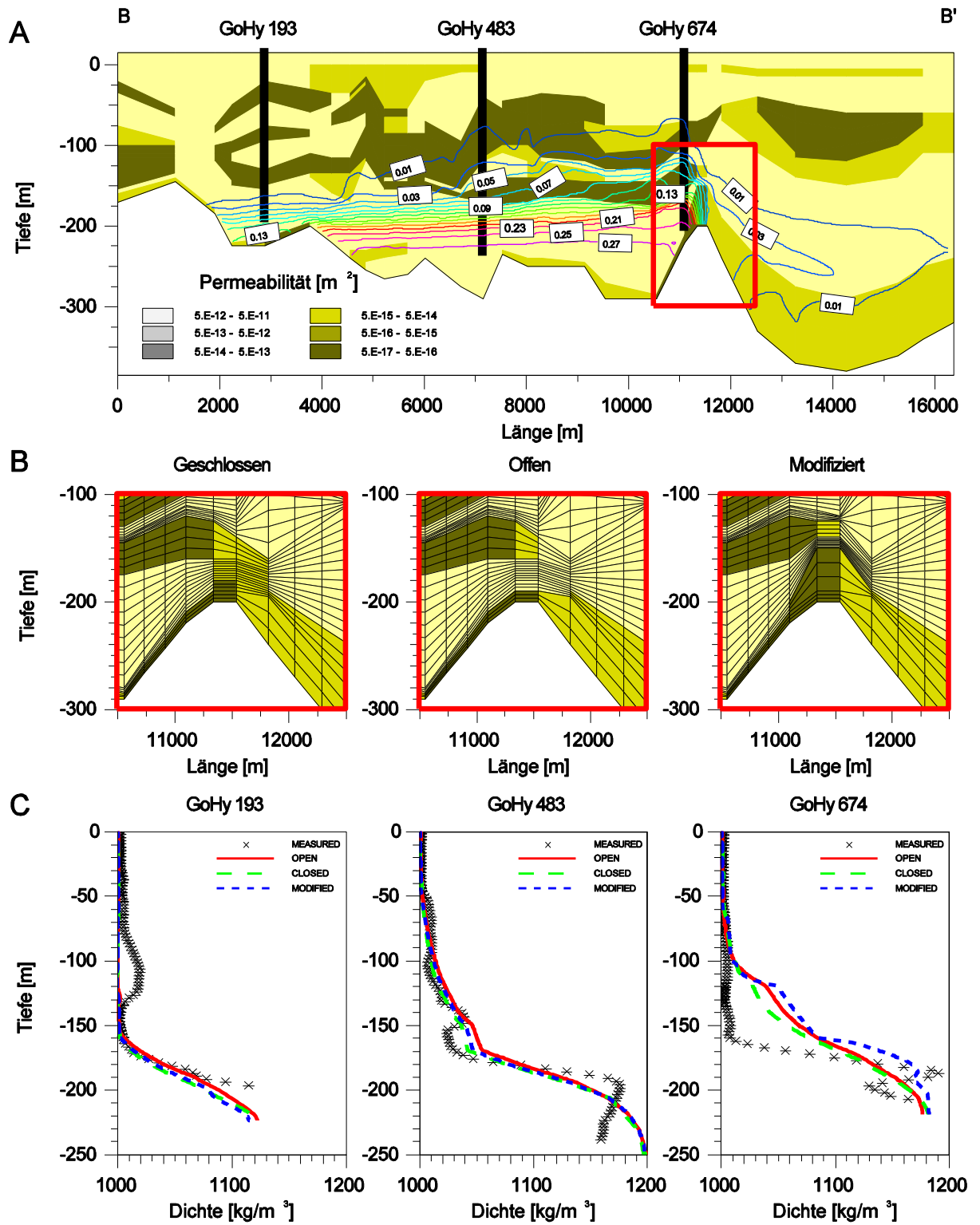


**Abb. H. 3.6** Räumliche Verteilung der hydrostratigraphischen Einheiten mit schematischer Darstellung der Anfangsbedingungen durch die Tiefenlage des Übergangsbereichs Sole/Süßwasser (rote Linien)

Es zeigte sich, dass eine unvollständige Verbreitung der Geringleiter in der Elbe-Löcknitz-Niederung das Fließgeschehen im tiefen Grundwasserleiter kaum beeinflusst. Jedoch hat die hydrogeologische Ausbildung der Rinne am nordwestlichen Salzstockrand (Bereich GoHy 674 in Abb. H. 3.7) in Kombination mit der gewählten Anfangsbedingung für die Dichteverteilung einen starken Einfluss auf die Verteilung der Dichteschichtung und damit die Ausbildung des Fließsystems zum Ende der Modellzeit /LUD 01/.

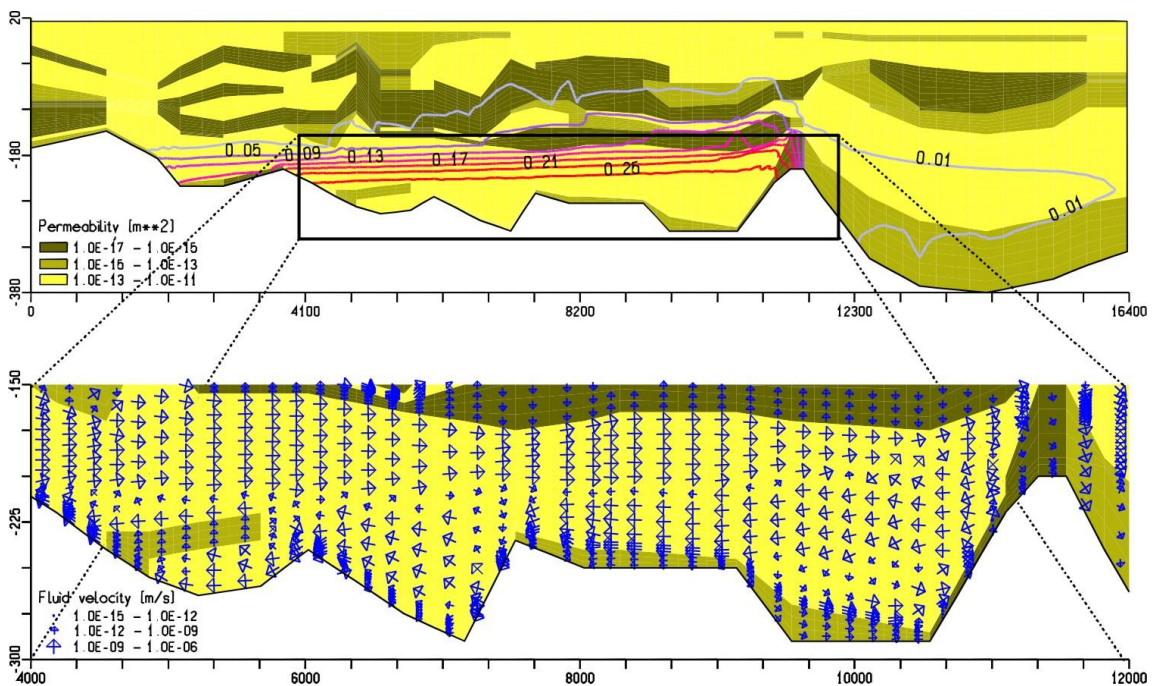
Im unteren Grundwasserleiter der Gorlebener Rinne besteht eine charakteristische vertikale Zweiteilung in eine obere Gradientenschicht, innerhalb derer die Salzgehalte der Wässer näherungsweise logarithmisch zur Tiefe hin ansteigen, und eine untere Zone mit hochsalinen bis salzgesättigten Wässern. Mit den Rechnungen konnte eine akzeptable Übereinstimmung der modellierten Dichteverteilung mit den Felddaten erzielt werden (Abb. H. 3.7) /SCH 98/. Eine Entscheidung bezüglich einer besten Näherung an die Realität war damit aber noch nicht möglich, da sich bei verschiedenen der untersuchten Kombinationen von Rinnenausgangsstruktur und Anfangsverteilung ähnliche Dichteverteilungen einstellen können /VOG 96a/.





**Abb. H. 3.7** Isolinien der Salzkonzentration nach 10 000 a Rechenzeit (A), Modellvarianten des Rinnenaufbaus über dem nordwestlichen Salzstockrand (B) und Vergleich gemessener und berechneter vertikaler Dichteverteilungen an drei in (A) eingezeichnete Bohrlochlokationen (C)

Neben den Isolinien der Salzgehaltsverteilung wurden in den Modellrechnungen auch die Fließsysteme und z. T. Fließwege und Fließzeiten von Wasserteilchen untersucht. Auch wenn sich Bilder zeigen, die tendenziell den Ergebnissen aus den Rechnungen mit einfachen Strukturen ähneln, so sind die Ergebnisse im Detail davon doch sehr verschieden. In Abhängigkeit von geometrischer Struktur und initialer Dichteschichtung bilden sich verschiedene Konvektionszellen im System aus. Als Beispiel zeigt Abb. H. 3.8 in der Darstellung der errechneten Fließgeschwindigkeiten und Fließrichtungen für die obere Gradientenschicht eine nordostwärts gerichtete Wasserbewegung, während sich innerhalb der unteren Zone wirbelförmige Strömungsmuster mit z. T. entgegengesetzten Fließrichtungen ausgebildet haben /KLI 02b/.



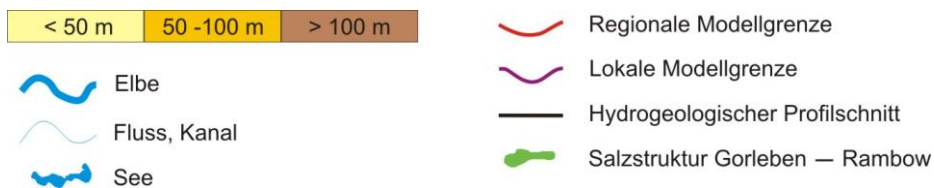
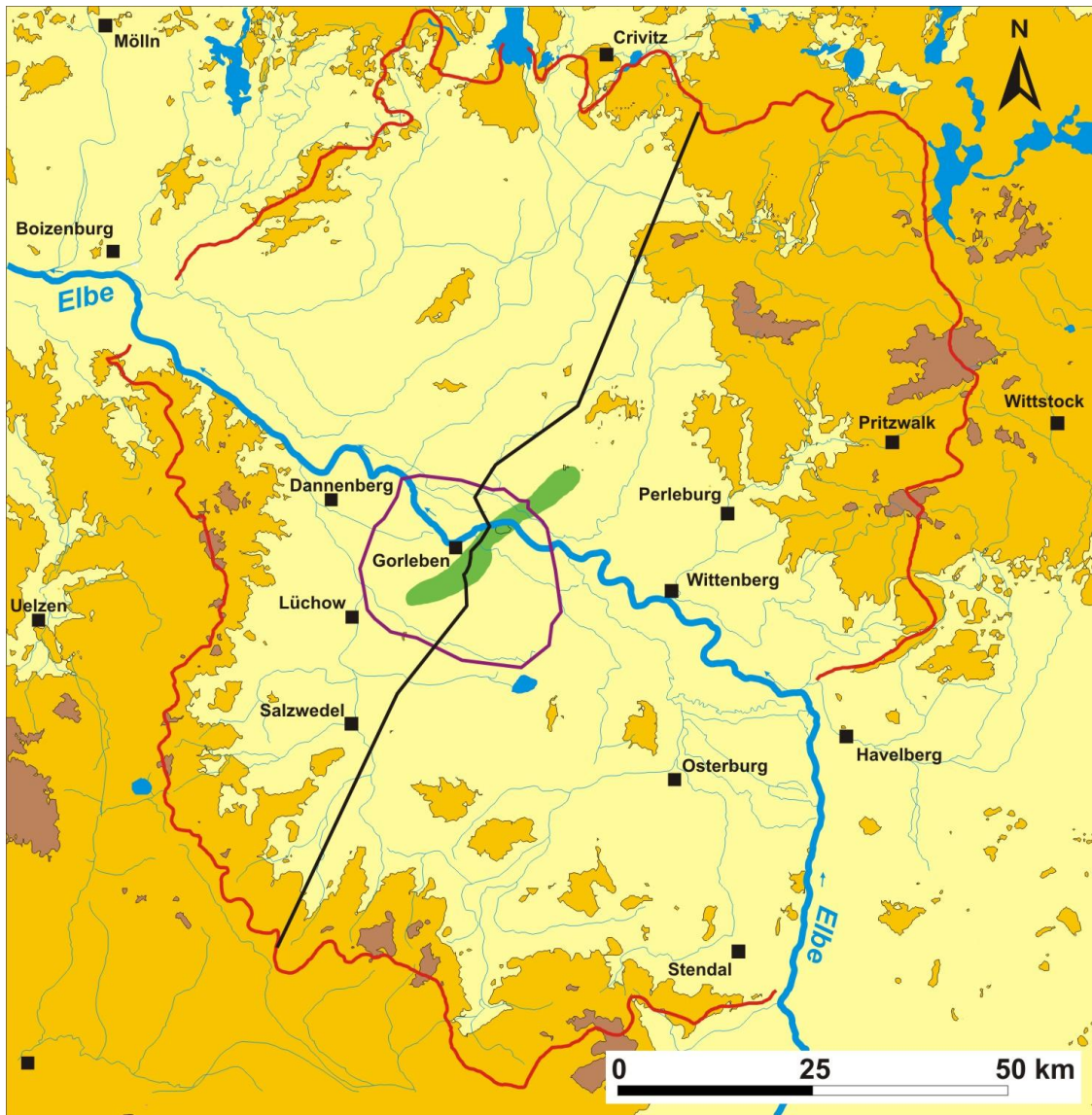
**Abb. H. 3.8** Berechnete Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten im Salzwasser-gefüllten Teil der Gorlebener Rinne (aus /KLI 02b/)

Insgesamt haben diese Modellrechnungen wesentlich zum Verständnis der Strömungs- und Salzwasser-Transportmechanismen innerhalb der Gorlebener Rinne beigetragen /SCH 01/. Belastbare Daten in Hinblick auf die Quantifizierung des Salzwasseraustrags und die Transportzeiten konnten aus diesen Modellrechnungen aufgrund ihrer noch zur Forschung zählenden Grundlagen nicht abgeleitet werden. Dazu trägt allein die durch die zweidimensionale Betrachtungsweise erzwungene Vernachlässigung aller dreidimensional wirksamen Effekte bei, die bei so ausgeprägt heterogenen Systemen wie dem Untersuchungsgebiet Gorleben zu erwarten sind.

## H.4 Paläohydrogeologische Untersuchungen

Die zweidimensionalen Süß-/Salzwasserrechnungen zeigten, dass sich im Grundwassersystem im Raum Gorleben nach der letzten Eiszeit noch keine stationären Verhältnisse eingestellt hatten. Einflüsse auf das System aus Kaltzeiten zeigten sich auch in den Isotopenzusammensetzungen der Wässer, die Neubildungsalter von Holozän bis Pleistozän sowie Mischungen dieser Wässer anzeigten. Diese Ergebnisse waren einer der Auslöser für den Versuch, das Systemverhalten im Rahmen eines paläohydrogeologischen Modells näher zu untersuchen und Auskünfte über seine Entwicklung bis zum heutigen Zustand zu erhalten. Es sollten die langzeitlichen, klimatisch angetriebenen Änderungen des Grundwassersystems während der letzten Eiszeit besser bestimmt werden /BOU 01, SCH 98/.

Dieser Ansatz erforderte die Einbettung des bisherigen lokalen Modellgebietes in ein regionales Modell, das alle Quellen berücksichtigte, die einen signifikanten Einfluss auf das Grundwassersystem und die damit verbundene Salinitätsverteilung haben konnten. Die Grenzen dieses Untersuchungsgebietes, das sich in Ost-West-Richtung über ca. 110 km und in Nord-Süd-Richtung über ca. 125 km erstreckt und vom Vorfluter Elbe gequert wird, werden gebildet durch oberirdische Wasserscheiden, Stromlinien und Oberflächengewässer (Abb. H. 4.1). Im Südwesten wird es durch die Endmoräne des Warthe-Stadiums der Saale-Eiszeit und im Nordosten durch die Endmoräne der Weichsel-Eiszeit begrenzt, die beide auf Grund ihrer Hochlage Neubildungsgebiete darstellen. Im südöstlichen Teil bildet der Lauf der Elbe die Grenze. Im Untersuchungsgebiet stellt die Elbeniederung das Entwässerungsgebiet dar, wobei bis zum Holozän wahrscheinlich kein einzelner Fluss sein Bett in die fluviatilen Weichselsande einschneidet. Die Grundwasserbewegung erfolgt im Wesentlichen von den Hochlagen in diese Niederung. Das lokale Untersuchungsgebiet Gorleben befindet sich im Zentrum des Gebietes /KOE 00c/.



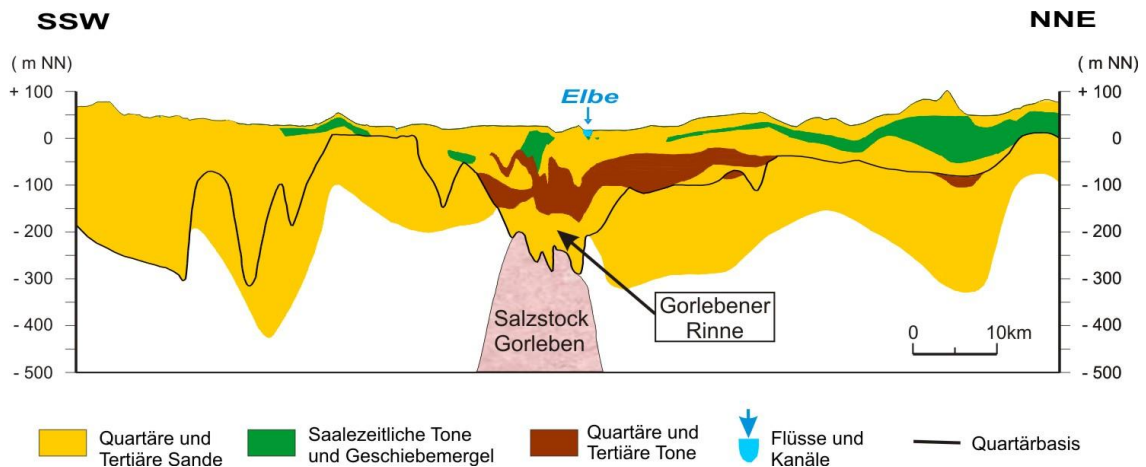
**Abb. H. 4.1** Geographische Lage des regionalen paläohydrogeologischen Untersuchungsgebietes (aus /KOE 00c/)

#### H.4.1 Zweidimensionaler Profilschnitt

Grundlage für die Modellrechnungen bildete u.a. ein Profil, das dieses Gebiet von SSW nach NNE quert (Abb. H. 4.2). Die wichtigsten Wasserleiter werden auch in diesem regionalen Maßstab aus den miozänen Unteren Braunkohlensanden und glazifluviatilen

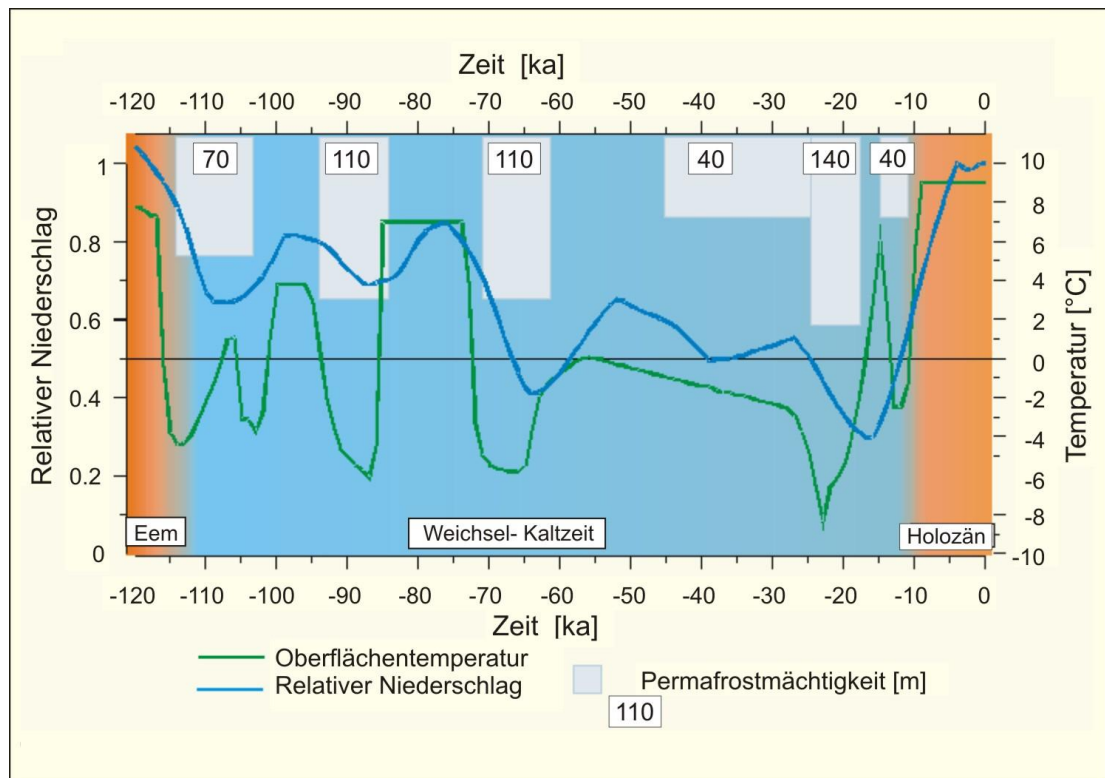


quartären Ablagerungen gebildet. Eingeschaltet sind Tonschichten und mächtige eiszeitliche Geschiebemergel, die als Wassergeringleiter das Systemverhalten beeinflussen. Die Basis wird im Allgemeinen durch paläogene Tone, speziell den Rupelton, gebildet. Das Profil ist so gewählt, dass es über dem Salzstock Gorleben dem Verlauf der Rinne, und damit dem unter Kapitel H.3 beschriebenen Profil, folgt und dort auch die gleiche Randbedingung bezüglich der möglichen Salzablaugung erfüllt /KOE 00b/.



**Abb. H. 4.2** Vereinfachter hydrogeologischer Profilschnitt (Lage des Profilschnittes s. Abb. H. 4.1) nach /KOE 00b/

Einen der wichtigsten Prozesse für die Ausbildung der Grundwasserbewegung stellt der Permafrost dar. Seine Entwicklung und Tiefe wurden in Abhängigkeit von der Klimaentwicklung und der Lage von Oberflächengewässern (Talikbildung) berechnet /DEL 98, DEL 00/ und als Vorgaben für die Modellrechnungen verwendet, in denen die gefrorenen Sedimente durch sehr gering durchlässige Schichten dargestellt wurden. Diese Rechnungen wurden mit dem Programm SUTRA durchgeführt. Als Simulationsperiode wurde der Zeitraum von 120 000 Jahren seit dem Eem, der letzten Warmzeit, angesetzt, wobei dieser Zeitraum in eine Abfolge von 14 Intervallen mit gleichen Niederschlags- und Permafrostbedingungen unterteilt wurde (Abb. H. 4.3).

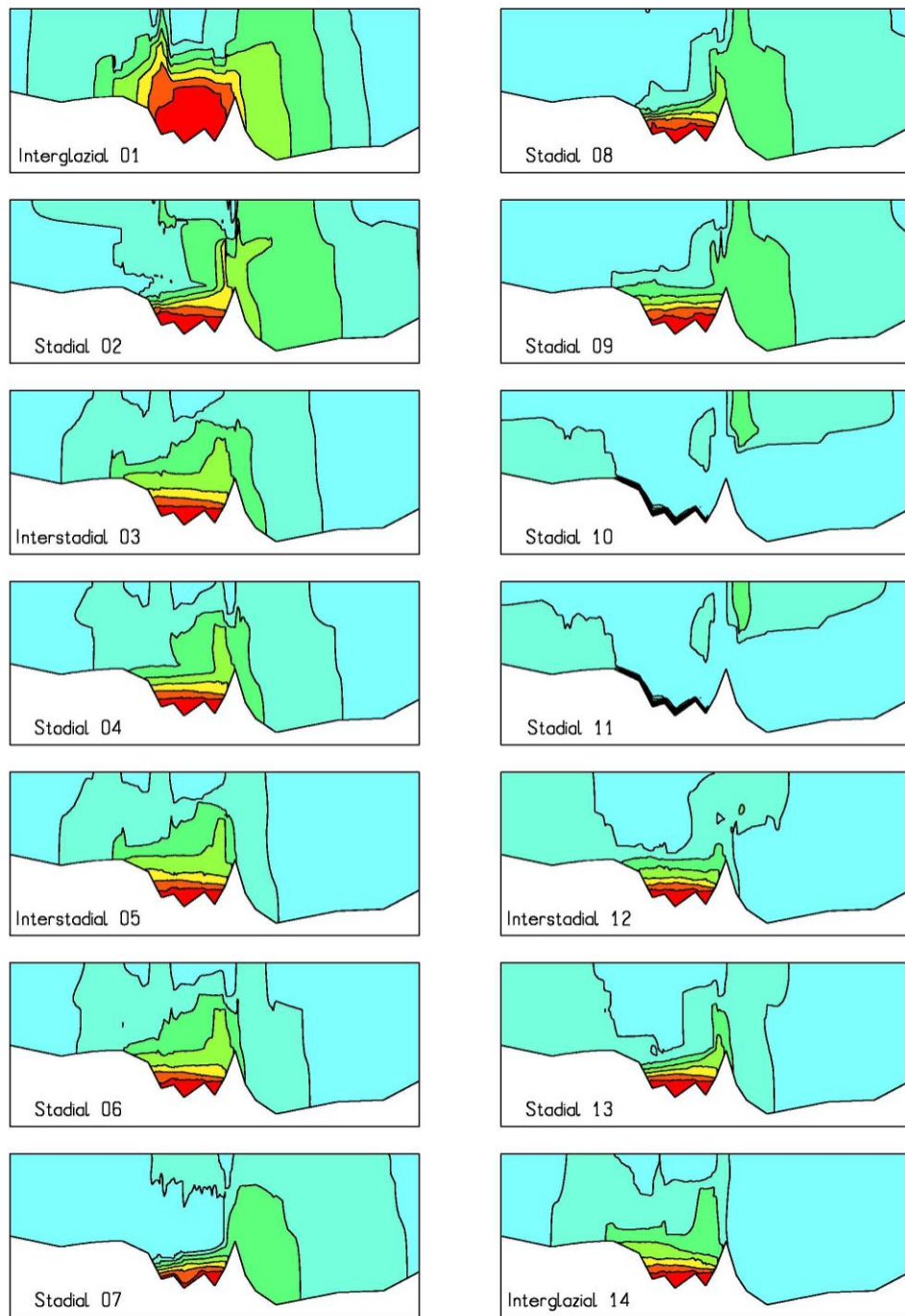


**Abb. H. 4.3** Berechnete Permafrostmächtigkeiten im Modellgebiet innerhalb der Weichsel-Kaltzeit (aus /VOG 01/)

Mehrere Modellszenarien wurden betrachtet, um die Auswirkungen verschiedener Modellannahmen auf das Grundwasserströmungssystem und die Entwicklung der Salz-/Süßwasserverteilung zu untersuchen. Die Variationen betrafen im Wesentlichen die Mächtigkeit des Grundwasserleiters im Bereich des Ausgangs der Gorlebener Rinne, die Position der Elbe im Elbe-Urstromtal sowie den Abfluss des Schmelzwassers in den Grundwasserleiter bzw. einen vorgelagerten Gletschersee.

Als Beispiel zeigt Abb. H. 4.4 die Modellergebnisse für ein Szenario (Szenario C) mit einer verringerten Mächtigkeit des Rinnenausgangs (40 m), einer Position der Elbe ähnlich der heutigen Lage sowie dem Schmelzwasserabfluss in den Aquifer. Die zeitliche Entwicklung der Salzkonzentrationsverteilungen ist anhand der entsprechenden Verteilungen zum Ende einer jeden klimatischen Periode für den zentralen Abschnitt des modellierten Profils (Profil-km 40 bis 80) dargestellt /BOU 01/.

Szenario C



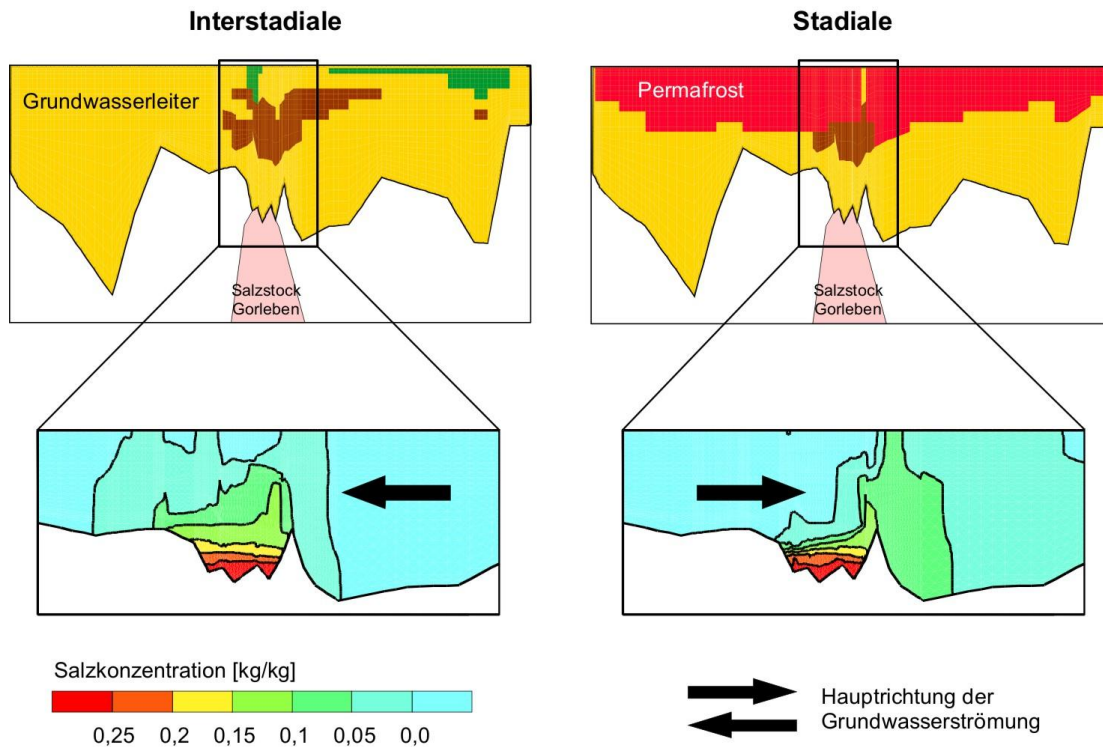
**Abb. H. 4.4** Salzkonzentrationen am Ende einer jeden klimatischen Phase von Szenario C im zentralen Abschnitt von 40 – 80 km des modellierten Profils (Farbskala der Salzkonzentrationen wie in Abb. H. 4.5)

Die Simulation beginnt mit einer Anfangsverteilung, in der ausschließlich in der tieferen Gorlebener Rinne hochsalines Wasser existiert. Bereits nach 6 000 Jahren, am Ende der Eem-Warmzeit, hat sich das saline Wasser südlich und überwiegend nördlich der Rinne ausgebreitet. Bis zum Intervall 10 folgt eine Serie von stadialen und interstadialen Phasen, in denen sich die Salzfahne in Abhängigkeit von der in der jeweiligen Phase herrschenden Grundwasserströmung nach Norden oder Süden bewegt. In Stadialen ist die Transport-Richtung verstärkt nach Norden ausgerichtet, umgekehrt überwiegt in Interstadialen ein Transport nach Süden. Während der Stadiale lässt sich auch der Einfluss eines Taliks im Bereich der Elbe gut erkennen. Die Perioden 11 bzw. 12 mit einer Gesamtdauer von nur 4 000 Jahren sind die entscheidenden Phasen in diesem Szenario. Während dieser Zeit kommt es durch das Gletscherschmelzwasser zu einem nahezu kompletten Austausch der Rinnenwässer und damit zur Aussüßung des tiefen Wasserleiters über dem Salzstock. Nur in den Grundwassergeringleitern im Hangenden verbleiben partiell höher saline Restwässer. Bereits in der interstadialen Phase 12, also vor ca. 15 000 Jahren, hat sich die Rinne jedoch erneut mit hochsalinen Wässern gefüllt. Bis zum Ende der Modellzeit setzt sich der beschriebene allgemeine Trend bezüglich der Ausbreitungsrichtung der Wässer in Abhängigkeit von der klimatischen Phase fort.

Wie in diesem Beispiel stellte sich als wesentliches Ereignis der Zeitraum von ca. 20 000 Jahren vor heute mit dem Maximalvorstoß des Gletschers bis an den nördlichen Rand des Modells heraus, bei dem Schmelzwasser unter hohem Druck in das Modellgebiet einströmte /KOE 00b/.

Die Modellrechnungen zeigten, dass die Anwesenheit von Permafrost das hydraulische System aufgrund fehlender Grundwasserneubildung stark beeinflusst. Bei Anwesenheit von Permafrost wird die räumliche Verteilung von Grundwasseraustritten durch die Lage von Flüssen und Seen bestimmt, unter denen sich Taliks bilden. Aufgrund des vorgegebenen Druckgradienten an der Oberfläche ist der Grundwasserabstrom generell von den Hochlagen im Norden und Süden auf die Elbeniederung gerichtet. Die Bewegung der hochsalinen Wässer im unteren Teil der Gorlebener Rinne ist mit den paläoklimatischen Bedingungen gekoppelt. Während der Stadiale ist die Bewegung dieser Wässer nordwärts, in Interstadialen südwärts gerichtet /KOE 01a/, wie in Abb. H. 4.5 noch einmal anschaulich dargestellt ist.





**Abb. H. 4.5** Salzkonzentration und Fließrichtung des Grundwassers über dem Salzstock Gorleben während eines typischen Stadials und Interstadials

Die Lage der Gletscherfront während der Hochphase der letzten Vereisung hat den stärksten Einfluss auf das Grundwassersystem. Der Einstrom des Schmelzwassers an der Basis des Eisschildes kann die Größe und Richtung der Grundwasserbewegung im regionalen und im lokalen Bereich sehr stark beeinflusst haben /KOE 00a/. In Abhängigkeit von der Existenz eines vorgelagerten Gletschensees kann das in der Gorleber Rinne vorhandenen Salzwasser vollständig oder nur teilweise herausgespült worden sein /BOU 01/. In beiden Fällen hätte sich bis heute aber wieder eine mit dem heutigen Zustand vergleichbare Süß-/Salzwasserverteilung eingestellt. Es folgt jedenfalls aus den Modellrechnungen, dass die hydraulischen Bedingungen nach der Hochphase vor 20 000 Jahren entscheidend für die heutige Situation im Grundwassersystem und die damit verbundene Salinitätsverteilung sind /KOE 01a, VOG 01/.

### H.4.2 Dreidimensionale Rechnungen

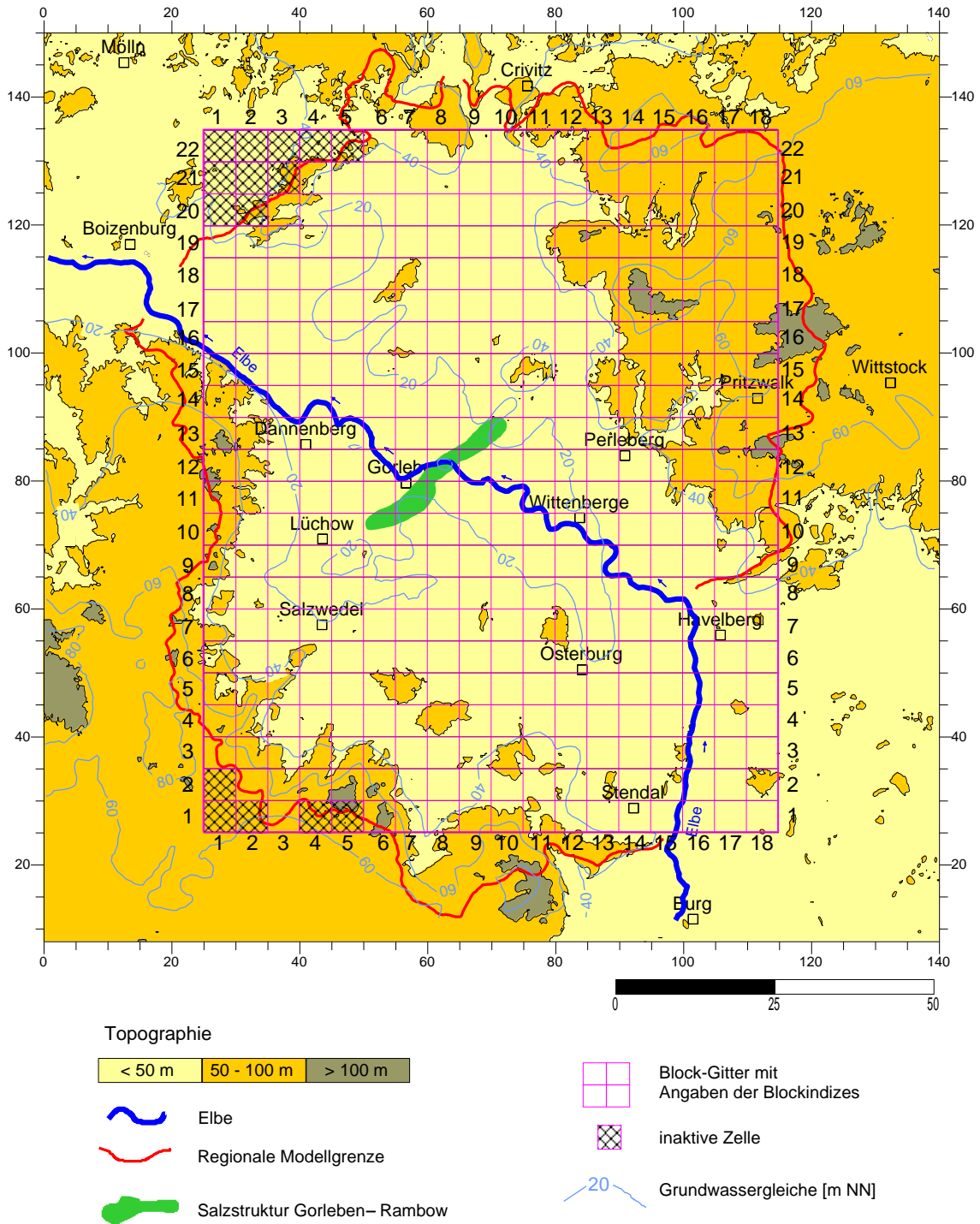
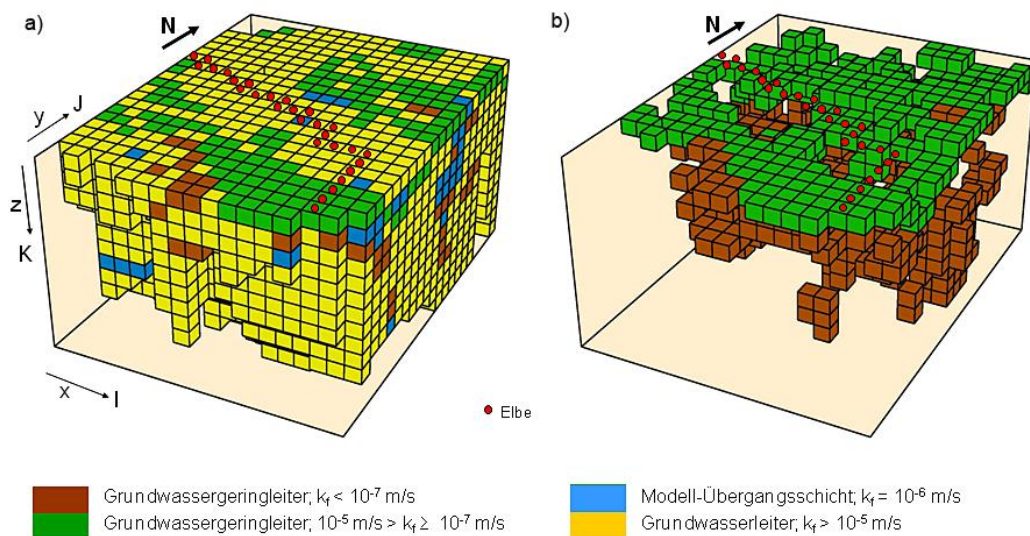


Abb. H. 4.6 Lageplan des Untersuchungsgebietes

Die Modellergebnisse der zweidimensionalen dichteabhängigen Strömungsmodellierung zeigten, dass zur genaueren Beschreibung des regionalen Grundwassersystems des Elberaumes zwischen Burg und Boitzenburg, das den Bereich der Salz-

struktur Gorleben–Rambow einschließt, und seiner paläohydrogeologischen Entwicklung ein dreidimensionaler Modell-Ansatz notwendig ist. Nur dadurch lassen sich z. B. Auswirkungen von Bereichen, in denen Grundwassergeringleiter als Trennschichten zwischen verschiedenen Grundwasserleitern fehlen, auf das Grundwasserströmungssystem berücksichtigen. Weiterhin ließ sich daraus ableiten, dass sich der betrachtete Zeitraum von 120 000 Jahren, d. h. ab dem Ende der Eem-Warmzeit, auf die Zeit ab der Vereisungshochphase der Weichsel-Eiszeit vor ca. 25 000 Jahren einschränken lässt, um die Entwicklung der heutigen Salz-/Süßwasserverteilung prinzipiell zu erklären.

Für den dreidimensionalen Modellansatz wurde das gesamte oben genannte regionale Untersuchungsgebiet betrachtet (Abb. H. 4.6). Basierend auf Tiefenlinienplänen mit Angaben zur Verbreitung der Grundwassergeringleiter und Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet wurde die räumliche Diskretisierung vorgenommen. Um akzeptable Rechenzeiten zu erreichen, wurde im Modell-Aufbau auf komplizierte hydrogeologische Strukturen verzichtet. Das vereinfachte Modell (141 414 Knoten, 128 700 Elemente) gewährleistet jedoch die Wiedergabe der generellen hydraulischen Gegebenheiten (Abb. H. 4.7). Abgeleitet aus den Ergebnissen der zweidimensionalen Rechnungen wurde der Zeitraum auf 25 000 Jahre beschränkt, d. h. von der Hochphase der Weichsel-Eiszeit bis heute, und in vier Zeitintervalle mit gleichen Niederschlags- und Permafrostbedingungen unterteilt. Den Zeitintervallen wurden außerdem Randbedingungen entsprechend ihrer charakteristischen klimatischen Bedingungen zugewiesen /KOE 01b/.



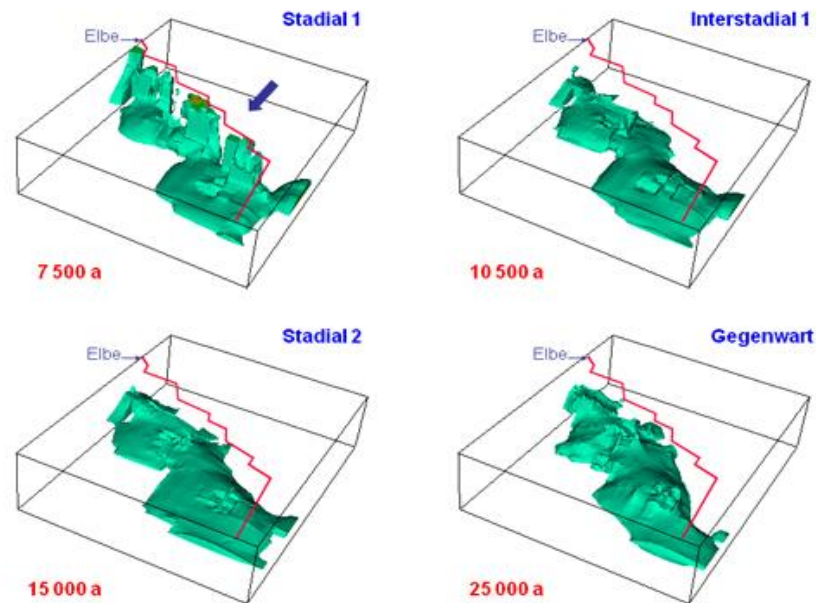
**Abb. H. 4.7** a) Hydrogeologische Einheiten des dreidimensionalen regionalen Modells (ohne inaktive Zellen) und b) Verbreitung der Geringleiter im Modell

Für die Simulationen wurde eine Betaversion des Programmcodes SUTRA2D3D verwendet, die vom USGS nur zu Testzwecken zur Verfügung gestellt worden war /VOS 99/. Obwohl die Modellrechnungen plausible Ergebnisse lieferten, ist deshalb eine Interpretation der Modellergebnisse nur bedingt durchführbar.

Bei den Simulationen wurde der Schwerpunkt auf die Untersuchung des Einflusses des Zustromes an Gletscherschmelzwasser sowie von Abtragungswässern der zahlreichen Salzstrukturen im regionalen Untersuchungsgebiet gelegt. In den vorangegangenen zweidimensionalen Modellrechnungen (Kap. H.4.1) wurde ein Schmelzwasserzustrom während der Hochphase über einen Zeitraum von maximal 3 000 Jahren betrachtet. Im dreidimensionalen Modellansatz wurde der Zeitraum nun auf die gesamte Vereisungshochphase (7 500 a) ausgedehnt, damit die maximale Auswirkung des Zustromes untersucht werden konnte.

Das Verhalten des Grundwassersystems lässt sich beispielhaft in Abb. H. 4.8 verfolgen für die Variante, bei der zusätzlich in Gebieten potentieller Quellen für aufströmende Abtragungswässer, d. h. vor allem im Bereich anderer Salzstrukturen, an der Modellunterkante vertikale Randzuströme von hochsalinen Wässern angenommen werden. Um die zeitliche Entwicklung der Grundwasserversalzung nachvollziehen zu

können, ist die räumliche Konzentrationsverteilung als Isofläche eines Salzgehaltes von 0,1 kg/kg am Ende eines jeweiligen Zeitintervalls für den Tiefenbereich oberhalb von -150 m NN wiedergegeben. Der blaue Pfeil deutet den Schmelzwasserzustrom während der Hochphase an. Zur räumlichen Orientierung ist zusätzlich der Verlauf der Elbe als rote Linie an der Modelloberfläche markiert.



**Abb. H. 4.8** Räumliche Konzentrationsverteilung als Isofläche eines Salzgehaltes von 0,1 kg/kg am Ende eines jeweiligen Zeitintervalls

Am Ende der Hochphase der Vereisung (7 500 a) zeichnet sich der Verlauf der Elbe durch Bereiche mit höherer Grundwasserversalzung deutlich ab. Denn bedingt durch den Schmelzwasserzustrom unterhalb des Permafrostes kommt es zu einem Aufströmen im Bereich des Vorflutgebietes der Elbe, unter dem ein Talik angenommen wird. Der Zustrombereich selbst, in den das Schmelzwasser direkt einströmt, ist weitgehend frei von salinen Wässern. In tieferen Regionen südlich des Vorflutgebietes lässt sich eine horizontale Ausbreitung saliner Wässer erkennen.

Der Bereich der Elbe ist stellt sich als bevorzugte Zone für eine oberflächennahe Versalzung durch aufsteigende Tiefenwässer dar. Aufgrund der langen Permafrostzeiten bildet sich das Vorflutgebiet mit der Elbe durch einen darunter stark versalzene Grundwasserleiter deutlich ab. Durch den zusätzlichen vertikalen Zustrom

von salinen Wässern ist aufgrund der Randbedingungen in dieser Variante eine wesentlich stärkere laterale Ausbreitung versalzener Grundwässer unabhängig von dem jeweiligen Klimaintervall zu beobachten. Dieses führt auch zu einer deutlich höheren Versalzung des Bereichs südlich der Elbe. Zusätzlich ist am Ende der letzten Klimaphase, d. h. in der Modellgegenwart, ein deutliches Anheben der Isofläche zur Oberfläche hin festzustellen.

Generell zeigen die dreidimensionalen Modellrechnungen, dass während der Vereisungshochphase ein deutliches Aussüßen des Grundwassers in den Schichten nördlich der Elbe aufgrund des hohen Schmelzwasserzustromes festzustellen ist. Eine Aufsatzung des oberflächennahen Grundwassers ist überwiegend im Aufstromgebiet um die Elbe gegeben. Lateral kommt es zusätzlich zu einer erhöhten Aufsatzung in den Grundwasserleitern südlich der Elbe.

Ein Vergleich mit der heutigen Grundwasserversalzungskarte /GRU 00/ zeigt eine ähnliche laterale Ausdehnung der Modell-Grundwasserversalzung für die gerechneten Varianten in den Bereichen südlich der Elbe. Nördlich der Elbe ist nur das Modellergebnis der Variante mit Berücksichtigung weiterer potentieller Salzwasserquellen (vgl. Abb. H. 4.8) mit der Grundwasserversalzungskarte vergleichbar. Aber auch die in dieser Variante berechnete Verbreitung von Versalzungsgebieten kann noch nicht herangezogen werden, um die heutigen Verhältnisse zu erklären.

## **H.5 Schlussfolgerungen aus den Modellrechnungen**

Die Rechnungen zur Salz-/Süßwasserbewegung haben insgesamt gezeigt, dass eine genaue Betrachtung des Grundwassersystems eines dreidimensionalen Modells mit Berücksichtigung der variablen Dichte bedarf. Zeitabhängige Entwicklungen sollten im Rahmen einer Analyse des paläohydrogeologischen Systemverhaltens berücksichtigt werden. Das großräumige und hydraulisch komplizierte System des weiteren Salzstockbereichs von Gorleben bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller wesentlichen Komponenten konnte bislang noch nicht vollständig simuliert werden. Ebenso wie die Verbesserung der technischen Rahmenbedingungen läuft auch die Entwicklung von geeigneten Strömungsmodellen für komplexe 3D-Modellierung, die Dichteeffekte berücksichtigt, weiter.

Die bisherigen dreidimensionalen Süßwasserrechnungen stellen für den Bereich des Süßwassers jedoch eine gute Näherung an die Realität dar. Für die Dichte-beeinflussten Strömungsvorgänge des Salzwassers in der Gorlebener Rinne spiegeln diese Modelle die Realität jedoch nur in eingeschränktem Maße wider. Die zweidimensionale Süß-/Salzwasser-Modellrechnungen durch die Gorlebener Rinne zeigen, dass mit tendenziell kleineren Fließgeschwindigkeiten und damit längeren Fließzeiten im Bereich der Salzwässer im Vergleich zu Süßwässern zu rechnen ist. Bezüglich der Strömungsgeschwindigkeiten und Fließzeiten aus der Gorlebener Rinne können daher die Ergebnisse der dreidimensionalen Süßwassermodelle als konservativ angesehen werden.

## H.6 Literaturverzeichnis

- /ADH 97/ Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie, Hydrogeologische Kartieranleitung, Geol. Jb., G 2, 1997, Hannover.
- /BOU 01/ Boulton, G., Gustafson, G., Schelkes, K., Casanova, J., Moren, L., Palaeohydrogeology and geoforecasting for performance assessment in geosphere repositories for radioactive waste disposal (PAGEPA), Final report, Nuclear science and technology series, EUR 19784 EN, European Commission, Brussels, 2001, 147 pp.
- /DEL 98/ Delisle, G., Numerical Simulation of Permafrost Growth and Decay, Journal of Quaternary Science, 1998, 13 (4), 325-333.
- /DEL 00/ Delisle, G., Boulton, G., A Numerical Model on the Weichselian Permafrost Aggradation/Degradation in Central and Northern Europe, Proc. European Geophysical Society, XXV General Assembly, Nice, France, 24.-29. April 2000.
- /FIE 84/ Fielitz, K., Giesel, W., Schelkes, K., Schmidt, G., Calculations of Groundwater Movement and Salt Transport in the Groundwater of the Sedimentary Cover of the "Gorleben" Salt Dome, Proc. "Int. Symposium on Groundwater Resources, Utilization and Contaminant Hydrogeology", 1984, Vol. II, p. 383-392, Montreal, Canada.



- /GIE 85/ Giesel, W., Delisle, G., Fielitz, K., Schelkes, K., Schildknecht, F., Schmidt, G., Boehme, J., Keller, S., Ludwig, R., Vierhuff, H., Grundwasserbewegung im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben - Datenermittlung, Interpretation und Modellrechnungen, Fachband 17 des Abschlussberichtes "Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung", 125 S., 1985, Berlin.
- /GRU 00/ Grube, A. Wichmann, K. Hahn, J., Nachtigall, K.H., Geogene Grundwasserversalzung in den Poren-Grundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft, DVGW-Technologiezentrum Wasser, Bd. 9., 2000, Karlsruhe.
- /KLI 98/ Klinge, H., Vogel, P., Boehme, J., Ludwig, R., Schelkes, K., Freshwater/Saltwater Distribution in the Aquifer System above the Gorleben Salt Dome and Special Aspects of Simulation of Brine Transport. — Proc. International Conference on Radioactive Waste Disposal, DisTec'98, Hamburg, September 9-11, 1998, pp. 133-138.
- /KLI 02a/ Klinge, H., Schelkes, K., Rübél, A., Suckow, A., Schildknecht, F., Ludwig, R., The Saltwater/Freshwater Regime in the Sedimentary Cover of the Gorleben Salt Dome.- Transport in Porous Media 47, Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 125-148.
- /KLI 02b/ Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A., Standortbeschreibung Gorleben – Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben, Geol. JB, Reihe C, Heft 71, 2007, 59 Abb., 4 Tab., 1 Anl., 147 S., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- /KOE 00a/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., A Palaeohydrogeological Approach to Regional Density-Dependent Groundwater Modeling at the Gorleben Site in Northern Germany, In: Rosbjerg et al. (eds), Groundwater Research, Proc. Int. Conf. Groundwater Research (GROUNDWATER 2000) Copenhagen 6-8 June 2000, Balkema, Rotterdam, 2000, p. 105-106.



- /KOE 00b/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., A Palaeohydrogeological Approach to Regional Density-Dependent Groundwater Modeling: A Case Study in Northern Germany, Proc. SWIM 16, Nicholas Copernicus University, Vol. 80 (2000), pp. 103-110.
- /KOE 00c/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., 2D-Modellierung der paläohydrogeologischen Entwicklung des Grundwassersystems im Elberaum zwischen Burg und Boitzenburg, unveröff. Bericht, BGR, Archiv Nr. 0120315, 2000, Hannover.
- /KOE 01a/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., Influence of long-term climate variations on a freshwater/saltwater system in northern Germany, First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers – Monitoring, Modeling, and Management, Essaouira, Tunisia, April 23-25, 2001 (on CD).
- /KOE 01b/ Kösters, E., Vogel, P., Schelkes, K., 3D-Modellierung der paläohydrogeologischen Entwicklung des Grundwassersystems im Elberaum zwischen Burg und Boitzenburg, unveröff. Bericht, BGR, Archiv Nr. 0121964, 2001, Hannover.
- /LUD 01/ Ludwig, R., Schelkes, K., Vogel, P., Wollrath, J., Implications of large-scale heterogeneities for hydraulic model studies at the potential site of a radioactive waste repository at Gorleben, Germany. - Engineering Geology 61, 2001, p. 119-130.
- /NEA 88/ NEA & SKI (ed.), The International HYDROCOIN Project Level 1: Code Verification, OECD Publ., 1988, 198 S., Paris, Frankreich.
- /SCH 91a/ Schelkes, K., Vogel, P., Klinge, H., Knoop, R.-M., Modelling of Variable Density Groundwater Flow with Respect to Planned Radioactive Waste Disposal in West Germany - Validation Activities and First Results, Proc. GEOVAL 1990, Symp. on Validation of Geosphere Flow and Transport Models, Stockholm 14.-17. May 1990, OECD, 1991, S. 328-335, Paris, Frankreich.

- /SCH 93/ Schelkes, K., Vogel, P., Paleohydrogeological Information as an Important Tool for Groundwater Modelling of the Gorleben Site, in: Paleohydrogeological Methods and their Applications, Proc. NEA Workshop, Paris, OECD-Publ., 1993, p. 237-250, Paris.
- /SCH 98/ Schelkes, K., Klinge, H., Vogel, P., Wollrath, J., Aspects of the Use and Importance of Hydrochemical Data for Groundwater Flow Modelling at Radioactive Waste Disposal Sites in Germany, in: Use of Hydrogeochemical Information in Testing Groundwater Flow Models, Proc. NEA/SEDE Workshop, Borgholm, September 1-3 , 1997, OECD, 1998, pp. 151-162.
- /SCH 01/ Schelkes, K., Vogel, P., Klinge, H., Density-Dependent Groundwater Movement in Sediments Overlying Salt Domes – The Gorleben Site Example, Phys. Chem. Earth (B) Vol. 26, No. 4, 2001, pp. 361-365.
- /SCH 87/ Schmidt, G., Die Bewegung des Grundwassers im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben – Untersuchungen mit einem numerischen Modell, unveröff. Bericht, BGR, Archiv-Nr. 102396, 1987, Hannover.
- /SCH 91b/ Schmidt, G., GS 4000 – Ein dreidimensionales Modell zur Simulation der Grundwasserbewegung im porösen Medium, unveröff. Bericht, BGR, Archiv-Nr. 108083, 1991, Hannover.
- /VIE 84/ Vierhuff, H., Hydrogeological Investigations in the Area of the Gorleben Salt Dome, Proc. "Int. Symposium on Groundwater Resources, Utilization and Contaminant Hydrogeology", 1984, Vol. II, p. 573-579, Montreal, Canada.
- /VOG 90/ Vogel, P., Schelkes, K., Klinge, H., Geissler, N., Analysis of Density-Dependent Deep Groundwater Movement in Northern Germany Influenced by High Salinity. - in: ModelCARE'90, International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, 1990, Volume of Poster Papers , S. 373-382, Den Haag, The Netherlands.

- /VOG 92/ Vogel, P., Schelkes, K., Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung für einen Aquifer über einem Salzstock – Dokumentation der Ergebnisse einiger Parametervariationen zur hydrodynamischen Dispersion, unveröff. Bericht, BGR, Archiv-Nr. 110147, 1992, Hannover.
- /VOG 93/ Vogel, P., Schelkes, K., Giesel, W., Modeling of Variable-Density Flow in an Aquifer Crossing a Salt Dome - First Results, in: E. Custodio & A. Galofre (ed.): Study and Modelling of Salt Water Intrusion, Proc. 12th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), 1993, p. 359-369, CIMNE, Barcelona.
- /VOG 96a/ Vogel, P., Schelkes, K., Influence of initial conditions and hydrogeological setting on variable density flow in an aquifer above a salt dome, in: Kovar, K. & van der Heijde, P. (Eds.): Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Proc. ModelCARE'96 Conference, Golden, Colorado, USA, 24-26 Sept.1996, IAHS Publ. No. 237, 1996, pp 373-381.
- /VOG 96b/ Vogel, P., Schelkes, K., Modelling of brine transport in an aquifer crossing the Gorleben salt dome - Influence of initial conditions and hydrogeological setting, in: Proc. 14th Salt Water Intrusion Meeting (SWIM 96), 17-21 June 1996, Malmö, Sweden, Rapporten och meddelanden nr. 87, Uppsala, 1996, pp 61-70.
- /VOG 01/ Vogel, P., Kösters, E., Schelkes, K., A conceptual approach to long-term climatically driven groundwater variations in a freshwater/saltwater system.- Proc. XXXI International Association of Hydrogeologists Congress Munich, 10. – 14. Sept. 2001, 2001, p. 425 – 429.
- /VOS 84/ Voss, C. I., SUTRA: A finite-element simulation model for saturated unsaturated, fluid-density-dependant ground-water flow with energy transport or chemically-reactive species solute transport, USGS Water Resources Investigations Report, 84-4369, 1984.
- /VOS 99/ VOSS, C. I., Provost, A.M., Release Notes for SUTRA Version 2D3D.1beta, USGS, 1999, unveröffentlicht.



# I 2D Modellierung von Strömung und Schadstofftransport

A. Schneider<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH

## I.1 Einleitung

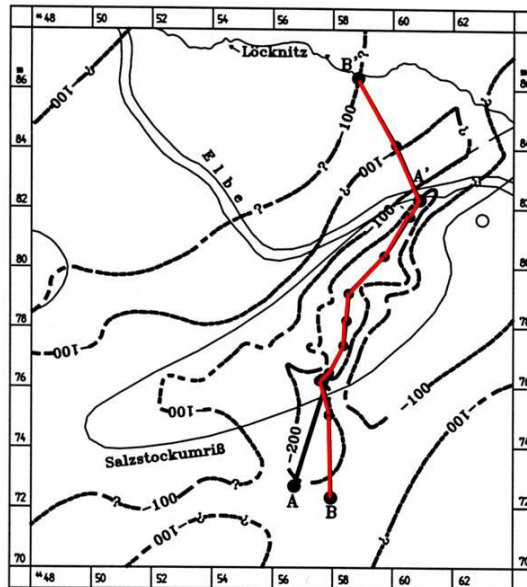
In Langzeitsicherheitsanalysen für Endlager für Radioaktive Abfälle werden Modelle für das Nahfeld, das Fernfeld und die Biosphäre unterschieden. Die im Rahmen dieses Workshops betrachteten Gegebenheiten und Prozesse ordnen sich in die Untersuchung des Fernfeldes eines Endlagers im Salinar ein. Das bisher in Langzeitsicherheitsanalysen für den Schadstofftransport im Fernfeld benutzte Instrumentarium geht von einem eindimensionalen Modell aus. Diesem Modell liegen Berechnungen zugrunde, in denen das Deckgebirge als weitgehend homogen betrachtet wird und deren Ergebnis ein bevorzugter Transportweg ist, der dann in dem eindimensionalen Modell für die Ermittlung der Transportzeiten aller Nuklide zugrunde gelegt wird.

Die hier vorgestellten Modellrechnungen wurden im Rahmen des vom BMWA geförderten Projektes „Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen“ durchgeführt /KES 05/. Mit Hilfe mehrdimensionaler Modelle sollte gezeigt werden, dass sich im Falle heterogener Deckgebirge für verschiedene Nuklide in Abhängigkeit von ihrem Sorptionsverhalten unterschiedliche bevorzugte Transportwege herausbilden können. Die sich auf Basis dieser Transportwege ergebenden Transportzeiten können deutlich von den mit Hilfe der herkömmlichen Modelle ermittelten abweichen.

Der Transport der Radionuklide wird zweidimensional in einem realitätsnahen Gebiet modelliert. Dem hydrogeologischen Modell liegen Untersuchungen des Deckgebirges des Salzstockes Gorleben durch die BGR zugrunde /SCH 91/, /SCH 95/. Das Strömungsfeld wird mit dem Computercode d<sup>3</sup>f /FEI 99/ berechnet. Dabei wird der Salzgehalt, der die Grundwasserbewegung beeinflusst, berücksichtigt. Die Migration der Radionuklide wird mit dem Computercode r<sup>3</sup>t /FEI 04/ bestimmt. Die Rückhaltung wird in Form von Henry-Isothermen berücksichtigt.

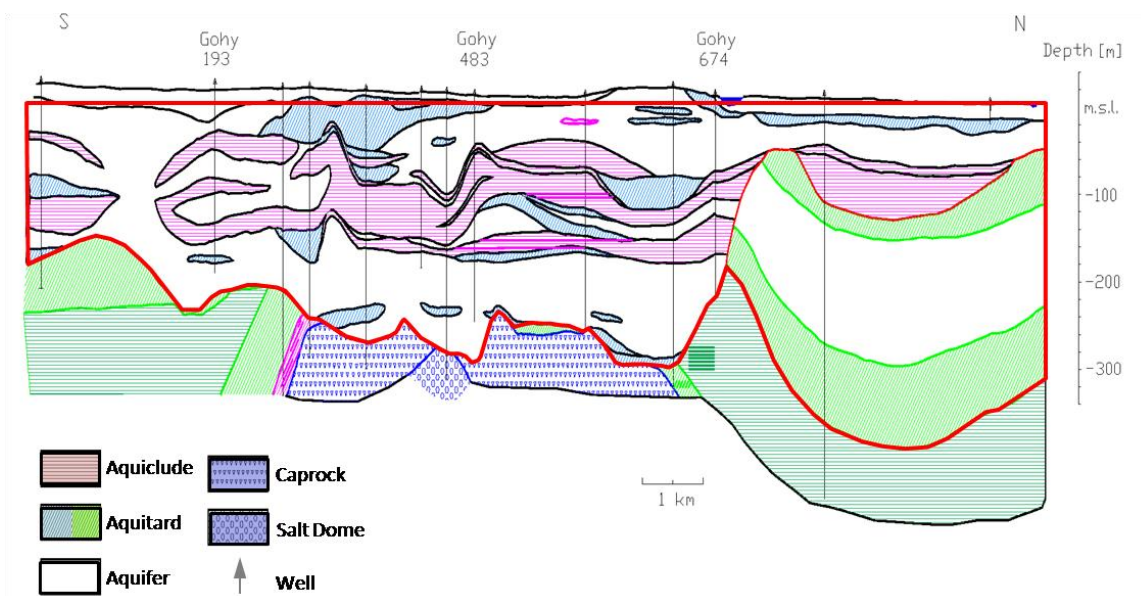
## I.2 Das hydrogeologische Modell

Der Salzstock Gorleben liegt im Nordosten von Niedersachsen. Er erstreckt sich über eine Länge von ungefähr 14 km und ist bis zu 4 km breit. Die Lage des Salzstockes und des im Folgenden betrachteten hydrogeologische Schnittes durch das Deckgebirge sind in Abb. I. 2.1 dargestellt.



**Abb. I. 2.1** Isolinien der Quartärbasis (100 m und 200 m u. NN), Lage des Salzstockes und des Profilschnittes, /SCH 95/

Über dem Salzstock bilden tertiäre und quartäre Sedimente ein bis zu 300 m mächtiges Aquifersystem. Der untere Aquifer wird durch tertiäre Braunkohlesande oder durch Elsterzeitliche sandig-kiesige Ablagerungen in subglazialen Erosionsrinnen gebildet. Eine dieser Rinnen ist 1 bis 2 km breit, mehr als 10 km lang und quert den Salzstock in Nord-Süd-Richtung. Sie reicht über dem Salzstock bis in eine Tiefe von 275 m u. NN auf den Gipshut, lokal auch bis auf das Salz hinunter.

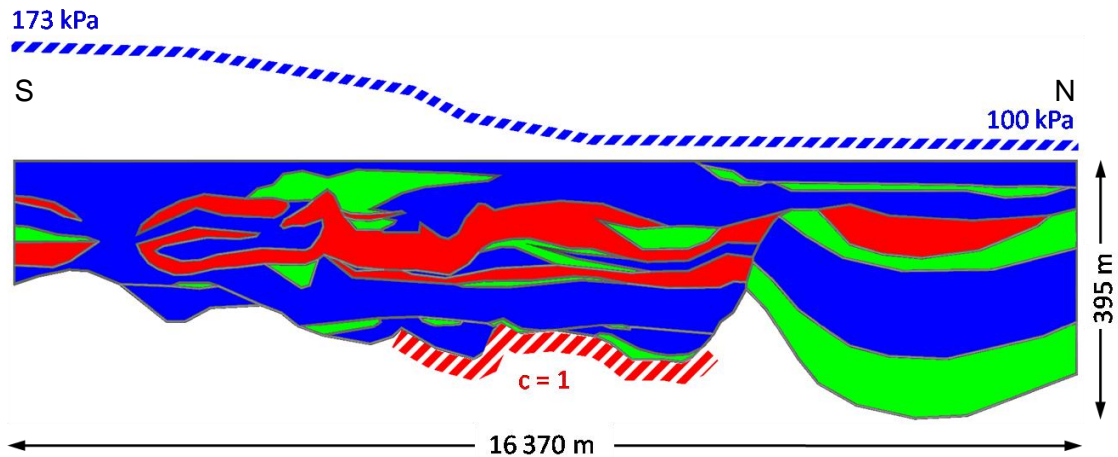


**Abb. I. 2.2** Hydrogeologischer Schnitt durch das Modellgebiet (überhöht) nach /SCH 95/

Quartäre und tertiäre Sand- und Kiessedimente mit eingelagerten Linsen aus Ton und Schluff bilden zwei Aquifere, deren unterer durch einen Tonkomplex zumindest im Bereich des Salzstockes fast völlig überdeckt wird. Abb. I. 2.2 zeigt den Querschnitt des modellierten Gebietes. Der in das Modell übernommene Teil ist hier rot umrandet.

Im gesamten Untersuchungsgebiet ist der untere Aquifer größtenteils versalzen. Die Dichte des Wassers, die an Wasserproben aus Grundwassermessstellen bestimmt wurde, nimmt mit der Tiefe zu. Dabei steigt die Dichte zwischen 170 und 200 m u. NN von 1 020 bis auf 1 170 kg/m<sup>3</sup> an. In Tiefen unter 200 m u. NN nimmt die Dichte allmählich bis zur Sättigung zu.

Der in Abb. I. 2.2 dargestellte hydrogeologische Schnitt wurde in ein zweidimensionales Modellgebiet der Länge 16 370 m und einer maximalen vertikalen Ausdehnung von 395 m umgesetzt. In Abb. I. 2.3 ist das für die hier durchgeführten Rechnungen benutzte vereinfachte Modell dargestellt, in dem die drei hydrogeologischen Einheiten Aquifer, Aquiclude und Aquitard unterschieden werden.



**Abb. I. 2.3** Modellaufbau, 10-fach überhöht

Aquifere sind blau, Aquicluden rot und Aquitarde grün dargestellt. Für die drei hydrogeologischen Einheiten werden im Modell jeweils konstante Permeabilitäten verwendet. Am oberen Rand des Modellgebietes ist der Verlauf der Standrohrspiegelhöhen angegeben. Sie fallen von Süden nach Norden von 173 kPa auf 100 kPa ab. Am unteren Rand ist rot-weiß schraffiert der Kontakt zum Salzstock dargestellt.

Die verwendeten hydrogeologischen Parameter sind in Tab. I. 2.1 zusammengefasst. Grundwasserstauer (Aquicluden), Grundwasserhemmer (Aquitarde) und Grundwasserleiter (Aquifere) unterscheiden sich in diesem Modell nur in ihren Permeabilitäten. Porosität, Diffusionskonstante und Dispersionslängen wurden für alle Formationen gleich gewählt.

**Tab. I. 2.1** Hydrogeologische Parameter für das Modellgebiet

	Aquifer	Aquitarde	Aquicluden
Permeabilität [m <sup>2</sup> ]	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$1,0 \cdot 10^{-16}$
Porosität [-]	0,2		
Diffusionskonstante [m <sup>2</sup> /s]	$1,0 \cdot 10^{-9}$		
longitudinale Dispersionslänge [m]	100,0		
transversale Dispersionslänge [m]	1,0		

Am Kontakt zum Salzstock entstehen hochsaline Wässer. Dies wird mit Hilfe einer Dirichlet-Randbedingung für die relative Konzentration  $c$  realisiert.  $c = 1$  entspricht da-

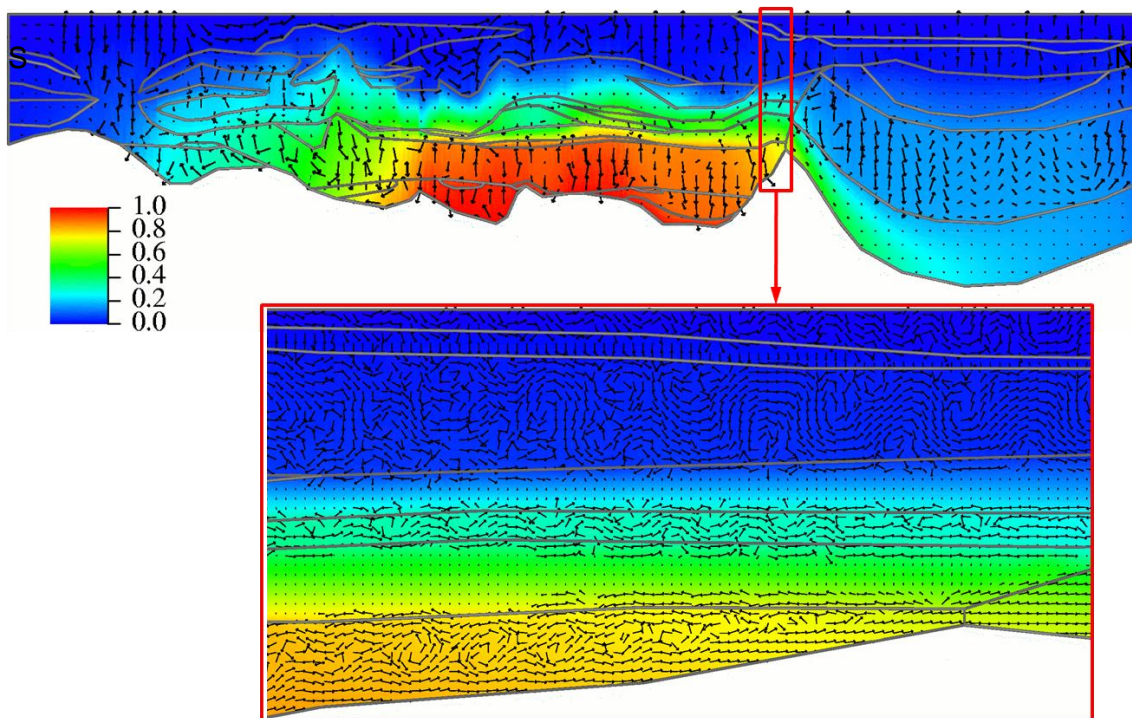


bei gesättigter Lauge mit einer absoluten Konzentration von  $c_{\text{abs}} = 360 \text{ kg/m}^3$ . Dementsprechend erhält die Modelloberfläche die Randbedingung  $c = 0$ . An der Modelloberfläche wird zeitunabhängig der Druckverlauf, der dem Standrohrspiegelhöhenverlauf in Abb. I. 2.3 entspricht, angegeben. Alle übrigen Modellränder sind undurchlässig für die Strömung. Als Anfangsbedingung wurde angenommen, dass das gesamte Modellgebiet mit Frischwasser gefüllt ist.

Die Simulationen wurden mit einem linearen Zusammenhang zwischen Dichte und Konzentration und dem Potenzreihenansatz für die Viskositäts-Konzentrationsbeziehung durchgeführt. Dabei variiert die Fluidichte zwischen  $998,2 \text{ kg/m}^3$  und  $1\,197,2 \text{ kg/m}^3$ , während sich die dynamische Viskosität zwischen  $1,002 \cdot 10^3 \text{ kg/m s}$  und  $1,99 \cdot 10^3 \text{ kg/m s}$  ändert.

### I.3 Das Strömungsfeld

In Abb. I. 3.1 sind die relative Salzkonzentration und die Darcy-Geschwindigkeiten als Ergebnisse der Modellrechnung mit  $d^{\text{3f}}$  nach 250 000 Jahren im quasistationären Zustand dargestellt. Da das Rechengitter für eine elementweise Darstellung der Geschwindigkeit zu fein ist, werden hier die über ein regelmäßiges Rechteckgitter gemittelten Geschwindigkeiten wiedergegeben. Die Beträge sind zusätzlich mit dem Faktor 1 000 skaliert und die Vektorpfeile so abgeschnitten, dass sie sich nicht schneiden können. Beachtet man noch, dass die obere Abbildung 10-fach überhöht ist, so erkennt man eine im Wesentlichen flache Horizontalströmung von links nach rechts, d. h. von Süd nach Nord. Im quasistationären Zustand hat sich das Salz diffusiv über den gesamten mittleren Teil des Aquicludes ausgebreitet. Im oberen Aquifer dagegen treten aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten nur sehr geringe Salzkonzentrationen auf.

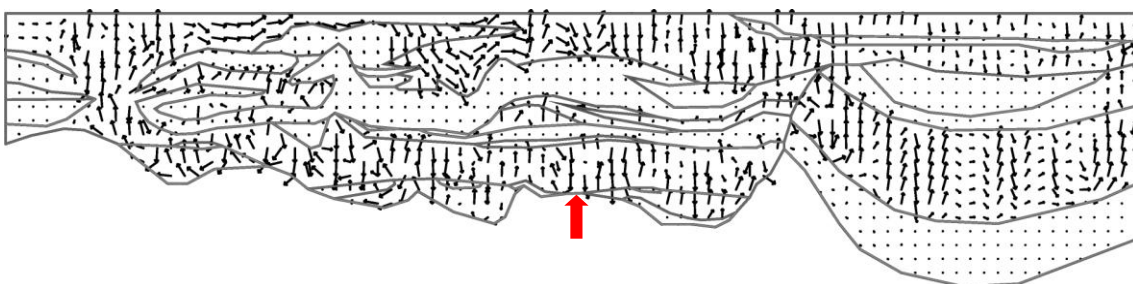


**Abb. I. 3.1** Konzentrations- und Geschwindigkeitsfeld nach 250 000 Jahren  
(oben: 10-fach überhöht, unten: Ausschnitt, ohne Überhöhung)

Das untere Bild von Abb. I. 3.1 zeigt einen Ausschnitt des Strömungsfeldes und gibt somit einen Eindruck von der bevorzugten Strömungsrichtung und von den kleinräumigen Wirbeln, die sich in dichtegetriebenen Strömungen herausbilden.

#### I.4 Der Radionuklidtransport

Basierend auf dem stationären Strömungsfeld, wurde der Radionuklidtransport mit dem Rechenprogramm  $r^3t$  modelliert. Dabei wurde der Austritt der Radionuklide aus dem Salzstock in Form einer Punktquelle modelliert (s. Abb. I. 4.1).



**Abb. I. 4.1** Geschwindigkeitsfeld und Ort des Radionuklid-Einstroms

Die hydrogeologischen Parameter für den Nuklidtransport sind in Tab. I. 4.1 zusammengefasst. Da sich die Porosität auf den Transport stärker auswirkt, wurden hier für sandige, schluffige und tonige Bereiche unterschiedliche Werte verwendet.

**Tab. I. 4.1** Transportparameter für Sand, Schluff und Ton

	Sand (Aquifer)	Schluff (Aquitard)	Ton (Aquiclude)
Gesteinsdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2 500		
Porosität [-]	0,3	0,2	0,1
Diffusionskonstante [m <sup>2</sup> /s]	1,0·10 <sup>-9</sup>		
longitudinale Dispersionslänge [m]	100,0		
transversale Dispersionslänge [m]	1,0		

Der angenommenen Punktquelle liegen die in /KES 05/ für den Referenzfall eines Endlagers im Salz berechneten Freisetzungsraten von Radionukliden aus dem Nahfeld zugrunde. Dabei wird vorausgesetzt, dass Kokillen vom Typ BSK3 eingelagert sind, die jeweils die Brennstäbe dreier Brennelemente (UO<sub>2</sub>- und MOX-Brennstoff) enthalten. Das Gesamtinventar der in der Bundesrepublik Deutschland voraussichtlich anfallenden Abfälle wird als gleichmäßig auf alle 5 390 eingelagerten Behälter verteilt angenommen. Es wird von einer Abklingzeit von 40 Jahren ausgegangen /BUH 91/, /ENG 00/.

Das Nahfeldmodell umfasst die Mobilisierung der Radionuklide, die Laugenbewegung und den Nuklidtransport im Grubengebäude und wurde mit Hilfe des Moduls LOPOS des Programmpakets EMOS /HIS 99/ realisiert. Das Referenzszenario geht von einem Laugenzutritt aus Einschlüssen sofort nach Ende der Betriebsphase des Endlagers und von einem Laugenzutritt aus dem Deckgebirge 100 Jahre danach aus. Es wird eine Behälterstandzeit von 500 Jahren nach Laugenkontakt vorausgesetzt. Alle Verschlüsse und Abdichtungen bleiben intakt und stellen Strömungswiderstände dar /KES 05/.

Im Fernfeldmodell werden solche Radionuklide berücksichtigt, die aufgrund ihrer Freisetzungsraten aus dem Nahfeld und ihrer Halbwertszeiten eine Rolle spielen können. Die in der Transportrechnung berücksichtigten Radionuklide und ihre Halbwertszeiten sind in Tab. I. 4.2 aufgelistet.

**Tab. I. 4.2** Die berücksichtigten Radionuklide und ihre Halbwertszeiten [a]

Spalt- produkte	Aktivierungs- produkte	Thorium- Zerfallsreihe (4N)	Neptunium- Zerfallsreihe (4N+1)	Uran- Zerfallsreihe (4N+2)	Americium- Zerfallsreihe (4N+3)
Se-79 $1,100 \cdot 10^6$	C-14 $5,730 \cdot 10^3$	Pu-240 $6,563 \cdot 10^3$	Cm-245 $8,500 \cdot 10^3$	Pu-242 $3,750 \cdot 10^5$	Am-243 $7,370 \cdot 10^3$
Zr-93 $1,500 \cdot 10^6$	Cl-36 $3,000 \cdot 10^5$	U-236 $2,342 \cdot 10^7$	Pu-241 $1,435 \cdot 10^1$	U-238 $4,468 \cdot 10^9$	Pu-239 $2,411 \cdot 10^4$
Mo-93 $3,500 \cdot 10^3$	Ni-59 $7,500 \cdot 10^4$	Th-232 $1,405 \cdot 10^{10}$	Am-241 $4,322 \cdot 10^2$	U-234 $2,455 \cdot 10^5$	U-235 $7,038 \cdot 10^8$
Tc-99 $2,100 \cdot 10^5$			Np-237 $2,144 \cdot 10^6$	Th-230 $7,540 \cdot 10^4$	Pa-231 $3,276 \cdot 10^4$
Sn-126 $2,345 \cdot 10^5$			U-233 $1,592 \cdot 10^5$	Ra-226 $1,600 \cdot 10^3$	
I-129 $1,570 \cdot 10^7$			Th-229 $7,880 \cdot 10^3$		
Cs-135 $2,000 \cdot 10^6$					

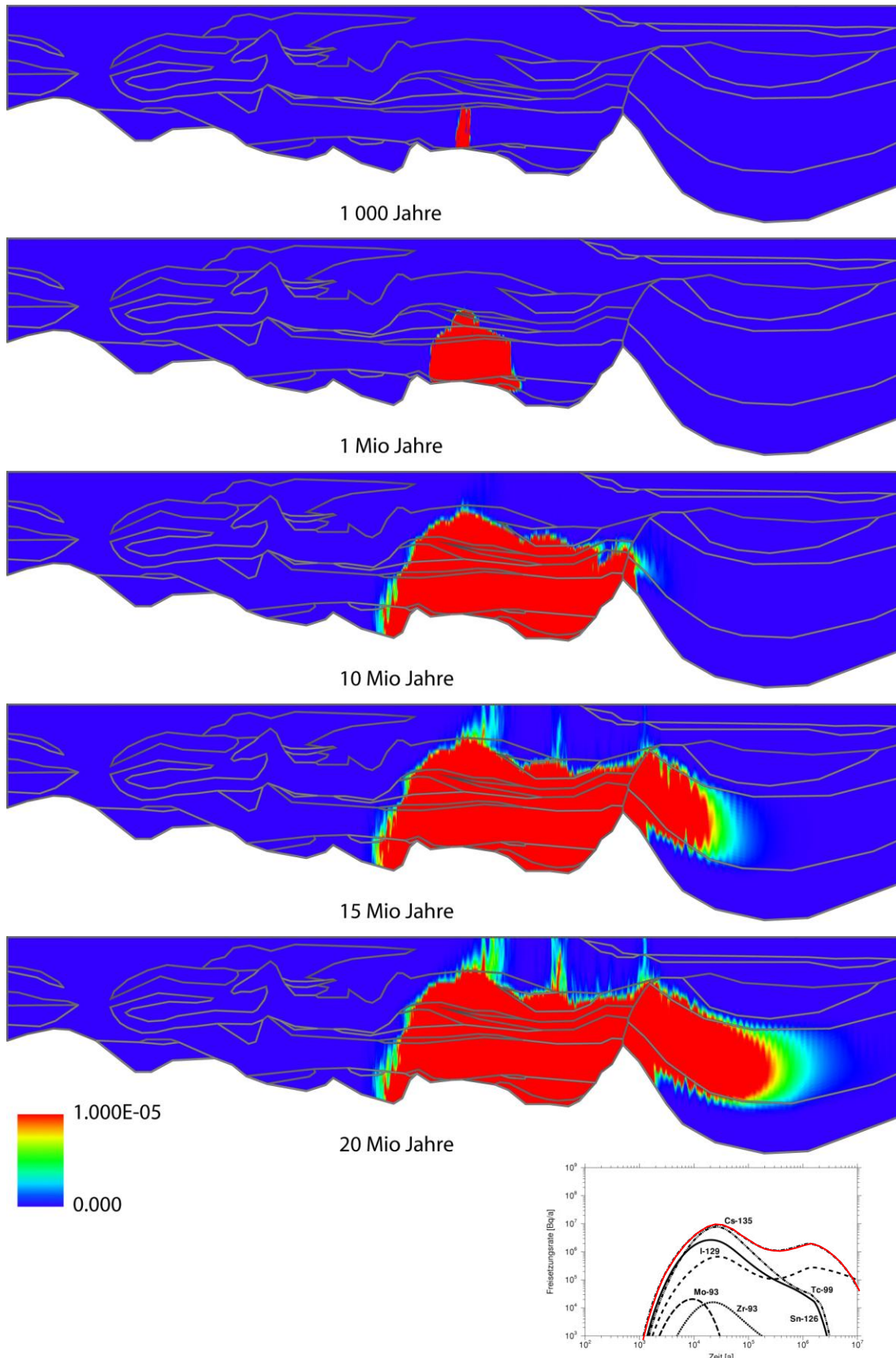
Die Daten zur Rückhaltung sind in Tab. I. 4.3 dargestellt. Die Rückhaltung wurde über eine lineare Gleichgewichtssorption berücksichtigt. Hinsichtlich der Sorption wurde entsprechend der von Suter vorgeschlagenen Werte zwischen Sand und Ton bzw. Schluff unterschieden /SUT 98/. Der Einfluss der Salinität auf die Sorption wurde in diesen Rechnungen nicht berücksichtigt.

**Tab. I. 4.3**  $K_d$ -Werte der betrachteten Elemente in  $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$  /SUT 98/

Element	Sand	Schluff, Ton	Element	Sand	Schluff, Ton
C	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,002	Cs	0,07	0,4
Cl	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Ra	0,04	0,3
Ni	0,02	0,3	Th	0,2	2,0
Se	0,001	0,001	Pa	0,6	60,0
Zr	0,04	0,1	U	0,002	0,08
Mo	0,001	0,001	Np	0,01	0,3
Tc	0,001	0,006	Pu	0,1	3,0
Sn	0,04	0,1	Am	0,1	20,0
I	0,002	0,002	Cm	0,1	20,0

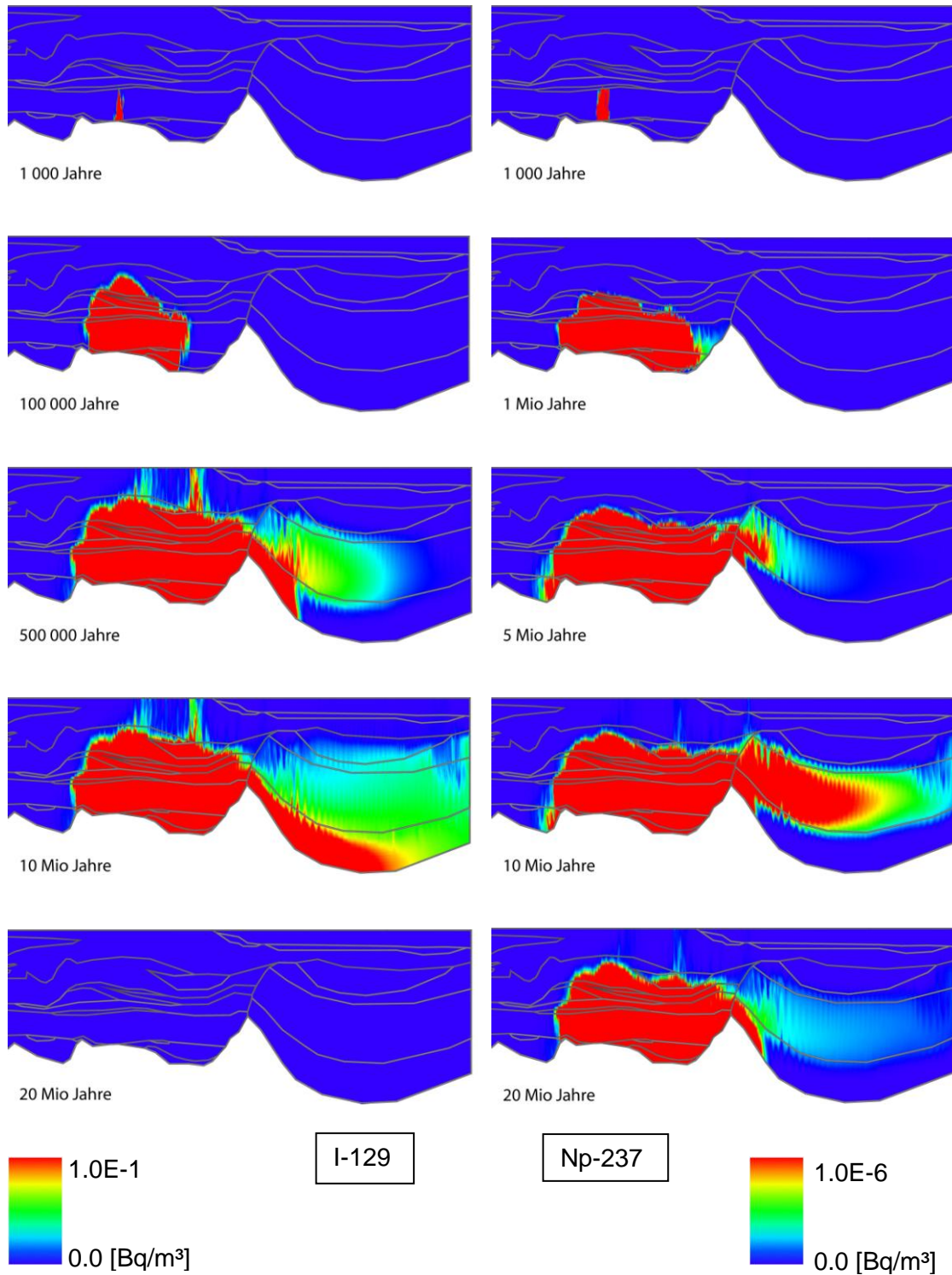
Im Folgenden werden Ergebnisse der Rechnungen exemplarisch anhand der Konzentrationsausbreitung einzelner Radionuklide dargestellt. Sowohl der Strömungs- als auch der Transportmodellierung lagen Dreiecksgitter zugrunde. Die in den Abbildungen teilweise sichtbare Fransenstruktur ist hierbei der zehnfachen Überhöhung in der Darstellung geschuldet.

In Abb. I. 4.2 sind Konzentrationsprofile von Cs-135 zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Der Einstrom erfolgt in einen Aquiferbereich (vgl. Abb. I. 4.1). Nach 1 000 Jahren hat sich die Schadstofffahne entsprechend den Strömungsvektoren vertikal bis zum Erreichen eines Bereichs mit Aquitarden bzw. Aquicluden ausgebreitet. Von diesem Zeitpunkt an erfolgt die Ausbreitung vorwiegend horizontal innerhalb des Aquifers. Die vertikale Ausbreitung wird aufgrund der geringeren Darcy-Geschwindigkeiten in Schluff und Ton und der für Cs-135 erhöhten Sorption verlangsamt. Nach 15 Mio. Jahren wird dann im rechten Teil des Modellgebiets ein weiterer Aquiferbereich erreicht, in dem die Ausbreitung deutlich schneller erfolgt als im darunterliegenden Aquitard, in dem das Nuklid ebenfalls einer erhöhten Sorption unterliegt.





Das Ausbreitungsverhalten der Radionuklide wird stark von deren Sorptionseigenschaften beeinflusst. In Abb. I. 4.3 ist das Ausbreitungsverhalten von I-129 und Np-237 dargestellt. Für diese Abbildungen wurde nur der rechte Teil des Modellgebiets dargestellt, da die Ausbreitung in diese Richtung erfolgt.



**Abb. I. 4.3** Konzentrationsprofile von I-129 (links) und Np-237 (rechts) zu ausgewählten Zeitpunkten

Die Sorptionswerte von I-129 sind mit  $0,002 \text{ m}^3/\text{kg}$  sowohl für Sand als auch für Schluff und Ton gering. Np-237 weist im Sand mit  $0,01 \text{ m}^3/\text{kg}$  einen mittleren und im Ton mit  $0,3 \text{ m}^3/\text{kg}$  einen hohen Sorptionswert auf.

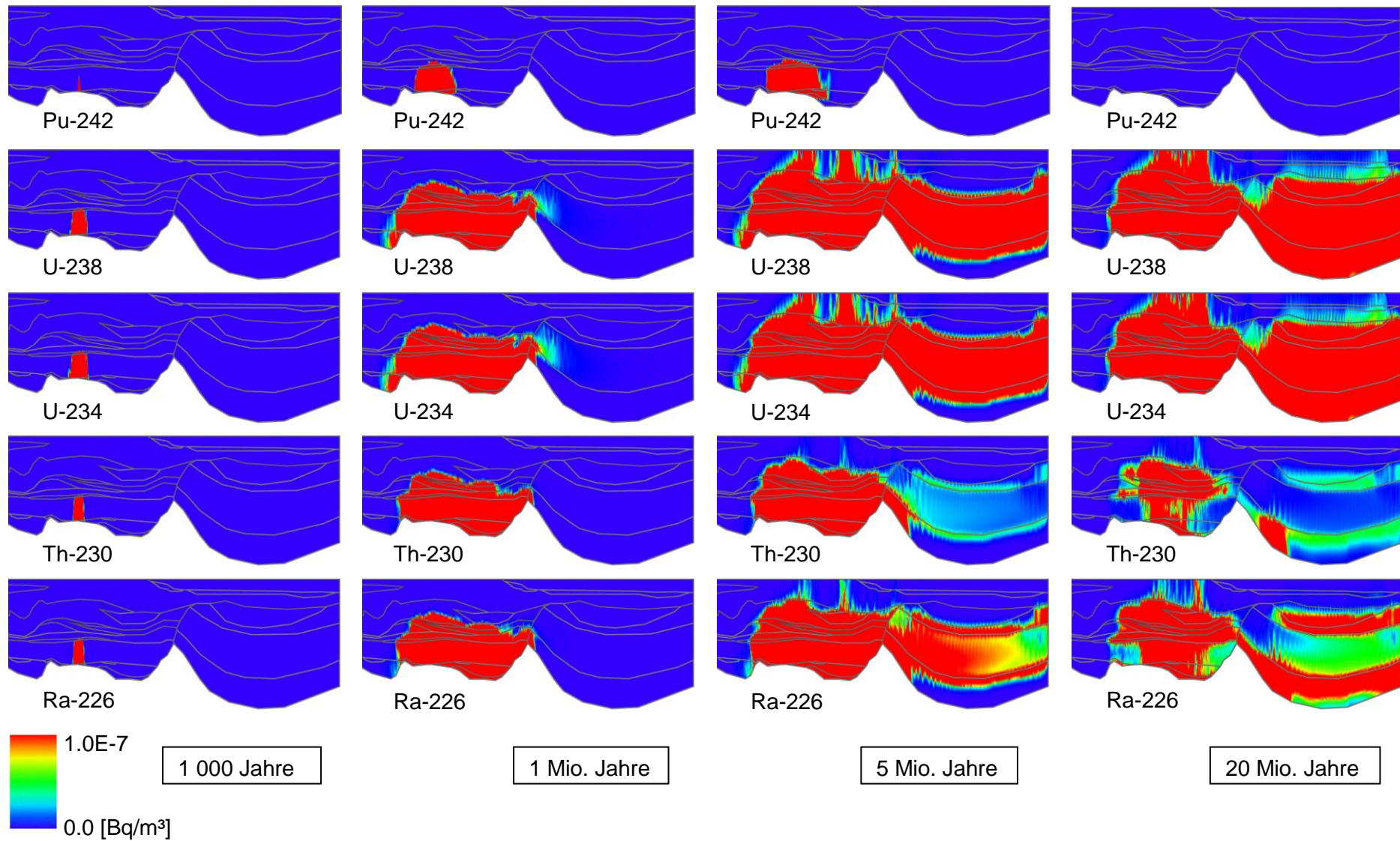
Anhand der dargestellten Zeitpunkte ist zu erkennen, dass die Ausbreitung von I-129 aufgrund seines geringen Sorptionswerts deutlich schneller erfolgt. Da sich die Sorptionswerte von Iod in wasserleitenden, -hemmenden und -stauenden Bereichen nicht unterscheiden, erfolgt seine Ausbreitung zu einem gewissen Anteil auch vertikal durch die Aquiclude- und Aquitardbereiche. Dieser Transportweg ist bei Np-237 durch seinen hohen Sorptionswert in Schluff und Ton dagegen von untergeordneter Bedeutung.

Noch deutlicher zeigt sich der Effekt der unterschiedlichen Sorptionseigenschaften zu späteren Zeitpunkten bei der Ausbreitung im rechten Teil des Modellgebiets. Für I-129 erfolgt die Hauptausbreitung nach einigen Hunderttausend Jahren horizontal durch die unterste Schicht, einen Aquitard. Im Gegensatz dazu ist der Transport von Np-237 in dieser Schicht wegen des hohen Sorptionswerts stark verzögert, und die Ausbreitung erfolgt hauptsächlich im darüber liegenden Aquifer. Für Np-237 sind nach 20 Mio. Jahren die Auswirkungen des radioaktiven Zerfalls zu erkennen. Dies führt dazu, dass die Konzentration im Aquifer im rechten Teil des Modellgebiets schon deutlich abgenommen hat. Für Iod spielt der radioaktive Zerfall aufgrund seiner Halbwertszeit von 15,7 Mio. Jahren noch keine Rolle. Allerdings ist aufgrund seiner geringen Rückhaltung die Konzentration von I-129 nach 20 Mio. Jahren im gesamten Modellgebiet deutlich unter  $10^{-1} \text{ Bq/m}^3$  abgesunken.

Weitere Effekte können am Verhalten von Radionukliden der Zerfallsreihen illustriert werden. Exemplarisch ist in Abb. I. 4.4 das Verhalten von fünf Nukliden der Uranzerfallsreihe zu vier ausgewählten Zeitpunkten dargestellt. Das Mutternuklid Pu-242 dringt aufgrund seines hohen Sorptionswerts von  $0,1 \text{ m}^3/\text{kg}$  in Sand bzw.  $3,0 \text{ m}^3/\text{kg}$  in Schluff und Ton nur langsam in die Sedimentschichten vor. Nach einigen Mio. Jahren bewirkt der Zerfall entsprechend der Halbwertszeit von  $3,75 \cdot 10^5$  Jahren bereits eine signifikante Abnahme der Konzentration.

Aufgrund ihres geringeren Sorptionswerts breiten sich U-238 und U-234 schneller als Pu-242 aus. Das Tochternuklid U-234 befindet sich dabei im radioaktiven Gleichgewicht mit U-238, entsprechend zeigen die Konzentrationsprofile den gleichen Verlauf.





**Abb. I. 4.4** Konzentrationsprofile von Radionukliden der Uranzerfallsreihe, jeweils nach 1 000, 1 Mio., 5 Mio und 20 Mio Jahren

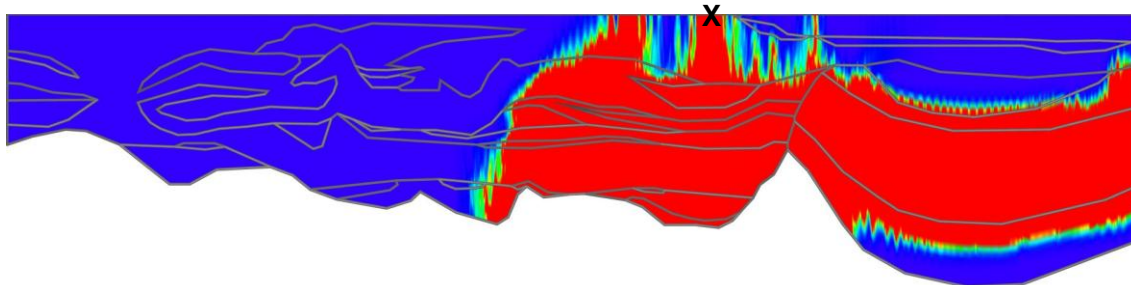
Die Sorptionswerte für Thorium sind denen von Plutonium sehr ähnlich, d. h. der Transport von Th-230 sollte entsprechend langsam erfolgen. Die Schadstoffwolke des Th-230 breitet sich aber schneller aus, wie die Bilder nach 1 Mio. Jahren zeigen. Die Schadstoffwolke wird demnach nicht allein durch den Transport von Th-230, sondern zusätzlich durch den Zerfall des Mutternuklids U-234 gebildet. In dieser Abbildung ist gut zu erkennen, dass in dem Aquiferbereich am rechten Rand des Modellgebiets (zweite Schicht von unten) nach 5 Mio. Jahren die mobile Konzentration von Th-230 aufgrund seines höheren Sorptionswerts deutlich niedriger liegt als die mobile Konzentration des Mutternuklids U-234. Beide Radionuklide befinden sich im radioaktiven Gleichgewicht, für Th-230 liegt aber ein viel größerer Anteil in der sorbierten Phase vor. Der Sorptionswert von Radon liegt mit  $0,04 \text{ m}^3/\text{kg}$  über dem des Urans und unter dem des Thoriums. Entsprechend liegt auch die mobile Konzentration von Ra-226, das sich ebenfalls im radioaktiven Gleichgewicht mit dem Mutternuklid befindet, höher als die von Th-230 und niedriger als die von U-234.

Die über dem Aquifer liegenden Schluff- bzw. Tonschichten am rechten Rand des Modellgebiets bilden eine effiziente Barriere, so dass auch nach 20 Mio Jahren die Schadstoffwolke (am besten für U-238 und U-234 zu erkennen) erst diffusiv in diese Schichten eingedrungen ist und die Konzentration im darüber liegenden Aquifer immer noch deutlich niedriger ist als im darunterliegenden Aquifer.

Die Ergebnisse der zweidimensionalen Transportmodellierung sollen nun mit den in /KES 05/ mit Hilfe eines eindimensionalen Fernfeldmodelles ermittelten verglichen werden. Das mathematische Modell zur Beschreibung des eindimensionalen Fernfeldtransportes ist ausführlich in /KUE 96/ erläutert, das verwendete Biosphärenmodell in /LUE 00/.

An einem Punkt im oberflächennahen Aquifer, in dem vergleichsweise hohe Konzentrationen auftreten, wurden Durchbruchkurven der Radionuklide abgegriffen. Die Lage dieses Punktes ist in Abb. I. 4.5 dargestellt. Aus den Durchbruchkurven wurden dann die maximalen Radionuklidkonzentrationen und Zeitpunkte, zu denen sie auftreten, bestimmt. Außerdem wurden aus den maximalen Konzentrationen im oberflächennahen Aquifer mit Hilfe der Dosiskonversionsfaktoren (siehe /KES 05/, /PRO 02/) maximale Strahlenexpositionen berechnet. Für einige Nuklide wurden zusätzlich aus dem Quotienten der maximalen Konzentration im Bereich der Einstromquelle und der maximalen Konzentration im oberflächennahen Aquifer Verdünnungsfaktoren berechnet. Diese

Werte sind im Vergleich mit den in /KES 05/ mit Hilfe des eindimensionalen Transportmodells ermittelten Ergebnissen in Tab. I. 4.4 dargestellt.



**Abb. I. 4.5** X: Ort, an dem maximale Radionuklidkonzentrationen ermittelt wurden

Es zeigt sich, dass die Radionuklide Cl-36, Se-79 und I-129 mit niedrigen Sorptionswerten die niedrigsten Verdünnungsfaktoren in der Größenordnung von  $10^5$  bis  $10^6$  aufweisen. Die durch diese Radionuklide bewirkten Strahlenexpositionen liegen in einer vergleichbaren Größenordnung, wie die bei Verwendung des eindimensionalen Transportmodells berechneten. Für Radionuklide mit höheren Sorptionswerten liegen die mit dem zweidimensionalen Modell berechneten Strahlenexpositionen zum Teil sehr viel niedriger.

**Tab. I. 4.4** Maximale Konzentrationen, Zeitpunkte ihres Auftretens, maximale Strahlenexposition und Verdünnungsfaktoren ausgewählter Radionuklide

Radio-nuklid	Zeitpunkt des Auftretens der max. Konzentration [a]		max. Konzentration [Bq/m <sup>3</sup> ]	max. Strahlenexposition [Sv/a]		Verdünnungsfaktor
	1d Modell	2d Modell		2d Modell	1d Modell	
Cl-36	$3,5 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^6$
Se-79	$2,3 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^5$
I-129	$3,0 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^6$
Cs-135	$4,5 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$7,2 \cdot 10^{11}$
U-234	$5,5 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$7,6 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^9$
Ra-226	$1,0 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-12}$	
Np-237	$4,5 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	$3,5 \cdot 10^{11}$
U-233	$3,0 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^7$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$3,1 \cdot 10^{-12}$	

Es ist allerdings anzumerken, dass die im eindimensionalen Transportmodell verwendeten Sorptionswerte aus früheren Studien stammen und für die zweidimensionalen Modellrechnungen Sorptionswerte aus neueren Arbeiten verwendet wurden. Es war auch nicht Ziel dieser Studie, diese Rechnungen direkt zu vergleichen. Vielmehr sollte aufgezeigt werden, welche Effekte beim Radionuklidtransport in großräumigen heterogenen Modellgebieten auftreten und inwieweit diese durch Rückhalteeigenschaften der Radionuklide beeinflusst werden.

Weiterhin sollte an diesem Beispiel die Vorgehensweise bei einem zukünftigen Safety Case demonstriert werden. Für die Ausbreitung im Fernfeld ist es wichtig, zuerst eine zwei- bzw. dreidimensionale Ausbreitungsrechnung für alle Radionuklide durchzuführen. Dabei ist zu überprüfen, ob für alle Radionuklide der gleiche Ausbreitungsweg relevant ist, oder ob sich Ausbreitungswege einzelner Radionuklide in Abhängigkeit der Sorptionseigenschaften unterscheiden. Ebenso wichtig ist es, die Schnittstelle zwischen Fernfeld und Biosphäre festzulegen. Es ist durchaus möglich, dass die Radionuklidkonzentrationen einzelner Nuklide an unterschiedlichen Bereichen oberflächennaher Aquifere ihre größten Konzentrationen aufweisen. Erst nach Klärung dieser Fragestellungen ist die Abstraktion und Erstellung eines eindimensionalen Transportmodells möglich.

## **I.5 Literaturverzeichnis**

- /BUH 91/ Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R., Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle, GSF-Bericht 27/91. GSF -Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig, 1991.
- /DBE-98/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern mbH, Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben", Abschlussbericht. Peine, März 1998.

- /ENG 00/ Engelmann, H.-J.; Krone, J.; Biurrun, E.; Weh R.; Heni, W., The role of the technical repository concept from repository siting and implications of advanced spent fuel management concept - part I and II; in A. Roth (Hrsg.): DisTec 2000, International Conference on Radioactive Waste and Disposal, Sept. 6-6 2000, Konferenzbericht, 2000.
- /FEI 99/ Fein, E.; Schneider, A. (eds.), d3f - Ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-139, Braunschweig, Dezember 1999.
- /FEI 04/ Fein, E. (ed.), Software Package r3t. Model for Transport and Retention in Porous Media, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-192, Braunschweig, April 2004.
- /HIS 99/ Hirsekorn, R.-P.; Boese, B.; Buhmann, D., LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-157, Braunschweig 1999.
- /KES 05/ Keesmann, S., Noseck, U., Buhmann, D., Fein, E., Schneider, A., Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH GRS 206, Braunschweig, Juli 2005.
- /KUE 96/ Kühle, T., Zude, F., Lührmann, L., Das eindimensionale Transportprogramm CHET1 unter Berücksichtigung der Sorption nach dem Kd-Konzept. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-124, Braunschweig 1996.
- /LUE 00/ Lührmann, L., Noseck, U., Storck, R., Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Braunschweig 2000.

- /PRO 02/ Pröhl, G.; Gering, F., Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zu §47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg, 2002.
- /SCH 91/ Schelkes, K., Grundwassermodelle mit variabler Wasserdichte - Validierung von Laborexperimenten und Modellrechnungen zur Tiefenwasserbewegung in Norddeutschland, Abschlussbericht zum BMFT-Vorhaben KWA 58020. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1991.
- /SCH 95/ Schelkes, K.: Modelluntersuchungen zur Bewegung des Grundwassers bei vom Salzgehalt abhängiger Wasserdichte - Fallstudien und Modellvalidierung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 02 E 8301. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1995.
- /SUT 98/ Suter, D.; Biehler, D.; Blaser, P.; Hollmann, A.: Derivation of a Sorption Data Set for the Gorleben Overburden. Proc. DisTec '98 International Conference on Radioactive Waste Disposal, S. 581-584, Hamburg, September 9-11, 1998.

## **J Modellierung der Grundwasserbewegung in der Umgebung eines Salzstocks – Arbeiten des BfS**

J. Wollrath<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

### **J.1 Einleitung**

Die Modellierung der Grundwasserbewegung in der Umgebung eines Salzstocks ist vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Hinblick auf die Eignung des Salzstocks Gorleben als Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle durchgeführt worden. Sie sollte die Durchführung von Sicherheitsanalysen unterstützen, indem sie das Verständnis der Grundwasserhydraulik fördert und weil sie als Voraussetzung für die Modellierung eines Radionuklidtransports im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben notwendig ist.

Auf der Grundlage des in /BGR 94/ dokumentierten hydrogeologischen Strukturmodells für das Deckgebirge in der Umgebung des Salzstocks Gorleben wurden deshalb im Auftrag des BfS von der Fa. Colenco Power Consulting AG bzw. Colenco Power Engineering AG, Baden/CH (heute: AF-Colenco AG) zwischen 1995 und 1999 Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung durchgeführt.

Die Arbeiten der Fa. Colenco gliedern sich in die Aufgabenschwerpunkte:

- dreidimensionale Modellierung der Grundwasserbewegung ohne Berücksichtigung der Versalzung des tieferen Grundwassers zur Ermittlung der großräumigen Grundwasserbewegung in dem von der BGR behandelten Gebiet,
- zweidimensionale Modellierung der Grundwasserbewegung entlang von vereinfachten Vertikalschnitte durch die Gorlebener Rinne mit Berücksichtigung der Versalzung des Grundwassers zur Qualifizierung des für die dreidimensionalen Modellrechnungen eingesetzten Rechenprogramms und
- dreidimensionale Modellierung der Grundwasserbewegung in Teilgebieten mit Berücksichtigung der Versalzung des Grundwassers zur Darstellung des Einflusses der Versalzung auf die Grundwasserbewegung.

Für das großräumige dreidimensionale Rechenmodell konnte das von der BGR erarbeitete hydrogeologische Strukturmodell, das in Form von Rasterdaten auf einem 100 m · 100 m-Raster 34 verschiedene hydrogeologische Einheiten definiert, mit Hilfe eines automatisierten Verfahrens 1:1 in das dem Rechenmodell der Fa. Colenco zugrundeliegende Gitternetz übernommen werden. Damit wurde der fehlerfreie Aufbau eines Rechenmodells mit über 1 Mio. Gitterpunkten in sehr kurzer Zeit realisiert.

Nach der Kalibrierung des Rechenmodells für die dreidimensionale Modellierung der Grundwasserbewegung ohne Berücksichtigung der Versalzung des tieferen Grundwassers anhand gemessener hydraulischer Potentiale an den Messstellen im Süßwasserbereich sind vier Rechenfälle mit unterschiedlichen Randbedingungen bzw. unterschiedlicher Parameterbelegung einzelner hydrogeologischer Baueinheiten näher untersucht worden. Neben den Auswirkungen eines möglichen seitlichen Zuflusses im südlichen Bereich des Ringwalls wurde die Zusammenfassung mehrerer Baueinheiten des hydrogeologischen Strukturmodells zu einer Einheit im Rechenmodell sowie das Unterbinden von tiefgreifenden Bewegungen in den salzwasserbetonten Bereich bewertet. Diese Modellrechnungen ergänzen und aktualisieren die 1987 von der BGR durchgeführten Rechnungen /BGR 87/.

Für die Durchführung der dreidimensionalen Modellrechnungen mit Berücksichtigung der Versalzung des Grundwassers wurde das Rechenprogramm SoTraCoF /GEN 99/ entwickelt. Zur Qualifizierung dieses Programms wurden die Ergebnisse von zweidimensionalen Prinzipmodellen mit den Ergebnissen der Rechenprogramme SUTRA /VOS 84/ und NAMMU /HAR 96/ verglichen. Die Vergleichsrechnungen wurden mit zwei Modellen ausgeführt, die auch in den dichteabhängigen Modellrechnungen der BGR (siehe z. B. /SCH 95/, /VOG 96/) zur Anwendung gekommen sind.

Im Hinblick auf die Darstellung des Einflusses der Versalzung auf die Grundwasserbewegung sind zunächst Modellrechnungen mit einem stark vereinfachten dreidimensionalen Prinzipmodell der Gorlebener Rinne und des ihr im Norden vorgelagerten Teils der nördlichen Randsenke durchgeführt worden. Das Modellgebiet wurde später durch Hinzunahme von weiteren Bereichen der nördlichen Randsenke vergrößert.

Im Folgenden werden die mit den Modellrechnungen verfolgten Ziele genannt, die für die Modellrechnungen erstellten Rechenmodelle kurz vorgestellt und die wesentlichen Ergebnisse der Berechnungen aufgeführt. Es ist zu betonen, dass die hier vorgestellten Modellrechnungen noch auf einem Erkenntnis- und Datenstand beruhen, der die



Erkundung auf dem Gebiet der ehemaligen DDR im Bereich nördlich der Elbe noch nicht berücksichtigt.

## **J.2 Modellierung der Grundwasserbewegung ohne Berücksichtigung der Versalzung**

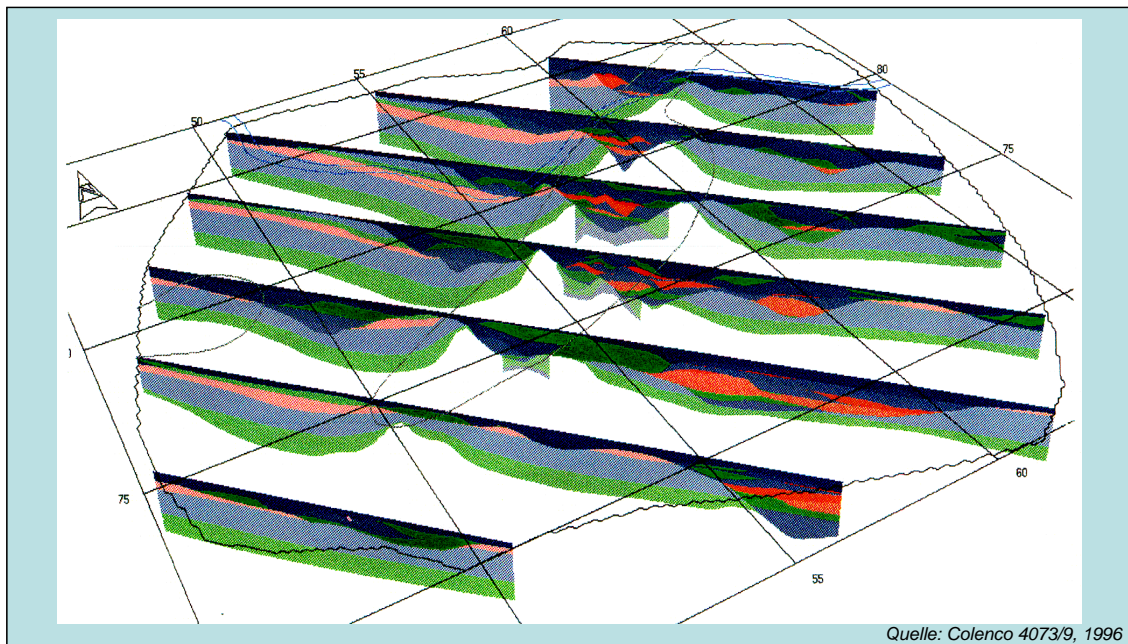
### **J.2.1 Ziele der Modellrechnungen**

Die Ziele der Modellrechnungen zur Ermittlung der Grundwasserbewegung ohne Berücksichtigung der Versalzung (Süßwasserrechnungen) umfassen:

- Stärkung des allgemeinen Verständnisses in Bezug auf die Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Salzstocks unter heutigen Bedingungen,
- Ermittlung des Verdünnungspotentials im oberflächennahen Grundwasser für Stoffe, die mit der Grundwasserbewegung aus größerer Tiefe in Oberflächennähe gelangen können,
- Untersuchung der Berechtigung von Vereinfachungen bezüglich Dimensionalität und Reduzierung der Größe des Modellgebiets für Modellrechnungen mit Berücksichtigung der Versalzung.

### **J.2.2 Modellaufbau und Kalibrierung**

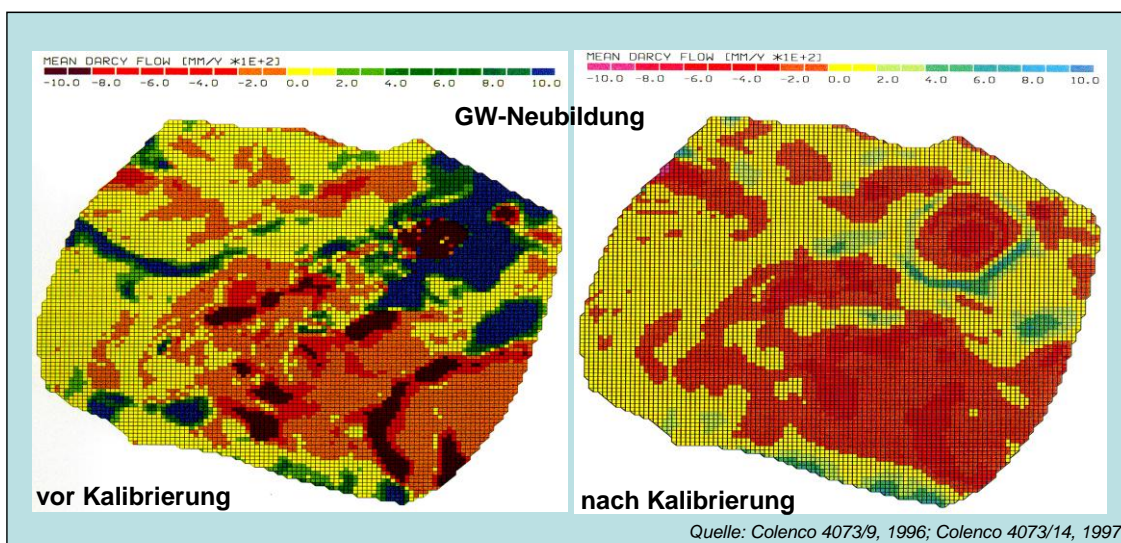
Basierend auf /BGR 94/ wurde für das Deckgebirge des Salzstocks Gorleben ein dreidimensionales Modell für Finite-Elemente-Rechnungen unter Süßwasserbedingungen erstellt, das alle hydrogeologischen Baueinheiten mit ihrer komplexen dreidimensionalen Geometrie wiedergibt /GEN 96/. Dieses 3D-Süßwassermodell hat eine horizontale Ausdehnung von 16 km · 20 km und deckt den ganzen Endlagerbereich Gorleben ab. Es beginnt im Norden an der Löcknitz und reicht im Süden bis an den Luciekanal. Die Gliederung der BGR in Grundwasserleiter (GWL), Grundwassergeringleiter (GWGL) und Grundwasserhemmer (GWH) /BGR 94/ wurde voll in das Modell übernommen. Das Modell weist ca. 245 000 Elemente und 1 050 000 Knoten auf und unterscheidet 32 Modellschichten (siehe Abb. J. 2.1).



**Abb. J. 2.1** Illustration des 3D-Süßwassermodells – Serie von Nordwest-Südost-Schnitten

Bei den für die Kalibrierung des Modells verwendeten Bewertungsgrößen handelt es sich einerseits um den Vergleich der in süßwasserbetonten Grundwassermessstellen gemessenen Potentialmittelwerte mit den mit dem 3D-Süßwassermodell berechneten Werten; Zusätzlich wurde die Grundwasserneubildung in die Bewertung einbezogen. Die möglichen Mess- und Modellgenauigkeiten in der Ermittlung des Potentials wurden abgeschätzt. Mit den Kalibrierungsrechnungen vorgelagerten Modellrechnungen wurden die Randbedingungen (mögliche Zu- und Abflüsse) über die vertikalen Modellgrenzen im Gebiet der Elbeniederung und südlich des Salzstockes Siemen festgelegt. Die Kalibrierungsrechnungen umfassten folgende Arbeitsschritte /GEN 96/: In einer ersten Phase wird die Sensitivität der  $k_f$ -Werte auf die berechneten Potentiale und die Grundwasserneubildung für wichtige hydrogeologische Baueinheiten berechnet. Basierend auf diesen Sensitivitätsanalysen wurden anschließend die Parameter für die wichtigen Grundwasserleiter GWL20 (im Wesentlichen Niederterrasse), GWL7/GWL6 (Braunkohlensande) und GWL17 (saalezeitliche glazifluviale Sande) optimiert. In ergänzenden Kalibrierungsrechnungen wurde versucht, Realisierungen zu erreichen, die sowohl günstige Bewertungsergebnisse (Zielfunktion, Grundwasserneubildung) aufweisen (siehe Abb. J. 2.2) als auch weitgehend innerhalb der für die hydrogeologischen Baueinheiten vorgegebenen Bandbreiten der  $k_f$ -Werte verbleiben. Eine Sensitivitätsanalyse der  $k_f$ -Werte auf die berechneten Porenwasserdrucke zeigt erwartungsgemäß, dass die hohen Sensitivitäten auf wenige Grundwasserleiter be-

schränkt sind. Hier sind insbesondere die Grundwasserleiter zu nennen, die eine große Verbreitung im Modellgebiet aufweisen und deren Porenwasserdrucke durch Grundwassermessstellen erfasst sind. Dazu gehören der oberste Grundwasserleiter GWL20 und die Grundwasserleiter GWL7/GWL6. Die Grundwasserneubildung liegt für die Basisdurchlässigkeiten (= geometrische Mittelwerte der in /BGR 94/ angegebenen Bandbreiten) der erwähnten Grundwasserleiter in einem plausiblen Bereich, kann sich jedoch mit einer  $k_f$ -Wert-Variation um eine Größenordnung verändern. Variationen der  $k_f$ -Werte der Grundwasserhemmer und Grundwassergeringleiter zeigen nur eine sehr geringe Wirkung auf die Potentialverteilung und den Grundwasserumsatz im Modell.

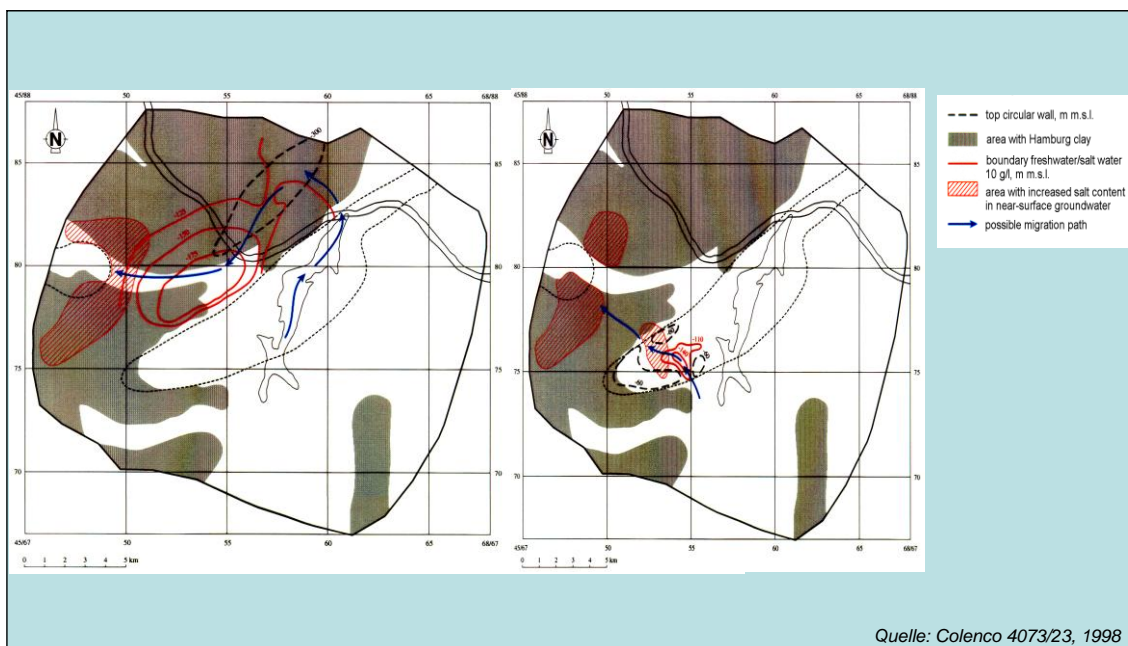


**Abb. J. 2.2** Berechnete Grundwasserneubildungsraten vor und nach Kalibrierung

Eine detaillierte Analyse der lokalen Potentialdifferenzen für den optimierten Parametersatz zeigt keine systematischen Abweichungen in den einzelnen hydrogeologischen Baueinheiten. Die lokale Verteilung von Infiltration und Exfiltration über die Modelloberfläche ist in guter Übereinstimmung mit den in der Datenbasis /BGR 94/ ausgewiesenen Grundwasserneubildungsgebieten. Der Vergleich der mit der Einbohrlochmethode bestimmten, allerdings als wenig belastbar eingeschätzten Filtergeschwindigkeiten im süßwasserbetonten Bereich mit den berechneten Werten an derselben Stelle zeigt bis auf einen Wert in GWL17 eine recht gute Übereinstimmung.

### J.2.3 Durchgeführte Modellrechnungen und wesentliche Ergebnisse

Basierend auf Kalibrierungsrechnungen mit dem 3D-Süßwassermodell ist ein optimierter Parametersatz für den Referenzfall ermittelt worden. Dieser Parametersatz definiert die hydraulischen Durchlässigkeiten der hydrogeologischen Baueinheiten, die Porositäten sowie die Randbedingungen /KLE 96a/. Der mögliche Aufstieg von Tiefengrundwasser am südwestlichen Ende des Salzstockgebietes durch den Brüsselsand wurde mit zwei Parametervariationen untersucht /KLE 96a/. Es wird dabei angenommen, dass ein Zufluss in das Modell von 3 000 m<sup>3</sup>/a bzw. 60 000 m<sup>3</sup>/a stattfindet. Mit zwei weiteren Rechenfällen wurden die Auswirkungen einer Zusammenfassung der saalezeitlichen Einheiten /KLE 96b/ und die sich durch eine Anhebung des Modellbodens auf die 10 g/l-Salzkonzentrationsfläche ergebenden Veränderungen der Modellergebnisse gegenüber dem vollständigen 3D-Süßwassermodell /GEN 97/ untersucht. Die Identifikation potentieller Transportwege (siehe Abb. J. 2.3) erfolgte – soweit dies in einem Süßwassermodell möglich ist – mit Trajektorienrechnungen ausgehend von einer systematischen Startpunktverteilung im Hutgestein. Die Fließwege wurden in Gruppen aufgegliedert, die sich durch die Start- und Exfiltrationsgebiete unterscheiden.



**Abb. J. 2.3** Beispiele für berechnete Fließpfade

Die Erfahrungen über das Modellverhalten in den Kalibrierungsrechnungen /GEN 96/, den Parametervariationen /KLE 96a/ und den weiteren Rechenfällen /KLE 96b/, /GEN 97/ erlauben folgende Schlussfolgerungen:

- Die Parameter, die im Wesentlichen den Grundwasseraustausch im Süßwassermodell steuern, sind erkannt worden. Es können bei entsprechender Parameterwahl Grundwasserneubildungsraten erreicht werden, die hinsichtlich der geographischen Verteilung der Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete und der Grundwasserneubildung mit den natürlichen Verhältnissen vergleichbar sind.

Es handelt sich im Wesentlichen um die Durchlässigkeit und Anisotropie von GWL20 (hauptsächlich Niederterrasse) und der zusammengefassten saalezeitlichen Einheit sowie um die Durchlässigkeit der Unteren Braunkohlensande. Der Grundwasseraustausch dürfte weiter durch die Verbreitung der abdeckenden Tonschichten (Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex) beeinflusst werden.

- Der Vergleich der Resultate des Modells mit auf die 10 g/l-Salzkonzentrationsfläche angehobenem Modellboden mit jenen des Gesamtmodells zeigt, dass die gewählten Kalibrierungsvariablen durch den wegfallenden salzwassererfüllten Teil des Grundwassersystems nur geringfügig beeinflusst werden, möglicherweise wegen der weiten Verbreitung abdeckender Tonschichten, so dass die möglichen Exfiltrationszonen auf verhältnismäßig geringflächige Gebiete eingengt werden. Die Verbreitung der abdeckenden Tonformationen diktiert die Lage der Exfiltrationszonen und beeinflusst damit die Fließzeiten und die Länge der Fließwege in der nördlichen Randsenke.
- Mit den Rechenfällen wurde ein weites Spektrum von Parametervariationen abgedeckt. Dabei verhielt sich das Fließfeld stabil, insbesondere auch über dem Salzstock.
- Der Verlauf der Trajektorien ist eine Funktion der Position der Trajektorienstartpunkte. Er wird durch das Gesamtließfeld vorgegeben. Nahe der Modelluntergrenze im Salzstockgebiet gestartete Trajektorien folgen auf längere Strecken bis zur jeweiligen Aufstiegszone dem Modellboden.
- Ein Zufluss von Tiefenwasser in das Modellgebiet im Bereich des Brüsselsandes (GWL5) am Südwestende des Salzstocks Gorleben in einer Größenordnung von 60 000 m<sup>3</sup>/a übt keinen wesentlichen Einfluss auf die Modellergebnisse, insbesondere die Potentialverteilung im Gebiet der Salzstockverbreitung, aus. Zumindest für Süßwasserverhältnisse ist damit dieser Zufluss ohne nennenswerte Auswirkungen auf die Fließwegverläufe und -zeiten der Trajektorienrechnungen mit Startpunkten im Hutgestein.

- Es zeigen sich klare Grenzen, durch Variation der Durchlässigkeiten im Rahmen hydrogeologisch sinnvoller Bandbreiten Werte der Zielfunktion unter einem gewissen Schwellenwert zu erreichen. Weiter weist die Häufung von erhöhten negativen oder positiven Abweichungen in stets denselben Kombinationen von Grundwassermessstellen, z. B. am Eingang der Gorlebener Rinne, darauf hin, dass Verbesserungen am stationären Süßwassermodell nur noch durch Änderungen der hydrogeologischen Geometrie oder der Randbedingungen (z. B. erhöhter Detaillierungsgrad) möglich sind oder dass sie auf modelltechnische Einschränkungen zurückgehen.
- Der Einfluss von modelltechnischen Einschränkungen wie Randbedingungen, Stationarität, Dichte-Vernachlässigung, Geometrieraster auf die Modellresultate ist gering.

### **J.3 Modellierung der Grundwasserbewegung mit Berücksichtigung der Versalzung**

#### **J.3.1 Qualifizierung des Rechenprogramms**

Die hydrogeologischen Gegebenheiten in Gorleben lassen bei den durch die Mineralisierung des Grundwassers durch Salzlösung am Kontakt zum Salzstock bedingten dichteabhängigen Strömungen infolge der komplexen Geometrie im Salzstock- und im vorgelagerten Austragsgebiet ausgeprägte 3D-Effekte vermuten. Das Rechenprogramm SoTraCoF wurde von der Fa. Colenco entwickelt, um die Durchführung dichteabhängiger Modellrechnungen der Gorlebener Rinne und des vorgelagerten Gebietes zumindest mit vereinfachten 3D-Prinzipmodellen zu ermöglichen.

Zur Qualifizierung des Rechenprogramms SoTraCoF wurden Vergleichsrechnungen mit zwei 2D-Dichtemodellen, die auch in den dichteabhängigen Modellrechnungen der BGR zur Anwendung gekommen sind (siehe z. B. /SCH 95/, /VOG 96/), und mit den Rechenprogrammen SUTRA V-0690-2D (Version 2.3), NAMMU 6.3 sowie dem neu entwickelten Programm SoTraCoF 1.0 durchgeführt /RIV 99a/.

Die zunächst mit einem einfachen Prinzipmodell durchgeführten Modellrechnungen zeigen, dass die Auslegung des Elementnetzes des Originalmodells für NAMMU und

für iterative Löser, wie sie SoTraCoF verwendet, nicht sehr günstig ist, da das Längen/Breiten-Verhältnis der Elemente („aspect ratio“) sehr hoch sein kann und weiter sehr hohe Durchlässigkeitssprünge über die Elementgrenzen (4 Größenordnungen) bestehen. SUTRA konnte das Problem mit dem Originalelementnetz lösen. Mit NAMMU und dem Originalmodell konvergieren die Rechnungen mit  $\alpha_L = 250$  m nicht, außer bei Anwendung unrealistisch hoher Werte für  $D_p$  ( $> 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s). Bei der Anwendung geringerer longitudinaler Dispersionslängen ( $\alpha_L = 50$  m bzw.  $\alpha_L = 20$  m) konvergieren sie mit NAMMU sowohl mit dem Originalelementnetz wie mit der Netzverfeinerung und bei beiden Anfangsbedingungen. Die Rechenzeiten und der Speicherbedarf sind jedoch außerordentlich hoch, so dass die Rechnungen nach Simulationszeiten von wenigen Jahrzehnten beendet wurden. Bei Anwendung von SoTraCoF 1.0 konvergieren alle durchgeführten Rechnungen.

Die anschließend mit einem etwas realitätsnäheren Prinzipmodell durchgeführten Modellrechnungen bestätigen die mit dem einfachen Prinzipmodell gewonnenen Erkenntnisse /RIV 99a/. Auch bei einem groben Elementnetz konvergieren die SUTRA-Rechnungen bei der Anfangsbedingung der Salzverteilung "gesättigte Salzlösung im Rinnentiefsten" mit dem Originalmodell sowohl mit  $\alpha_L = 250$  m als auch mit  $\alpha_L = 50$  m. Die Rechenvariante mit der Anfangsbedingung „Süßwasser“ ist mit SUTRA nicht realisierbar, da keine physikalisch plausiblen Ergebnisse berechnet werden. Mit NAMMU konvergieren bei  $\alpha_L = 250$  m und der Anfangsbedingung "gesättigte Salzlösung im Rinnentiefsten" die Rechnungen weder mit dem Originalmodell noch mit der Verfeinerung 3. Sie konvergieren jedoch bei der Anfangsbedingung „Süßwasser“. Die Rechenfälle mit geringeren longitudinalen Dispersionslängen  $\alpha_L$  (50 m, 10 m) konvergieren bei beiden Anfangsbedingungen. Die Rechenzeiten und die Speicherbelegung sind jedoch außerordentlich groß. Alle Rechnungen mit SoTraCoF 1.0 konvergieren mit  $\alpha_L = 250$  m bis  $\alpha_L = 10$  m, allen vier Modellvarianten sowie beiden Anfangsbedingungen der Salzverteilung und weisen Rechenzeiten auf, die eine Simulation bis zu einem Zeitpunkt 10 000 Jahre erlauben.

Bei den Rechnungen mit dem etwas realitätsnäheren 2D-Prinzipmodell ergeben sich mit den drei Programmen typische Erscheinungsbilder, die immer wieder vorkommen und die im Bericht beschrieben werden. Der vertikale Salztransport nimmt in Rechnungen mit identischen Parametern von SUTRA über SoTraCoF 1.0 nach NAMMU zu. In allen Rechenfällen und bei allen Programmen ist bei Verringerung der longitudinalen Dispersionslänge eine geringere Aufweitung der scharfen Schichtung und damit eine



Verringerung des Salztransportes nach oben zu verzeichnen. Das Ausmaß der Abhängigkeit von der longitudinalen Dispersionslänge ist allerdings in SUTRA geringer als in NAMMU und SoTraCoF 1.0.

Die durchgeführten Modellrechnungen belegen, dass die für die Entwicklung von SoTraCoF angestrebten Ziele

- hohe Flexibilität bei der Modelldiskretisierung,
- Möglichkeit der Einbettung von Elementen niedrigerer Ordnung in ein 3D-Netz,
- Zugang zum Rechenprogramm (keine „black box“),
- geringer Speicherplatzbedarf,
- Erweiterbarkeit des Rechenprogramms auf komplexere Fragestellungen und anspruchsvollere Lösungsansätze und
- Vergleichbarkeit der Resultate mit jenen anderer Rechenprogramme

zu einem großen Teil erreicht wurden. Das Programm SoTraCoF 1.0 erlaubt es, 3D-Modelle mit über 100 000 Elementen oder über 450 000 Knoten zu rechnen und ermöglicht damit, die dichteabhängigen Fließverhältnisse in der Gorlebener Rinne und dem vorgelagerten Gebiet der nördlichen Randsenke mit 3D-Prinzipmodellen zu simulieren. Allerdings weist SoTraCoF 1.0, wie die Vergleichsrechnungen dieses Berichtes zeigen, bei Verwendung gekippter oder verzerrter Elemente, eine größere numerische Dispersion als das Programm SUTRA auf. Bei der Erstellung der Elementnetze für die dreidimensionalen Prinzipmodelle und bei der Bewertung der Rechenresultate wurde diesem Umstand Rechnung getragen.

### **J.3.2 Dreidimensionale Prinzipmodelle**

#### **J.3.2.1 Ziele der Modellrechnungen**

Die Ziele der anschließenden Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung mit Berücksichtigung der Versalzung (Salzwasserrechnungen) umfassen:



- Ermittlung des Einflusses von Dichteeffekten auf die Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Salzstocks unter heutigen Bedingungen (d. h. ohne Austreten von Lösung aus dem im Salzstock errichteten Endlager),
- Simulation der Ausbreitung von im Bereich der Gorlebener Rinne am Salzstockrand gelöster, an NaCl gesättigter Lösung im Deckgebirge unter Berücksichtigung der Dichteeffekte und insbesondere
- Ermittlung der möglichen Ausbreitungswege dieser Lösung sowie der charakteristischen Größen dieser Transportwege (Transportdistanz, Transportzeit für nichtsorberende Grundwasserinhaltsstoffe).

### **J.3.2.2 Beschreibung der Modelle**

Das 3D-Prinzipmodell 3D-PM1.x /RIV 99b/ (siehe Abb. J. 3.1) hat eine Breite von 2,7 km, eine Länge von ca. 12 km und eine vertikale Erstreckung von etwa 325 m und enthält die hydrogeologischen Baueinheiten

- Hutgestein im Kontakt zum Salzspiegel,
- geringdurchlässiges Tertiär,
- Rinnensande im Gebiet des Salzstockes, untere Braunkohlensande und Rinnensande (zusammengefasst) in der nördlichen Randsenke,
- Lauenburger-Ton-Komplex und
- Grundwasserleiter zwischen Lauenburger-Ton-Komplex und Oberfläche.

Die auch im 3D-Süßwassermodell zur Anwendung kommende Grundwasseroberfläche des im Hühbeck modifizierten Grundwassergleichenplans bildet den oberen Modellrand. Der untere Modellrand folgt innerhalb des Salzstockgebietes Gorleben dem Salzspiegel, in der nördlichen Randsenke der Basis der unteren Braunkohlensande. Die Längs- und Quererstreckung der Rinne wird im Salzstockbereich vollständig berücksichtigt. Der südliche Modellrand wird an den Rinneneingang in das Salzstockgebiet gelegt. Um einen Zutritt von Wasser aus dem Grundwasserleiter Holstein-Weichsel-Saale (HWS) zu den Rinnensanden zu erlauben, wird ähnlich wie im 2D-Modellschnitt der BGR am SW-Rand des Modells über eine Länge von 250 m eine Verbindung zwischen den beiden Grundwasserleitern geschaffen. Das Rinnentiefste verläuft im Zentrum des Modells, abfallend von -200 mNN auf -275 mNN; am Austrittspunkt in die

Braunkohlensande liegt es auf -275 mNN, die Basis der Braunkohlensande dagegen auf -140 mNN. Die Mächtigkeit des Rinnenaquifers am Ausgang der Gorlebener Rinne in die nördliche Randsenke beträgt 10 m (Prinzipmodell 3D-PM1.0) bzw. 20 m (Prinzipmodell 3D-PM1.1). Die nördliche Randsenke wird durch einen bis zur Löcknitz reichenden Gebietsstreifen abgebildet. Da die nördliche Randsenke ein Akkumulationsgebiet für einen großen Teil des aus der Gorlebener Rinne austretenden Salzes darstellen dürfte, stellt deren Begrenzung im Prinzipmodell 3D-PM1.x auf einen lediglich geringen Teil der nördlichen Randsenke eine große Vereinfachung dar.

Das Elementnetz der Prinzipmodelle 3D-PM1.x umfasst 177 246 Knoten und 42 366 Elemente. Als Elementformen kommen Quader und untergeordnet liegende Prismen vor. Topologisch problematischere, reduzierte Formen wie z. B. reduzierte Prismen sind nicht verwendet worden. Die Elemente weisen in Horizontalrichtung in der Regel eine Größe von 100 m · 110 m auf. In der Vertikalen ist die Mächtigkeit der Elemente der erwarteten relativen Salzkonzentration angepasst worden: Im unteren Teil (Hutgestein, Tertiär, teilweise Rinnensande und untere Braunkohlensande) wurde die Höhe der Elemente auf etwa 10 m beschränkt; in den oberen Modellbereichen (Lauenburger-Ton-Komplex, Oberflächenaquifer) kamen Elemente bis 30 – 40 m Höhe zur Anwendung. Das Modell weist 19 Elementschichten auf.

Für das Prinzipmodell 3D-PM2.0 /RIV 99c/ (siehe Abb. J. 3.1) wird das Prinzipmodell 3D-PM1.1 vollumfänglich übernommen und im Gebiet der nördlichen Randsenke massiv erweitert. Im Erweiterungsgebiet sind folgende geometrische Formen und Beziehungen wichtig und werden im 3D-Modell berücksichtigt:

- Die Oberfläche des Grundwasserhemmers GWH4 ist als Basis der Braunkohlensande eine natürliche Begrenzung für den advektiven Salztransport und bildet in der nördlichen Randsenke den unteren Modellrand.
- Die Braunkohlensande der nördlichen Randsenke stellen eine bedeutende Senke für Salzwasser dar. Die Achse der Senke verläuft nahe des Salzstockes in südwest-nordöstlicher Richtung.
- Die Geometrie des Hamburg-Tons und des Lauenburger-Ton-Komplexes (Oberfläche, Unterfläche, Verbreitungsgebiet, Kontinuität in West-Ost-Richtung) ist von Bedeutung für den Salzaufstieg aus den Braunkohlensanden.
- Die Potentialverteilung an der Modelloberfläche bestimmt die Fließrichtungen im süßwasserbetonten Teil des Grundwassersystems.

- Der relativ hohe Gradient im Oberflächenaquifer und die Kontinuität zwischen Oberflächenaquifer und den Braunkohlensanden in einem von Gorleben bis an den nordwestlichen Modellrand beim Salzstock Siemen reichenden Streifen ermöglicht westlich des Salzstockes Gorleben einerseits den Zufluss von Süßwasser zu den Braunkohlensanden der nördlichen Randsenke und andererseits den Austrag von Salz.

Im Erweiterungsgebiet umfasst das Modell von unten nach oben folgende Modellschichten:

- Braunkohlensande (und die direkt aufliegende Fortsetzung des quartären Rinnenaquifers nördlich des Rinnenausgangs),
- Hamburg-Ton im Westen; im Osten seitlich überlagert vom Lauenburger-Ton-Komplex und
- Oberflächenaquifer Holstein-Weichsel-Saale.

Das Elementnetz des Prinzipmodells 3D-PM2.0 umfasst 456 187 Knoten und 105 350 Elemente.

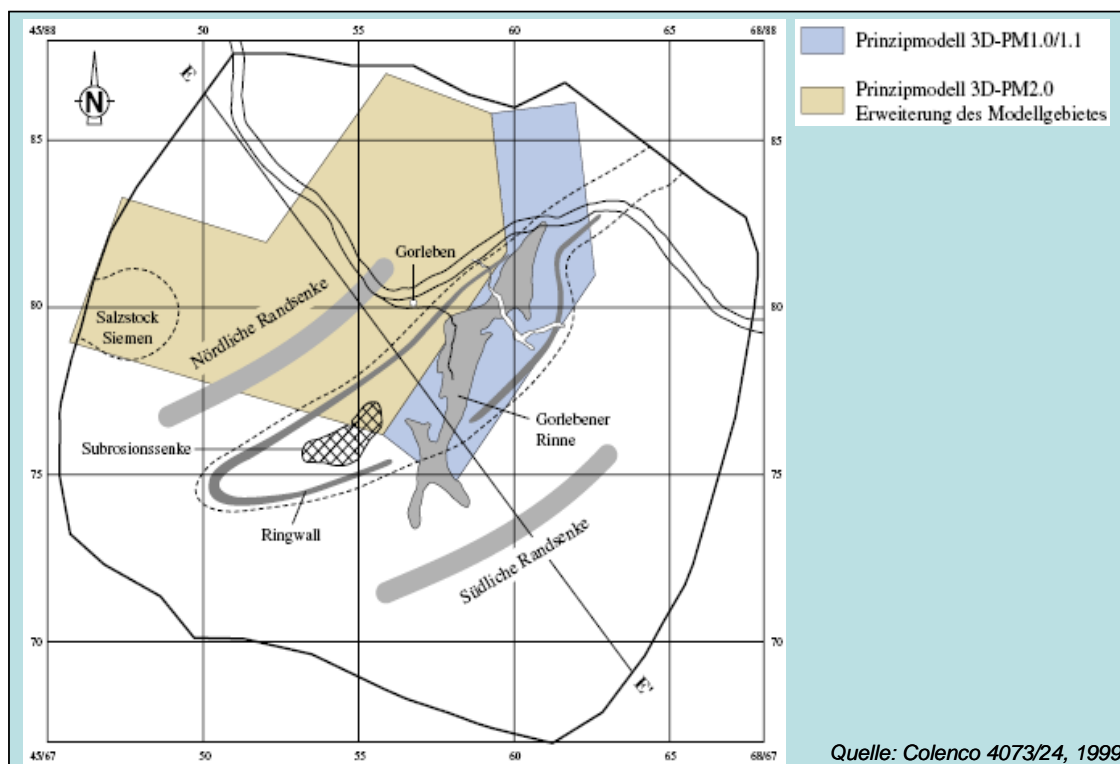


Abb. J. 3.1 Lage der Prinzipmodelle 3D-PM1.x und 3D-PM2.0

### J.3.3 Wesentliche Ergebnisse

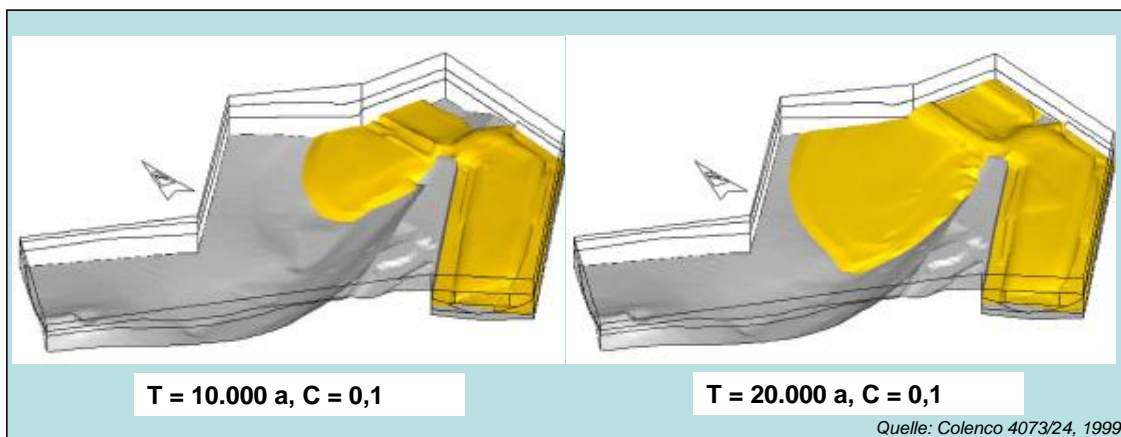
Die Resultate der mit dem Prinzipmodellen 3D-PM1.x durchgeführten Rechnungen zeigen /RIV 99b/, dass 3D-Effekte einen wesentlichen Anteil am Salztransport einnehmen, wobei als wichtigste zu nennen sind:

- Zufluss von Salz ab dem Salzspiegel durch Zirkulationszellen quer zum Rinnenverlauf,
- Abfluss des Salzes aus der Gorlebener Rinne wesentlich beeinflusst durch den Fließquerschnitt (Niveau, Höhe, Breite) und
- Aufbau des Salzgehaltes in der nördlichen Randsenke durch Akkumulation des zufließenden Salzwassers wesentlich beeinflusst durch deren räumliche Ausdehnung.

Diese Elemente führen dazu, dass der Aufbau des Salzgehaltes in der Gorlebener Rinne rascher vor sich geht als in den 2D-Rechnungen. Der Aufbau des Salzgehaltes in der nördlichen Randsenke ist wesentlich eine Funktion von Eintrag, Austrag und Volumen der Senke.

Die Modellrechnungen mit dem Prinzipmodell 3D-PM2.0 zeigen /KLE 98/, /RIV 98/, /RIV 99c/, dass das den Nordteil des Salzstockes Gorleben, die Gorlebener Rinne und die nördliche Randsenke umfassende Gebiet zusammen mit den Salzstöcken Siemen und Rambow als zusammenhängendes Süß-/ Salzwasser-System zu betrachten ist. Die Modellrechnungen lassen vermuten, dass die notwendige Aufbauzeit des Salzwassersystems kürzer ist (einige Zehntausend bis 100 000 Jahre) als bisher angenommen wurde (weit über 100 000 Jahre) und dass sich das System heute ungefähr in einem stationären Zustand befinden dürfte. Die hohen Salzgehalte im jetzigen System lassen vermuten, dass die Einschichtungshöhe des Salzzuflusses aus der Gorlebener Rinne und der Austrag des aus dem Salzstock Gorleben stammenden Salzes in die nördliche Randsenke nicht entlang der Basis der Braunkohlensande, sondern auf einem höheren Niveau erfolgen; daraus dürften kürzere Transportzeiten für einen Austragsweg aus der Gorlebener Rinne resultieren als ohne den Einbezug der Salzstöcke Siemen und Rambow. Die sich aus den Modellrechnungen ergebenden Austragsorte gegen den westlichen Modellrand beim Salzstock Siemen, in der Elbeniederung bei Wootz sowie bei Gorleben lassen sich auch in der Datenbasis /BGR 94/ als Zonen mit

erhöhtem Salzgehalt im oberflächennahen Grundwasser oder als Austragsort von Salz erkennen.



**Abb. J. 3.2** Beispiel für die berechnete Salzausbreitung

Mit den dreidimensionalen Rechnungen zur Modellierung der Grundwasserbewegung mit Berücksichtigung der Versalzung des Grundwassers sind wesentliche Elemente, die auf die Dynamik des betrachteten Süß-/Salzwasser-Systems einen Einfluss ausüben, erkannt worden.

## J.4 Ausblick

Die hier vorgestellten Modellrechnungen beruhen auf einem Erkenntnis- und Datenstand, der die Erkundung auf dem Gebiet der ehemaligen DDR im Bereich nördlich der Elbe noch nicht berücksichtigt.

Die Berücksichtigung folgender Punkte bzw. die Abklärung ihres Einflusses auf den Salztransport sollten bei einer verfeinerten, auf dem aktuellen hydrogeologischen Modell basierenden Modellierung, berücksichtigt werden:

- Einbezug des Salzstockes Siemen und – falls direkte Verbindungen über Aquifere zu den Braunkohlensanden der nördlichen Randsenke bestehen – auch des Salzstockes Rambow in das Modell mit einer Salzkonzentrationsrandbedingung  $C = 1$ . Von Wichtigkeit ist weiter die Berücksichtigung der Geometrie von Aquiferen und Einheiten geringerer Durchlässigkeit (GWH, GWGL) in der Umgebung dieser Salzstöcke und die Topographie des basalen Grundwasserhemmers (GWH4).

- Der  $k_f$ -Wert der Braunkohlensande dürfte für die Dynamik des Salzwasserflusses in der nördlichen Randsenke von Bedeutung sein; die beiden Untereinheiten GWL6 und GWL7 sollten im Modell ausgeschieden werden.
- Die genaue seitliche Ausdehnung des Hamburg-Tons und das Vorkommen von Hemmnissen (Linsen von Grundwasserhemmern) im Aquifer oberhalb der Braunkohlensande ist ebenfalls von Bedeutung für die Dynamik des Systems nördliche Randsenke.
- Ein Salztransport entlang der Aquifere im Lauenburger-Ton-Komplex in die Elbeniederung ist nicht auszuschließen. Eine Differenzierung des Lauenburger-Ton-Komplexes in GWH, GWGL und GWL erscheint empfehlenswert. Dabei dürfte der Süßwasserzufluss aus dem Gebiet nördlich der Elbeniederung – das im hydrogeologischen Modell /BGR 94/ nicht berücksichtigt ist – ebenfalls von Bedeutung sein.
- In der Gorlebener Rinne erscheinen nach den Ergebnissen der Modellrechnungen mit den Prinzipmodellen folgende Faktoren von Wichtigkeit. Es sollte ihnen in einem verbesserten in differenzierter Weise Rechnungen getragen werden:
  - Hutgestein: Geometrie der Salzoberfläche, Geometrie, Mächtigkeit,  $k_f$ -Wert und Anbindung an die Rinnensande (Einfluss auf das Ausmaß der Salzlösung und des Salztransportes zu den Rinnensanden),
  - Topographie der Rinnensande, insbesondere der Basis der Rinnensohle (Reservoir für Salzwasser),
  - Geometrie des Rinnenausganges in die nördliche Randsenke (Abfluss von Salzwasser aus der Rinne),
  - Geometrie des südlichen Rinneneinganges (Zufluss von Süßwasser, topographiegetriebenes Potential im Süßwasser, Möglichkeiten für einen Salzfluss gegen Süden in die südliche Randsenke).
- Die Möglichkeit eines Salzaustrages entlang der Gorlebener Rinne gegen Süden in die südliche Randsenke und anschließend ein dichteabhängiger Fluss einerseits gegen Norden in Richtung Elbe, andererseits in den südlichen Teil der südlichen Randsenke sollte untersucht werden. Die Versalzungszonen entlang der Elbe dürften Ausdruck dieses Transportes sein. Im Gegensatz zur nördlichen Randsenke ist das Salzwasserreservoir entlang dieses potentiellen Fließweges aus topographischen Gründen sehr klein, so dass ein viel direkterer Transport in den Vorfluter

(Elbe) möglich sein könnte als derjenige gegen Norden in die nördliche Randsenke. Der Transport gegen Südwesten in den südwestlichen Teil der südlichen Randsenke wird dagegen als von geringerer Bedeutung betrachtet.

- Der Frage der Netzkonvergenz und der Transportparameter sollte vertieft nachgegangen werden.

Unabhängig von den Ergebnissen der bisher durchgeführten Modellrechnungen ist vor einer Wiederaufnahme der Modellrechnungen insbesondere im Hinblick auf die durch den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) zwischenzeitlich erfolgte Einführung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs /AKE 02/ und des damit verbundenen Nachweiskonzepts zu klären, welche Bedeutung solche Modellrechnungen in einem Sicherheitsnachweis haben.

## **J.5      Literaturverzeichnis**

- /AKE 02/ AkEnd, Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd, Bericht, Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln, 2002.
- /BGR 87/ BGR, Die Bewegung des Grundwassers im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben – Untersuchungen mit einem numerischen Modell, Bericht Archiv-Nr. 102 396 (unveröffentlicht), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1987.
- /BGR 94/ BGR, Projekt Gorleben: Hydrogeologische Grundlagen für Modellrechnungen – Kenntnisstand 1994 –, Bericht Archiv-Nr. 112 002 (unveröffentlicht), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1994.
- /GEN 96/ Genter, M., Klemenz, W., Schindler, M., Projekt Gorleben: 3D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserhältnissen – Modellaufbau und -kalibrierung, Bericht 4073/09 (unveröffentlicht), Colenco Power Consulting AG, Baden/CH, 1996.

- /GEN 97/ Genter, M., Klemenz, W., Schindler, M., Projekt Gorleben: 3D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasser-Verhältnissen – Parametervariationen mit Modellbasis an der 10 g/l-Salzkonzentrationsfläche und Gesamtwertung der Süßwasserrechnungen, Bericht 4073/14 (unveröffentlicht), Colenco Power Consulting AG, Baden/CH, 1997.
- /GEN 99/ Genter, M., Three-dimensional transport in a coupled groundwater-flow system: a fast finite-element code for solving large problems, Memorandum 1971/1 (unveröffentlicht), Colenco Power Engineering AG, Baden/CH, 1999.
- /HAR 96/ Hartley, L.J., Watson, S.P., Jackson, C.P., NAMMU (Release 6.3) User Guide, Report AEA-ES-0138, AEA-Technology, Oxon/UK, 1996.
- /KLE 96a/ Klemenz, W., Genter, M., Schindler, M., Projekt Gorleben: 3D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasser-Verhältnissen – Auswertung der Rechenfälle R01, R02 und R03, Bericht 4073/11 (unveröffentlicht), Colenco Power Consulting AG, Baden/CH, 1996.
- /KLE 96b/ Klemenz, W., Genter, M., Schindler, M., Projekt Gorleben: 3D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasser-Verhältnissen – Parametervariationen zur Rolle der saalezeitlichen Baueinheiten, Bericht 4073/13 (unveröffentlicht), Colenco Power Consulting AG, Baden/CH, 1996.
- /KLE 98/ Klemenz, W., Rivera, A., Wollrath, J., Genter, M., Three-dimensional Coupled Groundwater Movement and Salt Transport Calculations as Part of the Safety Assessment of the Gorleben Repository, Germany. In: A. Roth (Ed.): Proc. DisTec '98 - Disposal Technologies and Concepts, Int. Conf. on Radioactive Waste Disposal, Hamburg, 9-11 September 1998. Hamburg: Kontec, 1998, pp. 591-596.



- /RIV 98/ Rivera, A., Genter, M., Klemenz, W., Wollrath, J., Three-dimensional Simulation of Coupled Groundwater Flow and Salt Transport in Connection with Radioactive Waste Repositories. In: Proc. 11th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC '98) Vol. 1, Banff, Alberta, Kanada, 3-7 May 1998. Toronto: The Canadian Nuclear Society, 1998, pp. 635-645.
- /RIV 99a/ Rivera, A., Klemenz, W., Projekt Gorleben: 2D-Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Salzwasserhältnissen – Vergleichsrechnungen mit 2D-Dichtemodellen, Bericht 4073/21 (unveröffentlicht), Colenco Power Engineering AG, Baden/CH, 1999.
- /RIV 99b/ Rivera, A., Klemenz, W., Schindler, M., Projekt Gorleben: Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Salzwasserhältnissen – Modellrechnungen mit 3D-Dichtemodellen – Testrechnungen und Rechenfälle R01 bis R04 mit den Prinzipmodellen 3D-PM1.0 und 1.1, Bericht 4073/22 (unveröffentlicht), Colenco Power Engineering AG, Baden/CH, 1999.
- /RIV 99c/ Rivera, A., Klemenz, W., Projekt Gorleben: Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Salzwasserhältnissen – Modellrechnungen mit 3D-Dichtemodellen – Rechenfälle R05 und R07 mit dem Prinzipmodell 3D-PM2.0, Bericht 4073/24 (unveröffentlicht), Colenco Power Engineering AG, Baden/CH, 1999.
- /SCH 95/ Schelkes, K., Modelluntersuchungen zur Bewegung des Grundwassers bei vom Salzgehalt abhängiger Wasserdichte – Fallstudien und Modellvalidierung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 02 E 8301, Bericht Archiv-Nr. 114 249, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 1995.
- /VOG 96/ Vogel, P., Schelkes, K., Influence of initial conditions and hydrogeological setting on variable density flow in an aquifer above a salt dome, Proceedings of the ModelCARE 96 Conference, IAHS Publ. no. 237, 1996.

/VOS 84/ Voss, C.I., SUTRA: A finite-element simulation model for saturated-unsaturated fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport, Water-Resources Investigations Report 84-4369, U.S. Geological Survey, Denver/USA, 1984.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ am 05. und 06.11.2009 in Braunschweig .....	2
Abb. 2.1	Vereinfachter geologischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben /LUD 02/ .....	8
Abb. 2.2	Detaillierter geologischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben nach /KLI 02/, Lokalität des Profils s. Abb. 3.1 .....	9
Abb. 3.1	Hydrogeologischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben /KLI 07/ .....	12
Abb. 3.2	Hydrogeochemischer Profilschnitt durch das Gebiet von Gorleben /KLI 02/, Lokalität des Profils s. Abb. 3.1 (Grundwasser der Übergangsschicht mit $1 - 10 \text{ g l}^{-1}$ wird hier als Salzwasser bezeichnet) .....	12
Abb. A. 3.1	Hydrogeologische Gliederung des Deckgebirges von Gorleben /WIL 09/ .....	40
Abb. A. 3.2	Hydrogeologisches 3D-Strukturmodell, aufgebaut aus zehn Schnitten (Modellumrandung und Schnittspuren auf 0 m ü. NN, Farben der hydrogeologischen Einheiten wie in Abb. A. 3.1, Überhöhung 12,5x, /WIL 09/) .....	41
Abb. A. 3.3	Quartärbasis /KÖT 07/ .....	44
Abb. A. 4.1	Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben /KLI 07/ .....	48
Abb. B. 2.1	Korrelation der Gesamtsalzgehalte der Wasserproben aus Messstellen mit den Formationswiderständen aus Induction-Logs (aus /KLI 07/) .....	53
Abb. B. 3.1	Lageplan und Legende zu den hydrochemischen Vertikalschnitten (verändert nach /KLI 07/) .....	54
Abb. B. 3.2	Hydrochemische Vertikalschnitte A-A' und B-B' (Legende s. Abb. B. 3.1) (verändert nach /KLI 07/ .....	56
Abb. B. 3.3	Hydrochemische Vertikalschnitte C-C' und D-D' (Legende s. Abb. B. 3.1) (verändert nach /KLI 07/ .....	57
Abb. B. 3.4	Verbreitung und Gesamtsalzgehalte des unteren Süßwasserkörpers in der Elbe-Löcknitz-Niederung (aus /KLI 07/) .....	58

Abb. B. 3.5	Gesamtsalzgehalte der Grundwässer an der Basis des unteren Grundwasserleiters (aus /KLI 07/)	59
Abb. B. 3.6	Tiefenlage der Unterfläche des oberen Süßwasserkörpers (aus /KLI 07/)	61
Abb. C. 2.1	Schema der vertikalen Zonierung der Grundwassertypen im Untersuchungsgebiet Gorleben (aus /KLI 07/)	68
Abb. C. 2.2	Chemische Zusammensetzung verschiedener Grundwassertypen des Untersuchungsgebietes (aus /KLI 07/)	69
Abb. C. 3.1	Äquivalentverhältnis Br/Cl der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt	71
Abb. C. 4.1	Äquivalentverhältnis Na/Cl der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (aus /KLI 07/)	75
Abb. C. 4.2	Sulfatkonzentrationen der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (aus /KLI 07/)	77
Abb. C. 4.3	Hydrogenkarbonatkonzentrationen der Grundwässer in Abhängigkeit vom Gesamtsalzgehalt (aus /KLI 07/)	77
Abb. D. 2.1	Tritiumkonzentration im Niederschlag in Heidelberg /RUE 00/ zur Zeit des Niederschlags (rote Kurve) und zerfallskorrigiert auf das Jahr 2000 (blaue Kurve)	83
Abb. D. 2.2	Tiefenprofil der Tritiumkonzentration aller Messstellen im Untersuchungsgebiet /KLI 07/	84
Abb. D. 3.1	Isotopenfraktionierungsprozesse und Isotopengehalte der stabilen Isotope in unterschiedlichen Reservoiren (die angegebenen Zahlenwerte haben lediglich illustrativen Charakter)	86
Abb. D. 3.2	Konzentrationen der stabilen Isotope im Untersuchungsgebiet, nach /KLI 07/	87
Abb. D. 3.3	Tiefenprofil der <sup>18</sup> O-Konzentration im südlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets /SUC 93/	88
Abb. D. 4.1	Konzentration von Deuterium gegen <sup>14</sup> C-Modellalter für die Proben aus dem nördlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets /RUE 00/	90
Abb. D. 4.2	<sup>14</sup> C-Konzentration gegen den Gesamtsalzgehalt für die Proben aus dem Untersuchungsgebiet /KLI 07/	91
Abb. D. 5.1	Heliumalter gegen das <sup>14</sup> C-Alter für die Proben aus dem nördlichen Teilgebiet des Untersuchungsgebiets /RUE 00/	92

Abb. D. 5.2	Profil der Heliumkonzentration im Porenwasser des Lauenburger Ton für die Bohrung GoHy 1623 /RUE 00/ .....	93
Fig. E. 4.1	The Gorleben aquifer investigation area south of the river Elbe with the recharge conditions, the contour of the underlying salt dome and surface water bodies .....	99
Fig. E. 4.2	Special investigation area shown in fig. E. 4.1: Mixing of the ideal tracers Chloride and Tritium between recharge freshwater reaching down to a depth of 50 metres, and saturated brines up to a depth of 230 m .....	101
Fig. E. 4.3	Special investigation area shown in fig. E. 4.1: Location of high and low Chloride to depth signature (see fig. E. 4.2) .....	101
Fig. E. 4.4	The $^{18}\text{O}$ content of Gorleben groundwater at different depth .....	103
Fig. E. 4.5	Origin of groundwater samples .....	104
Fig. E. 4.6	The local groundwater line with sampling points from the Gorleben aquifer system (see text) .....	105
Fig. E. 4.7	Identification of groundwater with comparably high Ca content and Holocene $^{18}\text{O}$ signature .....	107
Fig. E. 4.8	Identification of groundwater with comparably high Cl content and Holocene $^{18}\text{O}$ signature .....	107
Fig. E. 4.9	Sulphate reduction in the Gorleben aquifer system with data from the study with samples shown in fig. E. 4.13 .....	110
Fig. E. 4.10	$^{34}\text{S}$ content in sulphate in Gorleben groundwater as a function of the chloride concentration .....	111
Fig. E. 4.11	Evolution of $\text{DI}^{13}\text{C}$ with pH from primary recharge .....	112
Fig. E. 4.12	$^{14}\text{C}$ concentrations of DIC of biogenic origin in Gorleben groundwater, shown against the tritium concentration .....	114
Fig. E. 4.13	Sampling wells used for specific study on the evolution of the $^{14}\text{C}$ content .....	114
Fig. E. 4.14	Evolution of the $^{14}\text{C}$ content from recharge, represented by the biogenic DIC source term corrected via tritium for fall-out, to different groundwater samples as shown in fig. E. 4.13 .....	116
Fig. E. 4.15	Evolution of the $^{13}\text{C}$ content from recharge to different groundwater samples as shown in fig. E. 4.13. ....	117
Fig. E. 4.16	$\text{DI}^{14}\text{C}$ load from different Gorleben groundwater samples, grouped according to different recharge conditions (from /BUC 03/) .....	121

Abb. F. 2.1	Basis des unteren Grundwasserleiters (aus /KLI 07/)	129
Abb. F. 2.2	Prinzipmodell der Wasserbewegung im unteren Grundwasserleiter unter Süßwasserbedingungen (Lage des schematischen Schnittes s. Abb. F. 3.1) (aus /KLI 07/)	130
Abb. F. 2.3	Prinzipmodell der Salzwasserbewegung im unteren Grundwasserleiter der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/)	131
Abb. F. 2.4	Grundwassersalinitäten im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben (Legende s. Abb. F. 2.8)	132
Abb. F. 2.5	Verbreitung der advektiven Differenztemperaturen in der nordwestlichen Randsenke im Niveau -180 m NN (aus /KLI 07/)	133
Abb. F. 2.6	Sauerstoff-Isotopensignaturen der Salzwässer mit > 200 g/l Gesamtsalzgehalt im unteren Aquifer der Gorlebener Rinne und der nordwestlichen Randsenke (aus /KLI 07/)	134
Abb. F. 2.7	Prinzipmodell zur Erklärung des Auftretens holozäner Solen an der Basis der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/)	137
Abb. F. 2.8	Hydrochemische Vertikalschnitte durch die Salzwasserhochlage am Westrand der Gorlebener Rinne (verändert nach /KLI 07/)	139
Abb. F. 3.1	Schema des Salzwassertransports aus der Gorlebener Rinne (aus /KLI 07/)	142
Abb. G. 2.1	Klimaentwicklung aus Sauerstoffisotopendaten. Zusammengeführte globale Sauerstoffisotopen-Kurven (verändert aus /BAR 07/: zit. /LIS 05/)	147
Abb. G. 2.2	Sauerstoffisotopen-Kurve der letzten 1,8 Mio. J. /BAS 07/: zit. /LIS 05/)	147
Abb. G. 3.1	Milanković-Zyklen und Prognose für die klimatische Zukunft bis 150 000 Jahre (vergl. /COC 06/; verändert aus /MOR 01/)	148
Abb. G. 4.1	Meeresspiegelanstieg mit Überflutungen von Gebieten (< 60 m ü. NN) nach einem vollständigen Abschmelzen aller Gletscher	154
Abb. G. 4.2	Verbreitung elsterzeitlicher Rinnensysteme dargestellt durch die Tiefenlage der Quartärbasis (aus: /STA 01/)	157
Abb. G. 4.3	Schnitt durch eine quartäre Rinne im unteren Elbe-Gebiet (aus: /EIB 07/ nach /KUS 79/)	158
Abb. G. 4.4	Modell des „Supercooling“-Effektes für die Entwicklung von subglazialen Rinnen anhand eines schematischen Längsprofils (aus: /KRI 08/)	162

Abb. G. 5.1	Verbreitung von untersuchungswürdigen Tongesteinsvorkommen, Eisrandlagen der Maximalvorstöße und vereinfachte 0 m-Linie der Quartärbasis (ergänzt nach /HOT 07/)	166
Abb. H. 2.1	Modellgebiet mit Quartärbasis und Lage des Profilschnitts in Abb. H. 3.1 (nach /LUD 01/)	178
Abb. H. 2.2	Berechnete Horizontalkomponenten der Filtergeschwindigkeiten in der Modellebene von 90 m u. NN	180
Abb. H. 2.3	Modellalter des Grundwassers im Rinnenbereich und Fließzeiten bis zum Erreichen der Biosphäre von Aufpunkten an der Aquiferbasis ohne (excl.) und mit (incl.) Berücksichtigung des Hutgesteins (nach /SCH 87/)	181
Abb. H. 2.4	Potentialverteilung und Stromlinien für das W-E-Profil	182
Abb. H. 3.1	Verallgemeinerter hydrogeologischer Schnitt (nach /VOG 96a/)	184
Abb. H. 3.2	Beispiel einer einfachen Modellgeometrie: räumliche Lage der hydrostratigrafischen Einheiten für die realistische Näherung	185
Abb. H. 3.3	Ergebnisse für die realistische Näherung nach 10 000 Jahren Modellzeit: a) Berechnete Isolinien des Salzgehalts (Gew. %); b) das zugeordnete Geschwindigkeitsfeld; c) Fließwege von Wasserteilchen	186
Abb. H. 3.4	Vergleich von Isolinien des Salzgehalts [Gew. %] nach 10 000 Jahren Modellzeit : a) isotrope (rote Linien) zu anisotroper (blaue Linien) Längsdispersion; b) transversale Dispersionslänge 0,0 m (rote Linien) zu 0,5 m (blaue Linien)	187
Abb. H. 3.5	Finite Elemente Gitternetz des Modells für den realistischen Schnitt	189
Abb. H. 3.6	Räumliche Verteilung der hydrostratigraphischen Einheiten mit schematischer Darstellung der Anfangsbedingungen durch die Tiefenlage des Übergangsbereichs Sole/Süßwasser (rote Linien)	190
Abb. H. 3.7	Isolinien der Salzkonzentration nach 10 000 a Rechenzeit (A), Modellvarianten des Rinnenaufbaus über dem nordwestlichen Salzstockrand (B) und Vergleich gemessener und berechneter vertikaler Dichteverteilungen an drei in (A) eingezeichneter Bohrlochlokationen (C)	191
Abb. H. 3.8	Berechnete Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten im Salzwasser-gefüllten Teil der Gorlebener Rinne (aus /KLI 02b/)	192
Abb. H. 4.1	Geographische Lage des regionalen paläohydrogeologischen Untersuchungsgebietes (aus /KOE 00c/)	194

Abb. H. 4.2	Vereinfachter hydrogeologischer Profilschnitt (Lage des Profilschnittes s. Abb. H. 4.1) nach /KOE 00b/ .....	195
Abb. H. 4.3	Berechnete Permafrostmächtigkeiten im Modellgebiet innerhalb der Weichsel-Kaltzeit (aus /VOG 01/).....	196
Abb. H. 4.4	Salzkonzentrationen am Ende einer jeden klimatischen Phase von Szenario C im zentralen Abschnitt von 40 – 80 km des modellierten Profils (Farbskala der Salzkonzentrationen wie in Abb. H. 4.5).....	197
Abb. H. 4.5	Salzkonzentration und Fließrichtung des Grundwassers über dem Salzstock Gorleben während eines typischen Stadials und Interstadials.....	199
Abb. H. 4.6	Lageplan des Untersuchungsgebietes .....	200
Abb. H. 4.7	a) Hydrogeologische Einheiten des dreidimensionalen regionalen Modells (ohne inaktive Zellen) und b) Verbreitung der Geringleiter im Modell .....	202
Abb. H. 4.8	Räumliche Konzentrationsverteilung als Isofläche eines Salzgehaltes von 0,1 kg/kg am Ende eines jeweiligen Zeitintervalls.....	203
Abb. I. 2.1	Isolinien der Quartärbasis (100 m und 200 m u. NN), Lage des Salzstockes und des Profilschnittes, /SCH 95/ .....	212
Abb. I. 2.2	Hydrogeologischer Schnitt durch das Modellgebiet (überhöht) nach /SCH 95/.....	213
Abb. I. 2.3	Modellaufbau, 10-fach überhöht.....	214
Abb. I. 3.1	Konzentrations- und Geschwindigkeitsfeld nach 250 000 Jahren (oben: 10-fach überhöht, unten: Ausschnitt, ohne Überhöhung).....	216
Abb. I. 4.1	Geschwindigkeitsfeld und Ort des Radionuklid-Einstroms.....	216
Abb. I. 4.2	Konzentrationsprofile [Bq/m <sup>3</sup> ] von Cs-135 zu ausgewählten Zeitpunkten unten: Nuklideinstrom aus dem Nahfeld (Spaltprodukte), rot: Cs-135 .....	220
Abb. I. 4.3	Konzentrationsprofile von I-129 (links) und Np-237 (rechts) zu ausgewählten Zeitpunkten .....	221
Abb. I. 4.4	Konzentrationsprofile von Radionukliden der Uranzerfallsreihe, jeweils nach 1 000, 1 Mio., 5 Mio und 20 Mio Jahren .....	223
Abb. I. 4.5	X: Ort, an dem maximale Radionuklidkonzentrationen ermittelt wurden .....	225



Abb. J. 2.1	Illustration des 3D-Süßwassermodells – Serie von Nordwest-Südost-Schnitten.....	232
Abb. J. 2.2	Berechnete Grundwasserneubildungsraten vor und nach Kalibrierung.....	233
Abb. J. 2.3	Beispiele für berechnete Fließpfade .....	234
Abb. J. 3.1	Lage der Prinzipmodelle 3D-PM1.x und 3D-PM2.0 .....	241
Abb. J. 3.2	Beispiel für die berechnete Salzausbreitung.....	243



## Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Liste der Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ in Braunschweig .....	3
Tab. 1.2	Autorinnen und Autoren, sowie Themen der Vorträge zum Workshop „Grundsatzfragen Hydrogeologie“ .....	4
Tab. I. 2.1	Hydrogeologische Parameter für das Modellgebiet .....	214
Tab. I. 4.1	Transportparameter für Sand, Schluff und Ton .....	217
Tab. I. 4.2	Die berücksichtigten Radionuklide und ihre Halbwertszeiten [a].....	218
Tab. I. 4.3	$K_d$ -Werte der betrachteten Elemente in $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ /SUT 98/.....	218
Tab. I. 4.4	Maximale Konzentrationen, Zeitpunkte ihres Auftretens, maximale Strahlenexposition und Verdünnungsfaktoren ausgewählter Radionuklide .....	225

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)