

# Geologie und Hydrogeologie des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben

HANS KLINGE<sup>1</sup>, ANGELIKA KÖTHE<sup>1</sup>, ROLF-RÜDIGER LUDWIG<sup>1</sup> & RAINER ZWIRNER<sup>2</sup>

Forschung, Endlagerung, radioaktiver Abfall, Bohrprofil, Salzstock, Deckgebirge, Känozoikum,  
Grundwasser, Hydrodynamik, zusedimentierte Rinne, Süßwasser, Salzwasser  
Niedersachsen, nordwestdeutsches Flachland, Gorleben  
TK25: 2833, 2834, 2835, 2933, 2934, 2935

## Kurzfassung

Der Salzstock Gorleben wird auf seine Eignung als Endlager für radioaktive Abfälle untersucht. In den Jahren 1979 bis 1999 wurde ein umfangreiches Bohr- und Untersuchungsprogramm zur Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Geologie der Deckschichten über dem Salzstock durchgeführt.

Der Salzstock Gorleben erreichte in der Kreide das Diapirstadium. Ab dem Oberpaläozän wurde eine fast lückenlose Abfolge vorwiegend tonig-schluffiger mariner Sedimente abgelagert. Die Schichten sind über dem Salzstock reduziert bei gleichzeitig erhöhter Mächtigkeit in den Randsenken. Mit dem Jungtertiär erfolgt ein Wechsel zu brackisch bis kontinentalen Faziesbedingungen, in denen Quarz- und Glimmersande sowie dunkle tonige Schluffe und vereinzelt Braunkohlenflöze das Profil bestimmen. Die Schichtenfolge endet im Untermiozän. Auf dem Salzstock fehlt das Neogen.

Im Quartär beginnen wiederum andere Sedimentationsverhältnisse. Bis auf präglaziale Ablagerungen des Menap bis Cromer über dem westlichen Salzstock dominieren seit der Elster-Kaltzeit Sand, Geschiebemergel und Beckensedimente die Schichtenfolge. Die größten Mächtigkeiten erreicht das Quartär in der elsterkaltzeitlich angelegten Gorlebener Rinne mit >300 m. In deren tiefsten Bereich wurden die alttertiären Sedimente vollständig erodiert. Nach der Verfüllung der Rinne in der Holstein-Warmzeit wurde das Gebiet noch dreimal vom Inlandeis überfahren, ohne dass Erosion und Sedimentakkumulation die Dimension der Elster-Kaltzeit erreichten.

Hydrogeologisch lassen sich die tertiären und quartären Deckschichten in einen durch tertiäre Sande und elsterzeitliche Sande und Kiese gebildeten unteren Aquifer und einen oberen Aquifer in den saale- und weichselzeitlichen Ablagerungen gliedern. Die Gorlebener Rinne ist in Hinsicht auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Salzstock von besonderer Bedeutung. Im Zentrum der Rinne kommt es aufgrund des direkten Kontaktes zwischen dem Zechsteinsalinaren und dem unteren Aquifer zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer. Basierend auf der gegenwärtigen Süß-/Salzwasser-Verteilung lassen sich folgende zwei Ausbreitungspfade dieser Salzwässer definieren: a) Ein lateraler Austrag von hochkonzentrierten Salzwässern in die nordwestliche Randsenke, in der sich die Wässer aufgrund ihrer erhöhten Dichte an der Aquiferbasis sammeln; b) ein vertikaler Salzwasseranstieg in den oberen Grundwasserleiter infolge lokal erhöhter Durchlässigkeiten innerhalb des überlagernden Grundwassergeringleiters. Diese Salzwässer erreichen in der Elbeniederung die Grundwasseroberfläche.

## [Geology and Hydrogeology of the Cover Sediments above the Gorleben Salt Dome]

### Abstract

The Gorleben salt dome is being investigated for its suitability as a repository for radioactive wastes. The cover deposits above the Gorleben salt dome were investigated within the framework of a comprehensive geological and hydrogeological site programme from 1979 to 1999.

The Gorleben salt intrusion attained the diapir stage during the Cretaceous. An almost complete sequence of principally clayey-silty marine sediments from the Upper Paleocene onwards is preserved. The strata are thinner over the diapir and thicker in the surrounding subsidence areas. In the early Tertiary the facies became brackish to continental, with the profile containing quartz and mica sands, dark clayey silts and occasional lignite seams. The strata sequence ends in the Lower Miocene. Neogene strata are not present above the diapir.

New sedimentation conditions began in the Quaternary. Apart from Menapian to Cromerian deposits above the western part of the diapir, the strata deposited since the Elsterian glacial stage are dominated by sand, till and glacial lake sediments. The maximum thickness of Quaternary deposits is >300 m in the Gorleben Channel (Gorlebener Rinne), which was formed during the Elsterian. In the deepest part of the channel, the late Tertiary sediments have been eroded completely. After the channel was filled during the Holsteinian Interglacial it was covered on three occasions by inland ice sheets, but with less erosion and sedimentation than during the Elsterian.

Hydrogeologically the Quaternary and Tertiary sediments can be divided into a lower aquifer of Tertiary sands and Quaternary gravel deposits and an upper aquifer of Saalian and Weichselian sediments separated by aquitards. The area of the Gorleben channel is of particular interest for the long-term safety of the planned repository. In the central part of the channel, the lower aquifer directly overlies the cap rock or is in contact with the salt itself. Brines are found in these areas.

On the basis of the present distribution of salt concentration in this particular area, two flow paths of saline water have been identified: a) Lateral transport of brines into the rim syncline to the northwest of the salt dome. This salt water collects at the base of the aquifer system due to its higher density. b) Vertical flow of saline water into the upper aquifer as far as the surface due to locally elevated vertical permeabilities of the aquitard overlying the lower channel aquifer.

## Einleitung

Im Rahmen der Untersuchungen des Salzstocks Gorleben im Hinblick auf die Eignung als Endlager für radioaktive Abfälle

begann im Jahre 1979 ein umfangreiches Bohr- und Untersuchungsprogramm zur Erkundung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Geologie der Deckschichten über dem Salzstock. Hauptziele dieses Programmes waren:

- die Erkundung und Beschreibung des geologischen Aufbaues des Deckgebirges sowie dessen geologischer Entwicklung in der jüngeren Erdgeschichte,
- die Untersuchung der Grundwasserdynamik in den Deckschichten über dem Salzstock und seiner Umgebung, sowie
- die Definition möglicher Ausbreitungspfade aus dem Salzstock in die Biosphäre.

<sup>1</sup> Dr. H. Klinge, Dr. A. Köthe, R.-R. Ludwig, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stillweg 2, 30655 Hannover; h.klinge@bgr.de, a.koethe@bgr.de, r.ludwig@bgr.de

<sup>2</sup> R. Zwirner, Golder Associates, Vorbruch 3, 29227 Celle, celle@golder.com

Im Zeitraum von 1979 bis 1986 erfolgten die Untersuchungen zunächst in einem 350 km<sup>2</sup> Gebiet, dessen Nordgrenze die Elbe bildete. In den Jahren 1996 bis 1999 wurden die Arbeiten dann auf die nördlich anschließende, in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg gelegene, Elbe-Löcknitz-Niederung ausgedehnt. In dem flachen nahezu aufschlussfreien insgesamt 475 km<sup>2</sup> großen Erkundungsgebiet bilden Bohrungen und Grundwassermessstellen die wesentliche Informationsbasis. Insgesamt wurden 184 Aufschlussbohrungen mit Tiefen von meist 200 bis 450 m abgeteuft sowie 404 Grundwassermessstellen an 166 Lokationen erstellt.

Der vorliegende Artikel gibt einen Überblick über die wesentlichen Ergebnisse dieses Erkundungsprogrammes. Der Schwerpunkt liegt bei der Darstellung der känozoischen Schichtenfolge und deren Lagerungsverhältnisse sowie bei der Erläuterung der Süß-/Salzwasserverteilung und den sich hieraus ergebenden Schlussfolgerungen in Hinblick auf die Salzwasserbewegung im Umfeld des Salzstocks.

Im Verlauf des mehr als zwanzigjährigen Bearbeitungszeitraumes waren neben den Autoren weitere nachfolgend aufgeführten Mitarbeiter der BGR maßgeblich an der wissenschaftlichen Bearbeitung beteiligt: Ashgar Baharian-Shiraz, Jens Boehme, Klaus Fielitz, Wilfried Giesel, Christoph Grisse-mann, Siegfried Keller, Johannes Kopitz, Helmut Müller, Norbert Ochmann, Klaus Schelkes, Friedrich Schildknecht, Gerhard Schmidt, Bernt Soefner, Jaqueline Strahl, Hellmut Vierhuff, Wolfgang Weiß und Max Zirngast.

**Schichtenfolge und Lagerungsverhältnisse**

**Mesozoikum**

In der Kreide erreicht die Entwicklung der Salzstruktur Gorleben-Rambow das Diapistadium. Zu Beginn des Tertiärs entspricht die Form des Salzstocks Gorleben nach struktureologischen Analysen (ZIRNGAST 1991) weitgehend der heutigen Ausbildung. Während in den Randsenken eine ca. 1000 m bis 3000 m mächtige mesozoische Schichtenfolge ausgebildet ist, fehlt diese auf dem Salzstock Gorleben bis auf wenige geringmächtige Erosionsreste von Gesteinen der Kreide vollständig.

**Tertiär**

Die Gliederung der Schichtenfolge basiert hauptsächlich auf der Biostratigraphie, der Lithostratigraphie und der Log-Korrelation (Gamma-Ray und Density). Die tertiären Schichten, die zu etwa 50 % der Schichtenfolge kalkfrei und insbesondere im unteren Tertiär von monotonen Tonabfolgen geprägt sind, konnten nur durch den Einsatz der Biostratigraphie detailliert analysiert werden. Insgesamt wurden ca. 2600 Proben datiert. Die biostratigraphischen Einstufungen wurden je nach Fazies, Petrographie und Kalkgehalt mit verschiedenen Mikrofossilgruppen (Foraminiferen, Dinoozysten, Kalknanno-plankton, s. Abb. 1) durchgeführt.

Die tertiäre Schichtenfolge wird neben der großräumigen regionalen Position des Untersuchungsgebietes am Südrand des nordwesteuropäischen Tertiärbeckens deutlich von der halokinetischen Entwicklung der Salzstruktur Gorleben-Rambow beeinflusst. Während es in den beiderseitigen sekundären Randsenken zu einer starken Mächtigkeitszunahme der tertiären Sedimente kam, sind die Ablagerungen über der Salzstruktur in ihrer Mächtigkeit reduziert.

In den Randsenken ist eine Schichtenfolge vom Oberpaläozän bis zu den untermiozänen Oberen Braunkohlensanden abge-

Serie	Lithostratigraphie (Gorleben)	Foraminiferen	Kalknanno-plankton	Dinoozysten	max. Mächtigkeit				
					RS	ST			
MIOZÄN	Alter in Mio J.								
	16,4								
	UNTER	Ob. Braunk.-s., tmiB52			ob. Mittel- bis mittl. U.-Miozän	24	-		
		Hamburg-Ton tmiHT				102	66		
	Untere Braunkohlensande tmiB51			D16	130	62			
23,8									
OLIGOZÄN	OBER	Neochatt-Schichten toloN			D15	41	14		
		Eochatt-Schichten toloE	V. crista A. osnabrug-ensis P. oblonga Ast. g. guerichi	NP 25		109	34		
	UNTER	Rupelton toIRT		Ob. Rupel	NP 24	D14	203	76	
				Unt. Rupel	NP 23				
		Neuengamm. Gass., toIN			NP 22				
33,7					D13	12	8		
EOZÄN	OBER	Ober-Eozän-Schichten teoo	"Latdorf"	"Latdorf"	NP 21	D12	102	49	
	MITTEL	Mittel-Eozän-Schichten teom				NP 17	D11	74	46
						NP 16	D10		
						NP 15	D9		
						NP 13/14			
	49,0		Brüssel-Sand teomB					58	47
	UNTER	Unter-Eozän-Schichten teou		Unter-Eozän 4	NP 12	D8	nb	190	75
				Unter-Eozän 3					
				Unter-Eozän 2					
54,8		Gartow-Sand, teouG			D7	nb			
					D6	na			
					D5	nb	10	12	
PALÄOZÄN	OBER	Ober-Paläozän-Schichten tpao			D4	nb	40	54	
60,9									
U.	U.-Paläozän-Sch., tpau	Ober-Dan			D3	nb	-	1	

Abk.: A. = Almaena, Ast. g. = Asterigerina guerichi, P. = Palmula, V. = Vaginulinopsis

Sand	Datierung sicher	Schichtlücke
Schluff	Datierung unsicher	RS = NW-Randsenke
Schluff bis Ton	keine Datierung	ST = Salzstock Gorleben
Ton	nicht untersucht	

Abb. 1: Biostratigraphische und lithostratigraphische Gliederung des Tertiärs.

Fig. 1: Biostratigraphic and lithostratigraphic subdivision of the Tertiary.

lagert worden, auf dem Salzstockdach sind Schichten des Unterpaläozäns bis Oberoligozäns erhalten.

Die bio- und lithostratigraphische Gliederung zeigt die Abbildung 1. Unterpaläozäne Tone von geringer Mächtigkeit (1 m) wurden nur in einer Bohrung auf dem Salzstock nachgewie-

sen. Großflächig sind tonig/schluffige Sedimente des Oberpaläozäns vorhanden, die in den liegenden Metern stärker feinsandig und glaukonitisch ausgebildet sind. Eine Schichtlücke von 1-2 Mill. Jahre trennt – wie auch im übrigen Norddeutschland – die Sedimente des Paläozäns und des Eozäns. Das Untereozän beginnt mit einer transgressiven klastischen Einschüttung von schluffigen, kalkfreien, glaukonitischen Feinsanden, dem Gartow-Sand. Im Hangenden folgen monotone Ton/Schluff-Folgen des Untereozäns, die auf dem Salzstock weitflächig verbreitet sind. An der Basis des Mittel-eozäns folgt mit einem scharfen lithofaziellen Wechsel der Brüsselsand. Dieser besteht im allgemeinen aus ton- bis schluffarmen, kalkhaltigen, glaukonitischen Feinsanden mit vereinzelt Einschaltungen von Kalksandsteinbänken. Darüber folgen in monotoner lithofazieller Ausbildung feinsandarme Tone und Schluffe der Mittel- und Obereozän-Schichten.

Die Ablagerungen des Paläozäns und Eozäns sind mehr oder weniger geschlossen auf dem Salzstock verbreitet. Dabei wechseln die Mächtigkeiten (ca. 10 m bis 110 m) stark. Dies ist primär u. a. durch Salzaufstieg und Subrosion und sekun-

där durch Erosionen während des Tertiärs und vor allem während des Quartärs verursacht.

An der Basis des Unteroligozäns liegen schluffige, kalkfreie, glaukonitische Feinsande, die Neuengammer Gassande. Darüber folgt das mächtige Schichtpaket der Schluffe und Tone des Rupeltons. Mit dem Oberoligozän setzt eine allmähliche Kornvergrößerung ein. Die Eochatt-Schichten beginnen mit tonigen und oben feinsandigen Schluffen. Darüber folgen Neochatt-Schichten in sandiger Fazies mit zum Hangenden abnehmenden Schluffgehalten. Oberoligozäne Schichten sind südlich der Elbe auf der Salzstruktur nur an deren Rändern (s. Abb. 3) verbreitet. Nördlich der Elbe, im Übergangsbereich zum Salzstock Rambow, treten sie auch in zentralen Bereichen innerhalb einer Scheitelgrabenstörungszone auf.

Mit Beginn des Miozän vollzieht sich regional ein paläogeographischer Umbruch, es setzen kontinental bestimmte Faziesbedingungen ein. Die Sedimentation beginnt mit den Unteren Braunkohlensanden, an deren Basis häufig ein dem „Unteren Glimmertone“ des Vierland ähnlicher bis zu 6 m mächtiger Schluffhorizont ausgebildet ist. Die darüber folgenden Braunkohlensande können in einen unteren, meistens feinsandigen und in einen oberen, vorwiegend mittelsandigen, z. T. grobsandigen Bereich mit 1 bis 3 m mächtigen eingelagerten Braunkohlenflözen untergliedert werden. Ein oberer, etwa 10 m unterhalb des hangenden Hamburg-Tons auftretender Flözhorizont hat in den Randsenken mit Ausnahme der Bereiche quartärer Erosion eine fast geschlossene Verbreitung und wird mit dem 3. Lausitzer Flözhorizont parallelisiert.

Die miozäne Schichtenfolge wird zumeist mit den Ablagerungen des Hamburg-Tons abgeschlossen. Dieser beginnt mit einer etwa 10 m bis 20 m mächtigen kompakten Ton/Schluff-Bank, überlagert von einer mehrfachen Wechselfolge von Tonen, Schluffen und Fein- bis Mittelsanden. Untere Braunkohlensande und Hamburg-Ton sind vor allem im Gebiet der NW-Randsenke und am Südwestende des Salzstocks Gorleben verbreitet. Südwestlich des Salzstocks sind die Vorkommen infolge quartärzeitlicher Erosion sehr lückenhaft. Im Bereich der NW-Flanke der NW-Randsenke sind als bisher jüngstes nachgewiesenes Schichtglied des Tertiärs Obere Braunkohlensande erhalten geblieben.

An den Salzstockflanken sind die tertiären Gesteine aufgeschleppt. Dieser Ringwall oder Hebungskranz ist auf der SE-Flanke deutlicher ausgebildet. Der Dachbereich der Salzstruktur ist durch eine Aufwölbung der Tertiärbasis bis auf Werte zwischen -250 m und -140 m NN gekennzeichnet (Abb. 3).

Nördlich der Elbe sind auf den zentralen Bereichen der Salzstruktur oberoligozäne und untermiozäne Schichten erhalten geblieben. Nach den Ergebnissen der Flachseismik, gestützt durch die erbohrte Schichtenfolge in den Strukturbohrungen, wird dieser Bereich als zentraler Scheitelgraben gedeutet. An mehreren, etwa parallel verlaufenden Störungen sinken die oberoligozänen bis untermiozänen Sedimente zum Grabentiefsten um ca. 100 m bis 120 m gegenüber dem randlichen Hebungskranz ein. Die Störungen sind bei der Aufdomung durch Dehnungsstress entstanden.

Quartär

Die quartären Ablagerungen folgen mit einem zeitlichen Hiatus von ca. 14 Mio. Jahren über den tertiären Schichten. Verbreitung und Lagerungsverhältnisse der Sedimente werden nicht mehr durch halokinetische Strukturen im Untergrund, sondern von erosiven, akkumulativen und eistektonischen Prozessen im Zuge der nordischen Inlandvereisungen geprägt.

Alter in ka BP	Stratigraphie		Lithologie	max. Mächtigkeit
11,6 117 128 240 370 480 780 1070 2600	<b>HOLOZÄN</b>		Flugsand, Dünen, Auelehm, Auesand, Niedermoortorf,	5 7
	Weichsel-Kaltzeit	Jüngere Niederterasse	Flußsand	18
		Ältere Niederterasse		19
	Eem-Warmzeit		Schluffmudde	4
	Saale-Kaltzeit	Warthe-Stadium	Schmelzwassersand, Beckenschluff	58
			Geschiebemergel	58
		Jüngeres Drenthe-Stadial	Schmelzwassersand, Beckenschluff	52
			Geschiebemergel	52
		Drenthe-Stadium	Schmelzwassersand, Beckenschluff	142
	Älteres Drenthe-Stadial	Geschiebemergel	99	
	Dömnitz-Warmzeit	nicht nachgewiesen		
Fuhne-Kaltzeit		Flußsand, Schluff	13	
Holstein-Warmzeit		Schluff, Ton, Mudde teilweise Sand und Torf	33	
Elster-Kaltzeit	Jüngeres Elster (Elsterspät-glazial)	Sand	50	
		Lauenburger Ton-Komplex Ton, Schluff, Feinsand	149	
	Haupt-Elster	Schmelzwassersand und -kies ("Rinnensand") Geschiebemergel Schmelzwassersand und -kies ("Vorschüttensand") selten Beckenschluff	108 69 65	
Cromer-Komplex	Bilshausen-Warmzeit	Wechsellagerung von Schluff, Mudde, Torf und Sand	24	
	Rosmalen-Warmzeit			
	Hunteburg-Warmzeit			
	Osterholz-Warmzeit			
Bavel-Komplex	Leerdam-Warmzeit	33		
	Bavel-Warmzeit			
Menap-Kaltzeit		Flußsand	69	
Prämenap	Schichtlücke			

Abb. 2: Stratigraphische und lithologische Gliederung des Quartärs.  
Fig. 2: Stratigraphic and lithological subdivision of the Quaternary.

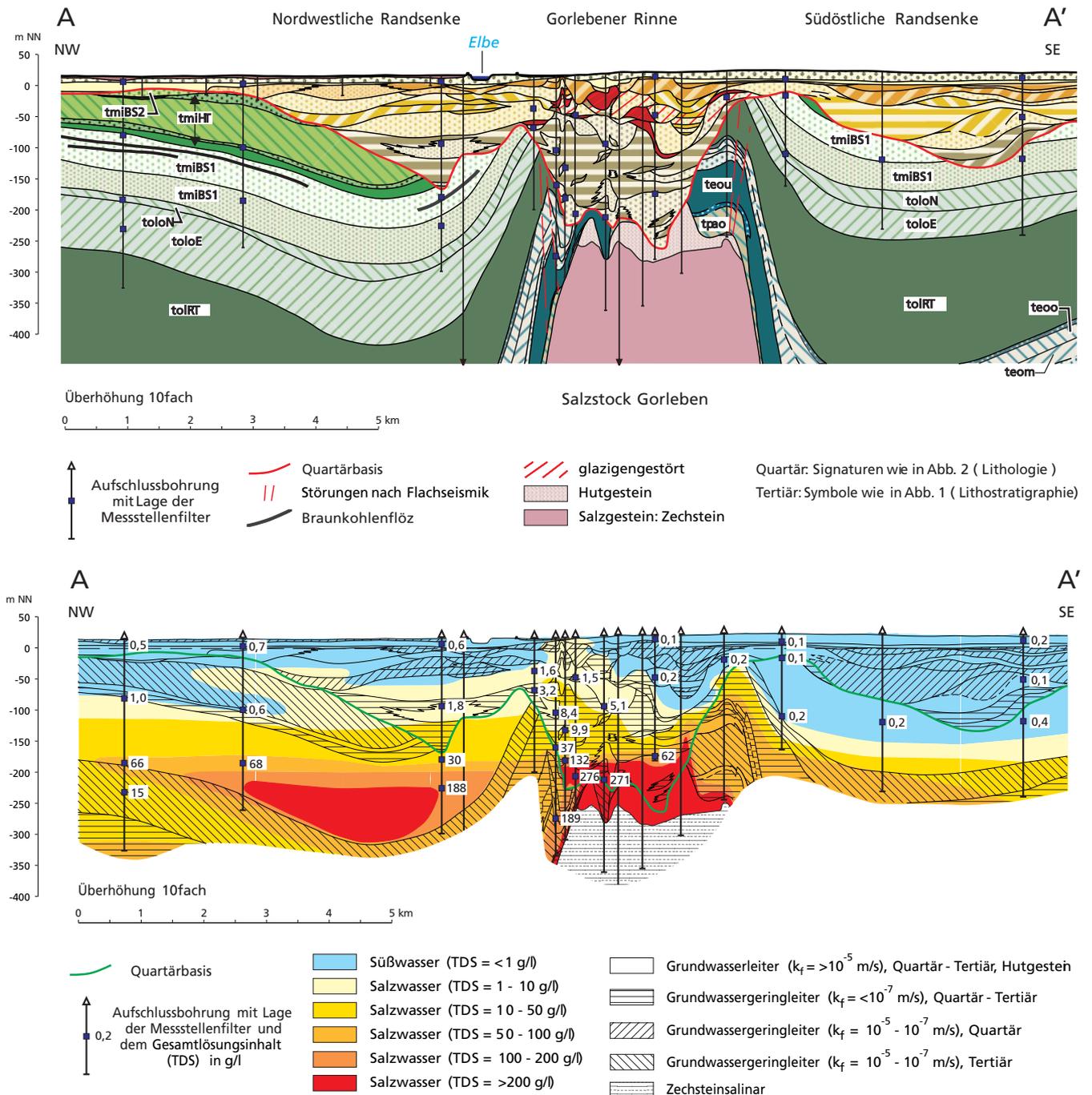


Abb. 3: Geologischer und hydrochemischer Profilschnitt (Lage der Profilschnitte s. Abb. 5).

Fig. 3: Geological and hydrochemical cross sections across the Gorleben salt dome (location of profile shown in Fig. 5).

Die Quartärbasis ist eine polygenetisch entstandene diskordante Fläche, in der Bereiche mit Hochlagen (höher -20 m NN) und rinnenförmige Vertiefungen bis unter -280 m NN wechseln. Im Rinnentiefsten werden Schichtmächtigkeiten von ca. 320 m erreicht. Die Anlage der Rinnen erfolgte während der Elster-Kaltzeit durch subglaziale, untergeordnet exarative Ausräumung.

Der quartäre Sediment-Komplex besteht allgemein aus einer Wechselfolge von Schmelzwassersanden, Geschiebemergeln und Beckenbildungen (Tone, Schluffe und Feinsande). Zwi-

schen den Ablagerungen der Elster- und Saale-Kaltzeit schalten sich Bildungen der Holstein-Warmzeit ein. Die lithologisch vielfältige Schichtenfolge konnte aufgrund biostratigraphischer Untersuchungen (Pollenanalyse, ca. 2200 Proben) und lithostratigraphischer Methoden (Geschiebe- und Geröllzählungen ca. 1550 Proben, Schwermineralanalysen, ca. 120 Proben) gegliedert werden (s. Abb. 2).

Die ältesten quartären Ablagerungen sind fluviatile, partienweise kiesführende Mittel- bis Grobsande der Menap-Kaltzeit. Im Hangenden folgen Sedimente des Bavel- und des Cromer-

Komplexes. Die stratigraphische Gliederung und der Nachweis dieser präglazialen Schichtfolgen, insbesondere der warmzeitlichen Bildungen erfolgten mittels der Pollenanalyse (MÜLLER 1986, 1992). Insgesamt wurden sieben Warmzeiten unterschieden, die Bavel- und die Leerdam-Warmzeit aus dem Zeitraum des Bavel-Komplex sowie die Osterholz-, die Hunteburg-, die Rosmalen-, die Bilshausen- und eine unbenannte Warmzeit aus dem Cromer-Komplex. Zur Ablagerung kam eine Wechselfolge von Schluffmudden, schluffigen Feinsanden und seltener geringmächtigen Torfen. Dazwischen sind kiesarme Mittel- bis Grobsande eingeschaltet, die den kaltzeitlichen Anteil der Schichtenfolge repräsentieren. Die Sedimente des Menap bis Cromer liegen in einem zusammenhängenden Areal über dem westlichen zentralen Bereich des Salzstocks Gorleben. Sie kamen vermutlich in einem Flachsee zur Ablagerung, dessen Boden sich langsam und außerordentlich gleichmäßig absenkte. Diese Absenkung wurde über den Zeitraum des Bavel- bis Cromer-Komplex durch Sedimenteintrag ausgeglichen (MÜLLER 1986).

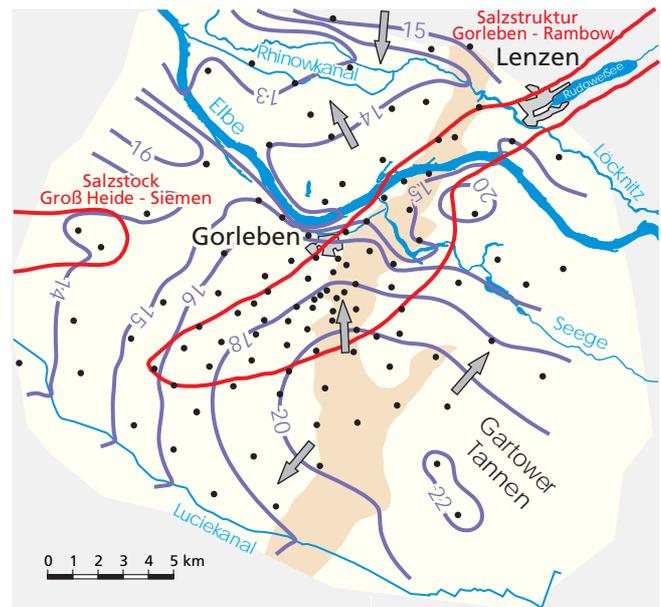
Der glaziale Sedimentationszyklus beginnt mit elsterzeitlichen Schmelzwassersanden und Geschiebemergeln, die in ihrer Verbreitung an die tiefen Rinnen gebunden sind. Die größte zusammenhängende Eintiefung ist die in NNE-SSW-Richtung verlaufende Gorlebener Rinne, die den Salzstock Gorleben über eine Länge von etwa 10 km quert. Im tiefsten Bereich der Gorlebener Rinne (unter -200 m NN) sind auf dem Salzstock die tertiären Sedimente über eine Erstreckung von ca. 5 km und in einer Breite von ca. 1 km bis 1,5 km vollständig erodiert. Elsterzeitliche Sedimente, zumeist Schmelzwassersande, überlagern hier direkt das Hutgestein bzw. stellenweise das Salinar (Abb. 3). Im tiefsten Teil der Rinne kamen zunächst kiesige Mittel- bis Grobsande zur Ablagerung. Zum Hangenden werden diese Sande feinkörniger, zuerst werden Mittelsande und später Feinsande sedimentiert.

Die elsterzeitlichen Geschiebemergel, überwiegend Reste der Grundmoräne des elsterzeitlichen Haupteisvorstoßes, waren ursprünglich flächenhaft verbreitet, liegen aber heute größtenteils nur noch in Form von Erosionsresten in den quartären Rinnen vor. Im Bereich der Gartower Rinne sowie im südwestlich gelegenen Bereich des Salzstocks Gorleben (im Hangenden der präglazialen Sedimente) befinden sich zusammenhängende größere Gebiete.

Zum Hangenden erfolgte die Auffüllung der Rinnen mit den vorwiegend aus Schluffen und Tonen bestehenden Ablagerungen des Lauenburger Ton-Komplexes (s. Abb. 3). Diese Schichtenfolge tritt teils in kompakt-homogener Ausbildung in Form von mächtigen Ton/Schluff-Paketen auf, anderenorts ist sie durch einen raschen lateralen und vertikalen Fazieswechsel zwischen Ton, Schluff und Sand gekennzeichnet.

In den nicht vollständig verfüllten Hohlformen der Rinnen kamen in der darauffolgenden Holstein-Warmzeit Schluffe und Mudden, häufig mit auffallend olivgrüner Farbe, in limnisch bis limnisch-fluviatiler Fazies zum Absatz. Selten treten Zwischenlagen von Fein- bis Mittelsand auf. Etwa z. Z. des Klimaoptimums erfolgte ein Meeresvorstoß der Holstein-See über das Untere Elbe-Gebiet bis in den Raum von Gorleben.

Gegenüber den an die Rinnen gebundenen elsterglazialen und holsteinzeitlichen Schichtfolgen sind die saalezeitlichen Ablagerungen flächenhaft verbreitet. Während der Saale-Kaltzeit ist das Inlandeis dreimal über das Untersuchungsgebiet hinaus vorgestoßen. Die Basis und Mächtigkeit der Ablagerungen schwankt sehr stark. Die tiefsten Werte wurden mit ca. -155 m NN angetroffen. Die Tieflagen der Saalebasis werden von drenthezeitlichen Grundmoränen, Schmelzwasser- oder Beckenablagerungen eingenommen. Die Schichten des älteren



- 20— Grundwassergleichen (Stichtagsmessung 20. - 28.04.1998)
- Grundwassermessstelle
- Hydrogeologisches Untersuchungsgebiet Gorleben
- Gorlebener Rinne (tiefer-150m NN)
- ← Fließrichtung des Grundwassers

Abb. 4: Grundwassergleichenplan des oberflächennahen Grundwassers.  
Fig. 4: Groundwater table contours of near-surface groundwater.

ren und des jüngeren Drenthe-Stadials überlappen sich dabei stark. Warthezeitliche Ablagerungen werden weniger mächtig und sind etwa im Niveau bis -30 m NN, selten bis -50 m NN verbreitet.

Die Vorstöße des drenthestadialen Inlandeis haben verbreitet zu glazitektonischen Störungen der unterlagernden Schichten, insbesondere des oberen Teils des Lauenburger Ton-Komplexes und der Holstein-Schichten sowie des Hamburg-Ton in Gebieten mit hoch liegendem Tertiär geführt. Die Stauchungen reichen etwa 40 m bis 60 m unter die Saalebasis bzw. bis maximal 140 m unter Gelände. Besonders augenscheinlich und tiefgründig sind die glazitektonischen Störungen im Stauchungsgebiet des Hühbeck und dessen nicht abgrenzbarer südlicher Fortsetzung (s. Abb. 3). Nach glazitektonischen Untersuchungen (DUPHORN 1982) wurde die Hühbeckstauchmoräne während des älteren Drenthe-Stadials angelegt und vom jüngeren Drenthe-Vorstöß überprägt. Der Warthegeschiebemergel ist weniger mächtig und überdeckt diskordant die älteren saalezeitlichen Bildungen, ohne dass Lagerungsstörungen durch den warthezeitlichen Eisvorstoß zu erkennen sind.

Eemzeitliche Sedimente konnten nur in einer Bohrung pollenanalytisch nachgewiesen werden. Es handelt sich um feinsandige Schluffe.

Den Abschluss der pleistozänen Schichtenfolge bilden die fluviatilen Sedimente der weichselzeitlichen Niederterrasse, die im gesamten Untersuchungsgebiet verbreitet ist und ein wenig gegliedertes saalezeitliches Relief überschüttet. Geröllpetrographisch lässt sich der Niederterrasse-Komplex in eine ältere und eine jüngere Niederterrasse gliedern.

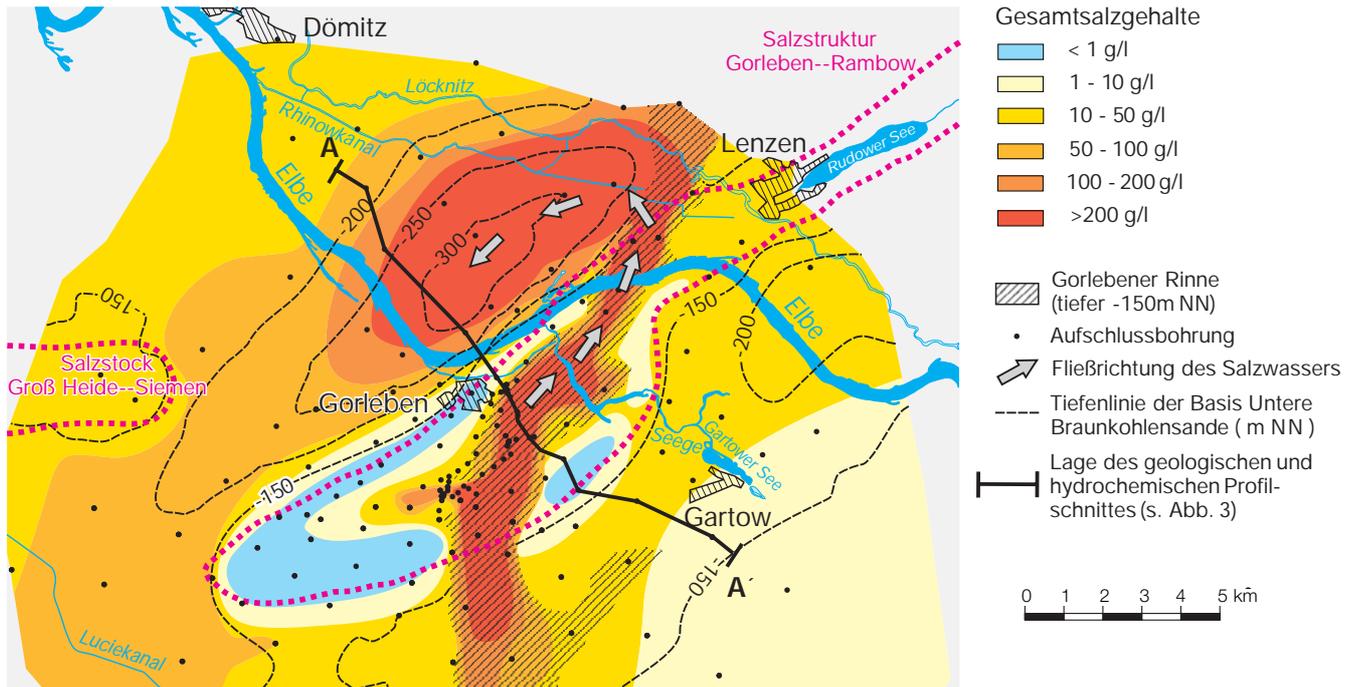


Abb. 5: Salzgehalte des Grundwassers an der Basis des unteren Aquifers.

Fig. 5: Groundwater salinity at the base of the lower aquifer.

Die jüngsten Ablagerungen bilden die an der Oberfläche anstehenden Sedimente des Holozäns. Sie sind als Auelehm, untergeordnet Auesand in der Elbaue flächenhaft verbreitet, Mudden und Torfe treten dagegen zurück. Morphologische Formen oder erhöhte Mächtigkeiten, die Hinweise auf subrosive Prozesse im oberflächennahen Bereich über der Salzstruktur geben könnten, waren ebenso wie in der Niederterrasse nicht zu erkennen.

### Hydrogeologischer Bau

Die tertiären und quartären Deckschichten bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und -geringleitern. Im Umfeld des Salzstocks Gorleben bildet die Oberfläche des Rupeltons (tolRT) die Basis des regionalen Fließsystems (Abb. 3). Diese flächenhaft verbreiteten Tone trennen dieses Aquifersystem von den im Allgemeinen hochversalzten tieferliegenden Aquiferen der Randsenken. Während die darüber lagernden gering durchlässigen tonigen Schluffe des Chatts nur von geringer Bedeutung für die Wasserbewegung sind, bilden die Unteren Braunkohlensande einen bedeutenden überregional verbreiteten Grundwasserleiter, der in den Randsenken um den Salzstock durchgängig verbreitet ist, wohingegen er über dem Salzstock fehlt. Die Unteren Braunkohlensande werden vom gering durchlässigen Hamburg-Ton überlagert.

Prägendes Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben ist die Gorleber Rinne (Abb. 3). In ihrem zentralen Bereich über dem Salzstock wurde der Rupelton, der den Salzstock ursprünglich flächenhaft überdeckte, weitestgehend erodiert, so dass die gut durchlässigen unteren Elster-Rinnensande in einer Kontaktfläche von mehreren km<sup>2</sup> unmittelbar dem Hutgestein, lokal auch Zechsteinsalzen aufliegen. Im Norden und Süden des Salzstocks Gorleben stehen die Sande mit den in den Randsenken verbreiteten Unteren

Braunkohlensanden in hydraulischem Kontakt. Die elsterzeitlichen Rinnensande werden vom gering durchlässigen Lauenburger Ton-Komplex überlagert. Die insgesamt wesentlich inhomogenere, vertikal wie lateral stark gegliederten Schichtenfolge der weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen – ist im Ganzen gesehen – als heterogener Grundwasserleiter einzustufen.

Hydrogeologisch lässt sich die über dem Salzstock und in den Randsenken verbreitete Schichtenfolge in ein oberes und ein unteres, durch Grundwassergeringleiter hydraulisch getrenntes, Hauptgrundwasserstockwerk gliedern. Untere Braunkohlensande und elsterzeitliche Rinnensande bilden einen im Norden und Süden des Salzstocks hydraulisch verbundenen unteren Aquifer, die weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen den oberen Aquifer. Beide Systeme werden durch die Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex getrennt. Die Trennschichten sind in der Gorleber Rinne sowie nördlich der Elbe lückenlos verbreitet, während im Südosten und Nordwesten größere Verbreitungslücken bestehen, so dass beide Aquifere hier in direktem Kontakt stehen.

### Oberflächennahe Grundwasserbewegung

Die großräumige hydrogeologische Situation ist geprägt durch die Lage im Elbeurstromtal. Das Grundwasser fließt generell von den Höhen der Geest den Niederungen zu. Hier wird der größte Teil des neu gebildeten Grundwassers oberirdisch in die Elbe abgeführt. Nur ein sehr kleiner Teil trägt zu einem elbtalabwärts gerichteten Grundwasserabfluss bei.

Die Geländeoberfläche im Gebiet von Gorleben weist nur sehr geringe Höhenunterschiede auf. Die maximale Höhendifferenz zwischen den Dünenfeldern der Gartower Tannen im Süden des Salzstocks (Abb. 4) mit einer Grundwasserneubildung von 160 mm/a und der Elbniederung im Norden beträgt

15 m. Die entsprechende Höhendifferenz des Grundwasserspiegels liegt bei lediglich 6 m. Das oberflächennahe Grundwasser strömt mit geringem Gefälle von 1 bis 1,5 ‰ radial von der Hochlage im Süden des Salzstocks in die umgebenden Senken ab.

**Das Süß-/Salzwassersystem**

**Einleitung**

Bereits in einer frühen Phase der Erkundung hat sich gezeigt, dass Grundwasser in Teilbereichen über dem Salzstock in direktem Kontakt mit dem Zechsteinsalinär 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 aus dem Salzstock ist eng mit der Frage der Salzwasserbewegung innerhalb des Deckgebirges verknüpft. Die Erkundung der räumlichen Verteilung von Süß- und Salzwasser im Aquifersystem bildete daher einen wesentlichen Schwerpunkt des Untersuchungsprogrammes. Hierzu wurden systematisch Grundwassermessstellen innerhalb salzwasserführender Sedimente errichtet und geophysikalische Bohrlochmessungen in Hinblick auf die vertikale Salinitätsverteilung ausgewertet (FIELTIZ & GIESEL 1991).

**Beschreibung der räumlichen Süß-/Salzwasser-  
verteilung**

Im Gebiet von Gorleben besteht eine Zweiteilung in einen oberen gering mineralisierten Süßwasserkörper wechselnder Mächtigkeit und einen unteren Salzwasserkörper unterschiedlicher Salinität. Eine vergleichbare vertikale Gliederung zeigt sich auch in der chemischen Zusammensetzung

der Grundwässer. Bei den Süßwässern handelt es sich vorwiegend um Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer. Lediglich in den oberflächennahen Grundwässern dominiert SO<sub>4</sub> gegenüber HCO<sub>3</sub> aufgrund der oberflächlichen Entkalkung der Sedimente. Im Übergangsbereich zwischen Süß- und Salzwässern führen Ionentauschvorgänge zur Bildung von Na-HCO<sub>3</sub>-Wässern. Die chemische Zusammensetzung der Salzwässer ist insgesamt sehr einheitlich. Es handelt sich durchweg um Na-Cl-geprägte Halit-Ablaugungswässer.

Abbildung 3 zeigt die Süß-/Salzwasser-Verteilung in einem Profilschnitt, der den Salzstock Gorleben und die umgebenden Randsenken in NW-SE-Richtung quert. Der Süßwasserkörper hat in der südöstlichen Randsenke, in der im Bereich des Profilschnittes der obere dem unteren Aquifer unmittelbar aufliegt, eine Mächtigkeit von bis zu 170 m. Die Süß-/Salzwasser-grenze verläuft hier durchgängig innerhalb des unteren Aquifers, wohingegen sie über der Gorlebener Rinne und in der nordwestlichen Randsenke wesentlich höher innerhalb der hier lückenlos verbreiteten Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton bzw. Lauenburger-Ton-Komplex, teilweise auch innerhalb des oberen Aquifers, verläuft.

Im unteren Aquifer der Gorlebener Rinne sind die Grundwässer aufgrund des direkten Kontaktes mit dem Zechsteinsalinär hochsalin. Die Salzgehalte reichen von ca. 100 g/l bis zur Salzsättigung von etwa 320 g/l. Im Zentrum der nördlichen Randsenke treten innerhalb des unteren Aquifers Solen mit vergleichbar hohen Salzgehalten auf. Die Oberfläche dieses Solenkörpers ist weitgehend horizontal ausgebildet, während seine Unterfläche an der Aquiferbasis verläuft. In den unterlagernden Schluffen des Eochatt weisen die Porenwässer dagegen deutlich niedrigere Salzgehalte auf.

Die Darstellung der räumlichen Verteilung der Gesamtsalzgehalte des Grundwassers an der Basis des unteren Aquifers in Abbildung 5 zeigt, dass die Verbreitung der Solen mit mehr als 200 g/l Gesamtsalzgehalt auf die Gorlebener Rinne und den zentralen, strukturell tiefsten Bereich der nordwestlichen

Tiefenlage der Süßwasserbasis

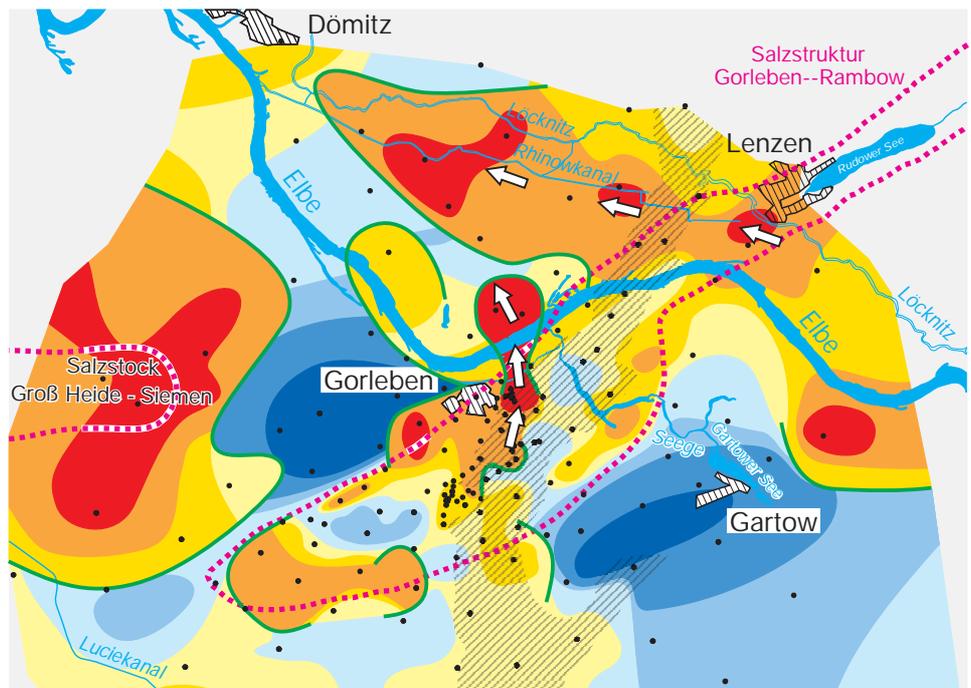
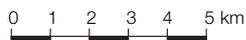
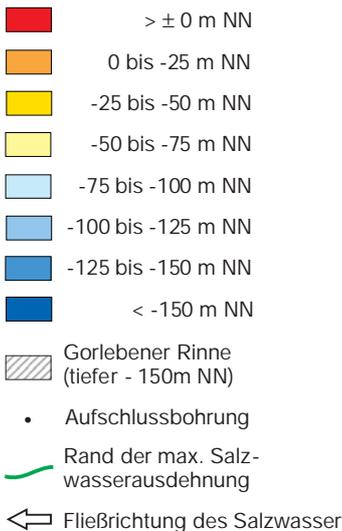


Abb. 6: Tiefenlage der Basis des Süßwasserkörpers.

Fig. 6: Depth to the base of fresh groundwater.

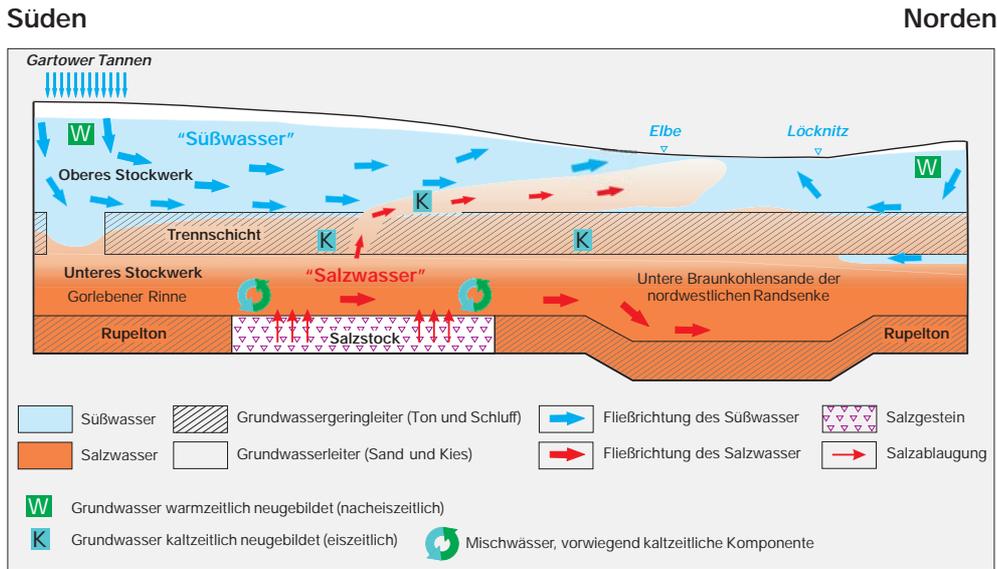


Abb. 7: Schema des Salzwasser-austrags aus der Gorlebener Rinne.

Fig. 7: Flow of brine from the Gorleben channel.

Randsenkenmulde beschränkt ist, wobei beide Bereiche in direkter Verbindung stehen. Insgesamt ist die Salinität der Salzwässer in der nordwestlichen Randsenke auch außerhalb des Verbreitungsbereichs dieser Solen mit Salzgehalten von 50 bis 100 g/l erheblich höher als in der südwestlichen Randsenke sowie über dem westlichen Teil des Salzstockes mit durchgehender Tonüberdeckung. Die Salinität der Wässer an der Aquiferbasis liegt dort mit Salzgehalten von weniger als 10 g/l bis etwa 30 g/l vergleichsweise niedrig; über dem Ringwall reicht der Süßwasserkörper verbreitet bis an die Basis des unteren Aquifers.

In Abbildung 6 ist die Tiefenlage der Unterfläche des Süßwasserkörpers dargestellt. Diese hat ein ausgeprägtes Relief, das Beziehungen sowohl zu regionalen hydrogeologischen Strukturen – insbesondere der Verbreitung der Grundwassergeringleiter – als auch zur regionalen Grundwasserbewegung erkennen lässt. 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 Aquifer besteht. Ausgesprochene Salzwasser-Hochlagen, in denen Salzwasser teilweise das gesamte Aquifersystem bis an die Grundwasseroberfläche ausfüllen, befinden sich westlich des Salzstocks Gorleben in einer über dem Salzstock Groß Heide-Siemen gelegenen Niederung, in der gesamten Flussniederung nördlich der Elbe sowie über der Gorlebener Rinne. Die Hochlage über der Gorlebener Rinne erstreckt sich in Nord-Süd-Richtung vom nordwestlichen Rand der Rinne im Osten Gorlebens bis nördlich der Elbe, wobei ihre Oberfläche von Süden nach Norden ansteigt und nahe der Elbe die Grundwasseroberfläche erreicht. (BROSE 1991, KLINGE et al. 2001). Im Süden dieser Versalzungszone wurden innerhalb des oberen Aquifers Salzgehalte von maximal 90 g/l ermittelt. Entsprechende Werte werden in der Gorlebener Rinne im Normalfalle erst in Tiefen von mehr als 100 m innerhalb des unteren Rinnenaquifers angetroffen. Die Mineralisation der Salzwässer verringert sich innerhalb dieser Salzwasserhochlage nach Norden hin bis auf Werte von 2 g/l bis 10 g/l im Bereich der Elbe.

### Schlussfolgerungen in Hinblick auf die Salzwasserbewegung im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben

In Hinblick auf die Fragestellung der Salzwasserbewegung im Deckgebirge des Salzstocks im Allgemeinen und des Salzwasseraustrags aus der Gorlebener Rinne im Besonderen lassen sich aus der Süß-/Salzwasser-Verteilung folgende Aussagen ableiten:

- Durch die Salzablaugung im Zentrum der Gorlebener Rinne kommt es zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer im unteren Rinnenaquifer. Die Verbreitung dieser hochversalzten Solen ist nicht nur auf die Gorlebener Rinne begrenzt, sondern sie umfasst auch den zentralen Bereich der nordwestlichen Randsenke, deren unterer Aquifer mit den elsterzeitlichen Rinnensanden der Gorlebener Rinne hydraulisch verbunden ist. Messungen der Porenwasserdrücke in Messstellen in der Gorlebener Rinne zeigen ein Druckgefälle innerhalb des Salzwässers in nördliche Richtung. Dies lässt darauf schließen, dass das nördlich gerichtete Süßwasserdruckgefälle in verringertem Maße auch auf das hochsaline Grundwasser übertragen wird (OCHMANN & FIELTZ 1993). Dies lässt auf einen Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne in den unteren Aquifer der nordwestlichen Randsenke schließen. Die charakteristische Form des Solenkörpers, d. h. seine weitgehend horizontale Oberfläche und seine konvex ausgebildete Unterfläche, ist durch das Zusammenwirken der um 15 bis zu 20 % höheren Dichte der Salzwässer im Vergleich zu Süßwasser und der Struktur der Randsenkenmulde zu erklären. Die Aquiferbasis im Zentrum der Mulde liegt um etwa zu 90 m unter dem Niveau der Basis der Gorlebener Rinne unmittelbar nördlich des Salzstocks. Salzwässer, die in der Gorlebener Rinne nach Norden transportiert werden, folgen daher nicht dem weiteren Verlauf der Rinne, sondern werden dem Gefälle der Aquiferbasis folgend nach Nordwesten zum Zentrum der Randsenke abgelenkt, wo sie sich aufgrund ihrer erhöhten Dichte an der Aquiferbasis sammeln (Abb. 5 und 7) (KLINGE et al. 1999). Eine andere prinzipiell mögliche Hypothese, nämlich eine Herkunft der Solen aus tiefen Wasser-

leitern im Liegenden, kann dagegen zweifelsfrei aufgrund der wesentlich geringeren Porenwässersalzgehalte in den liegenden Geringleitern ausgeschlossen werden.

Untersuchungen der Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopenzusammensetzung der Salzwässer in Verbindung mit Messungen der  $^{14}\text{C}$ -Gehalte, die eine Altersklassifizierung in pleistozän-kaltzeitlich und holozän-warmzeitlich entstandene Wässer ermöglichen, haben wesentlich zum Verständnis der Wasserbewegung in der Gorlebener Rinne beigetragen (SUCKOW 1994, RÜBEL 2000). Sie zeigen, dass die Solen in der Randsenke pleistozän-kaltzeitlichen Ursprungs sind. Innerhalb des unteren Aquifers der Gorlebener Rinne ist die Zusammensetzung der Wässer komplexer. Neben pleistozänen Solen wurden hier einzelne Salzwässer eindeutig holozänen Alters oder Mischwässer beider Wassertypen nachgewiesen. Die teilweise nacheiszeitliche Entstehung dieser Solen belegt einerseits, dass die rezente Wasserbewegung den unteren Rinnenaquifer erfasst, wobei die durch Ablaugung gebildeten Solen ursprünglich vorhandene pleistozäne Wässer verdrängen bzw. sich mit diesen mischen. Andererseits beschränkt sich die teilweise Verdrängung pleistozäner Solen durch junge holozäne Salzwässer bislang nur auf die Gorlebener Rinne selbst bzw. auf unmittelbar angrenzende Bereiche. Dies lässt auf einen insgesamt nur geringen Wasserdurchsatz durch den Rinnenaquifer seit dem Pleistozän schließen.

- Der den unteren Aquifer der Gorlebener Rinne flächenhaft überlagernde gering durchlässige Lauenburger Ton-Komplex verhindert prinzipiell den direkten Salzwasseraustrag

in den oberflächennahen Grundwasserleiter, jedoch existiert über der Gorlebener Rinne die beschriebene, lokal begrenzte Salzwasserhochlage mit außergewöhnlich hohen Salzgehalten. Die Erstreckung dieser Salzwasserhochlage in Richtung des regionalen Grundwasserabstroms und die außergewöhnlich hohen Salzgehalte in ihrem Wurzelbereich machen eine Verbindung dieser Wässer mit den hochsalinen Wässern des unteren Rinnenaquifers wahrscheinlich, auch wenn durch Erkundungsbohrungen im fraglichen Gebiet keine erhöhten vertikalen Durchlässigkeiten oder Verbreitungslücken im Lauenburger Ton-Komplex nachgewiesen wurden (BOEHME et al. 1995). Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich um Salzwässer aus dem unteren Rinnenaquifer, die über lokal begrenzte hydraulische Fenster in den oberen Aquifersystem aufströmen und in den Grundwasseraufstromgebieten der Elbeniederung in verdünnter Form an die Grundwasseroberfläche gelangen (Abb. 7).

Die oberflächennahen Salzwässervorkommen im Westen des Gebietes über dem Salzstock Groß Heide-Siemen ebenso wie in der Niederung zwischen Elbe und Löcknitz stehen dagegen nicht mit dem Salzstock Gorleben in der Verbindung. Bei diesen Salzwässern handelt es sich um Ablaugungswässer des Salzstocks Groß Heide-Siemen bzw. im Falle der Elbe-Löcknitz-Niederung um Salzwässer, die mit dem überregionalen Grundwasserabstrom elbeabwärts transportiert werden und im Übergangsbereich zwischen den Salzstrukturen Gorleben und Rambow aufgrund der verringerten Aquifermächtigkeiten über der Salzstruktur in den oberflächennahen Aquifer gelangen (KLINGE et al. 2001).

## Literatur:

- BOEHME, J., FIELITZ, K., v. HOYER, M., KLINGE H., KOPIETZ, J., LUDWIG, R., OCHMANN, N., SCHELKES, K., SÖFNER, B. & WERNICKE, W. (1995): Standortbeschreibung Gorleben-Süd – Hydrogeologie des Deckgebirges. – Unveröff. Ber., BGR, Archiv-Nr. 112693; Hannover.
- BROSE, F. (1991): Untersuchungen zum Auftreten örtlicher Versalzungen im oberflächennahen Grundwasser in der Umgebung des Salzstockes von Gorleben. – Dissertation, FU Berlin.
- DUPHORN, K. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben. – Abschlussbericht erstellt im Auftrag der PTB; Kiel/Braunschweig [Unveröff.], BGR-Archiv-Nr. 103714.
- FIELITZ, K. & GIESEL, W. (1991): Evaluation of groundwater salinity from well logs and conclusions of flow velocities of saline water. In: Hydrogeology of salt water intrusion: a report of the Commission on Hydrogeology of the International Association of Hydrogeologists: 397–410. – Hannover (Heise).
- KLINGE, H., BOEHME, J. & LUDWIG, R. (1999): Fresh-water/salt-water distribution in the aquifer system above the Gorleben salt dome: Results of the Gorleben site investigation programme. SWIM 15th Ghent. *Natuurwet. Tijdschr.* **Vol. 79**: 172–177.
- KLINGE, H., MARGANE, A., MRUGALLA, S., SCHELKES, K. & SÖFNER, B. (2001): Hydrogeologie des Untersuchungsgebietes Dömitz-Lenzen. – Unveröff. Ber., BGR, Hannover.
- MÜLLER, H. (1986): Altquartäre Sedimente im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben. – *Z. dt. geol. Ges.*, **137**: 85–95, 5 Abb.; Hannover.
- MÜLLER, H. (1992): Climatic changes during and at the end of the interglacials of the Cromerian Complex. – In: KUKLA, G. J. & WENT, E. [Hrsg.]: Start of a glacial: NATO ASI Series I (3): 51–69, 12 Abb.; Berlin/Heidelberg (Springer).
- OCHMANN, N. & FIELITZ, K. (1993): Estimation of horizontal and vertical groundwater flow from well logging and pressure data in groundwater of variable density above a salt dome. – In: E. CUSTODIO and A. GALOFRÉ (eds), Study and modelling of salt water intrusion into aquifers, Proc. 12th Salt Water Intrusion Meeting, Barcelona: 359–369.
- RÜBEL, A. (2000): Stofftransport in undurchlässigen Gesteinsschichten – Isotopenuntersuchungen im Grund- und Porenwasser – Dissertation, Universität Heidelberg.
- SUCKOW, A. (1994): Isotopenhydrologische und Edelgaspaläotemperatur-Untersuchungen im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben – Dissertation, Universität Heidelberg.
- ZIRNGAST, M. (1991): Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben – Ergebnis einer strukturgeologischen Bearbeitung. – *Geol. Jb.*, **A 132**: 3–31, 17 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Hannover.