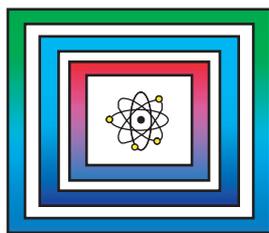


# F + E Endlagerung

9Y3213060000

## Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz

– Geologisches Referenzmodell  
für einen HAW-Endlagerstandort  
im Salz –



Technischer Bericht

Beitrag für das Projekt ISIBEL

Hannover, Juli 2007



Bundesanstalt für  
Geowissenschaften  
und Rohstoffe

Langzeitsicherheitsanalyse für ein  
HAW-Endlager im Salz  
- Geologisches Referenzmodell für einen  
HAW-Endlagerstandort im Salz -

Autor:	Dr. Siegfried Keller
Auftraggeber:	BGR
Auftragsnummer:	Beitrag für das Projekt ISIBEL
Datum:	31.07.2007 (überarbeitete Version vom 31.12.2005)
Tagebuchnummer:	11614/05
TK-Nummer:	2733, 2734, 2735, 2736, 2833, 2834, 2835, 2836, 2933, 2934, 2935, 2936, 3033, 3034, 3035, 3036

---

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Geologie am Referenzstandort	5
2.1 Präsalinärer Untergrund und Zechstein	6
2.2 Trias bis Oberkreide	8
2.3 Paläozän bis Untermiozän	8
2.4 Quartär	8
3 Entwicklungsgeschichte des Referenzstandortes (Salzstruktur Gorleben-Rambow)	11
4 Tektonische Verhältnisse am Referenzstandort	15
4.1 Störungsmuster	15
4.2 Vertikalbewegungen der Kruste ab dem jüngeren Tertiär	18
5 Geologie der Referenzsalzstruktur Gorleben-Rambow	20
5.1 Tertiär- und Quartärbedeckung	21
5.2 Hutgestein des Salzstocks Gorleben	21
5.3 Salzspiegel	23
5.4 Stratigraphie und Petrographie	25
5.4.1 Staßfurt-Folge	26
5.4.2 Leine-Folge	29
5.4.3 Aller-Folge	33
5.5 Aufnahmekapazität des Hauptsalzes für mögliche Endlagerbereiche	34
5.6 Internbau des Salzstocks Gorleben	35
5.7 Schächte	40
5.7.1 Schacht 1	40
5.7.2 Schacht 2	42
5.7.3 Frostrisse	43
5.8 Natürliche bruchhafte Diskontinuitäten	43
5.8.1 Klüfte	44
5.8.2 Zerrüttungszonen	45
5.8.3 Klüfte und Störungen in den Schächten	45
5.9 Fluide	46
5.9.1 Geochemische Systematik salinärer Lösungen	46
5.9.2 Ausbildung der Lösungsvorkommen	48
5.9.3 Lösungsvorkommen im Salzstock Gorleben	48
5.9.4 Chemismus der Lösungsvorkommen	49

---

Inhaltsverzeichnis	Seite	
5.9.5	Wassergehalte des Hauptsalzes	53
5.9.6	Kohlenwasserstoff-Vorkommen (KW)	54
5.9.7	Zutritte von Lösungen, Kondensaten und Gasen in den Schächten	56
5.9.8	Permeabilitäten in Lösungs- und Gasvorkommen	58
5.10	Subrosion des Salzstocks Gorleben	58
5.11	Zukünftige Entwicklung der Salzstruktur Gorleben	60
6	Hydrogeologie am Referenzstandort	61
6.1	Durchlässigkeitsbeiwerte und Pumpversuche	63
6.2	Oberflächennahe Grundwasserbewegung	63
6.3	Süß-/Salzwassersystem	64
6.4	Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodelle	68
7	Geomechanische Charakterisierung des Referenzstandortes	68
8	Relevanz der Inhalte des Referenzstandortmodells für die Langzeitsicherheitsanalyse	69
9	Zusammenfassung	70
	Literaturverzeichnis	72
	Tabellenverzeichnis	78
	Abbildungsverzeichnis	79

Gesamtblattzahl: 79

---

## Verkürzte Zusammenfassung

Autor:	Dr. Siegfried Keller
Titel:	Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz. – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz –
Stichwörter:	Geologie, Geochemie, Hydrogeologie, Referenzstandortmodell, Salzstock

Im Rahmen des Berichtes werden beispielhaft die möglichen Inhalte eines Referenzstandortmodells auf Basis der Untersuchungsergebnisse von einem geplanten Endlagerstandort in Deutschland vorgestellt. Sie sind Grundlage für die Betrachtung möglicher zukünftiger Entwicklungen im Rahmen von Szenarienanalysen, Abschätzung der Integrität von Barriersystemen oder Ausbreitungsrechnungen. Als wesentliche Punkte werden z. B. die geologische Entwicklung und der geologische Bau des Referenzstandortes beschrieben, Lösungs- und Fluidvorkommen angesprochen und die hydrogeologischen Verhältnisse erläutert.

## 1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“ (Kurztitel: ISIBEL) wird gemeinsam durch BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover), GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Braunschweig) und DBETEC (Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe, Technology mbH, Peine) ein Sicherheitsnachweiskonzept für ein HAW-Endlager im Salz erstellt.

Dazu ist der hypothetische Ist-Zustand mit den Teilen „Endlagerplanung“ und „Geologisches Standortmodell“ zu beschreiben. Der vorliegende technische Bericht (Pkt. 1.1 des ISIBEL-Arbeitsplans) erläutert die Inhalte eines geologischen Standortmodells als Basis für die Betrachtung möglicher zukünftiger Entwicklungen während des Nachweiszeitraums (hierzu: AkEND 2002) von einer Million Jahre im Rahmen von Szenarien- und Konsequenzenanalysen.

Auf Grund der exzellenten Datenlage durch die bisher durchgeführte Standorterkundung wird der Salzstock Gorleben als Modell für den Referenzstandort gewählt. Die umfangreichen Daten erlauben es, die Inhalte eines geologischen Standortmodells aufzuzeigen. Es werden allerdings nur die wesentlichen Elemente aufgeführt, da die Erstellung eines vollständigen Modells dem zukünftigen Sicherheitsnachweis für den endgültig zu wählenden Standort vorbehalten bleiben muss.

Das Referenzstandortmodell basiert im Wesentlichen auf der Arbeit von KELLER (2006), in der die zusammenfassenden Berichte von BORNEMANN et al. (2004); KLINGE et al. (2004); KÖTHE et al. (2003); ZIRNGAST et al. (2003) und SCHRAMM (2005) im Rahmen einer Szenarienanalyse für deutsche Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen schwerpunktmäßig ausgewertet wurden. Die Texte und die in diesen Arbeiten enthaltenen Karten und Profile geben einen detaillierten Einblick in die Lagerungsverhältnisse, den Schichtaufbau und die Entstehungsgeschichte der Gesteinsabfolgen, der Hydrogeologie sowie der Geochemie des Referenzstandortes.

## 2 Geologie am Referenzstandort

Die für das Referenzstandortmodell verwertete Salzstruktur Gorleben-Rambow mit den sie auf beiden Seiten begleitenden Randsenken erstreckt sich in SW-NE-Richtung über eine Länge von ca. 30 km. Die Salzstockoberfläche liegt durchschnittlich in Tiefen von –200 bis –300 m. Südwestlich der Elbe, im Bereich von Gorleben, hat die Salzstruktur eine Breite von ca. 3,5 bis 4 km (Salzstock Gorleben sensu stricto). Sie verengt sich

unmittelbar südlich der Elbe auf ca. 1,5 bis 2 km und beträgt bei Rambow wieder etwa 3,5 km (ZIRNGAST et al. 2003). Die Salzstruktur besteht damit aus dem südwestlich der Elbe gelegenen Salzstock Gorleben und dem nordöstlich der Elbe gelegenen Salzstock Rambow. Der schmalere Bereich zwischen der Elbe und Lenzen wird als Übergangsbereich zwischen den beiden Salzstöcken bezeichnet. Im gewählten Beispiel ist nur der Salzstock Gorleben als Standort für ein mögliches Endlager vorgesehen. Die regionale Erstreckung des Referenzmodellgebietes (entspricht dem System Fernfeld; vgl. Szenarienanalyse: KELLER 2006)) ist entsprechend der Ausdehnung des regionalen hydrogeologischen Modells (Abb. 1) gewählt.

## **2.1 Präsalinärer Untergrund und Zechstein**

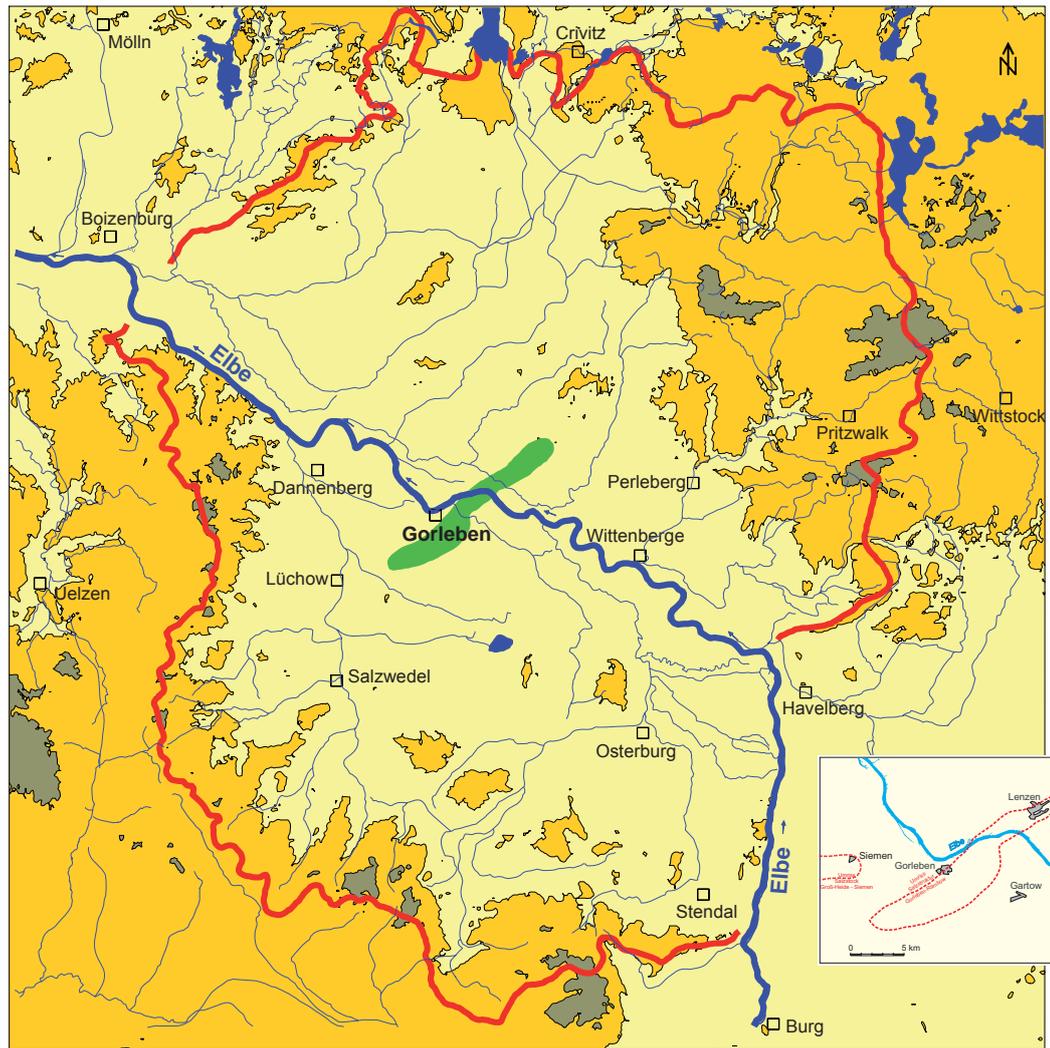
Die Gesteine des **präsalinaren Untergrundes** liegen etwa in Tiefen von unter 3000 bis 4000 m. Es sind Ablagerungen des Unter- und Oberkarbon sowie des vulkanitischen und sedimentären Rotliegenden mit einer Mächtigkeit von zusammen ca. 3000 m.

Zur **Zechstein**-Zeit bestanden in Zentraleuropa zwei Hauptbecken, ein südliches und ein nördliches. Das nördliche Zechsteinbecken erstreckt sich von der nördlichen und zentralen Nordsee nach Dänemark nördlich des Ringköbing Fünen-Hochs. Norddeutschland liegt insgesamt im südlichen Zechsteinbecken, dem norddeutsch-polnischen Becken. Die Salzstruktur Gorleben–Rambow liegt annähernd im Zentralteil des südlichen Zechsteinbeckens. Ihre Schichtenfolge liegt daher in Beckenfazies vor.

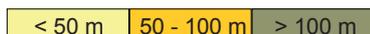
Die lithostratigraphische Gliederung des Zechstein im norddeutsch-polnischen Becken beruht auf der Zyklizität der Ablagerungen (Zechstein 1 bis Zechstein 6), die über das ganze Becken verfolgt werden kann. Die als „Zyklen“ bezeichneten pelitisch-karbonatisch-evaporitischen Abfolgen zeigen im Groben eine Abfolge, die mit Peliten beginnt, darüber folgt ein Karbonat-, ein Sulfat- und dann ein Halitpaket, das Anhydritmittel und Kaliflöze enthalten kann und zum Abschluss ein erneuter Sulfat-Horizont. In den höheren Zyklen (Zechstein 4 bis Zechstein 6) sind die Abfolgen weniger vollständig.

Am Aufbau der Salzstruktur Gorleben–Rambow sind vorwiegend die Staßfurt-, Leine- und Aller-Folge (z2, z3 und z4) beteiligt, deren primäre Mächtigkeiten

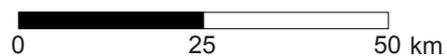
- Aller-Folge (Zechstein 4, z4) ca. 60 m,
- Leine-Folge (Zechstein 3, z3) ca. 320 m und
- Staßfurt-Folge (Zechstein 2, z2) ca. 700 bis 950 m betragen haben.



Topographie



- Elbe
- Fluss, Kanal
- See



- Regionale Modellgrenze  
(→ Fernfeld)
- Salzstruktur Gorleben-Rambow

Abb. 1: Abgrenzung des Modellgebietes am Beispiel des Standortes Gorleben.

Die Werra-Folge (z1) mit einer Gesamtmächtigkeit von 60 m liegt in flacher Lagerung den Schichten des Rotliegenden auf. Die Schichten bestehen ausschließlich aus Ton-, Karbonat- und Sulfatgesteinen und sind nicht am Salzaufstieg beteiligt. Ebenfalls in flacher Lagerung befinden sich die unteren Schichten der Staßfurt-Folge, das Staßfurt-Karbonat (z2SK) und der Basalanhydrit (z2BA), die während des

Salzaufstiegs in ihrer Position verblieben. Dagegen nahmen alle übrigen jüngeren Schichten am Salzaufstieg teil.

Die verbliebenen Zechsteinanteile außerhalb der Salzstruktur Gorleben–Rambow schwanken in ihren Restmächtigkeiten südlich der Salzstruktur zwischen 100 und 200 m und im Bereich der nordwestlichen Randsenke zwischen 200 und 500 m. Dabei handelt es sich vorwiegend um verfaltete Schichten des Zechstein 3 mit geringeren Anteilen des Zechstein 2. Dies bedeutet, dass die mobileren Schichten des strukturbildenden Hauptsalzes (z2HS) nahezu vollständig in die Salzstruktur eingewandert sind.

## **2.2     *Trias bis Oberkreide***

Die Sedimente der **Trias bis Oberkreide** liegen in der für das norddeutsch-polnische Becken bekannten faziellen Entwicklung und petrographischen Ausbildung vor. Die Verbreitung und Mächtigkeit der Schichten werden sowohl von den Bewegungen der Altmark-Schwelle, in deren nordöstlichen Randbereich die Salzstruktur Gorleben–Rambow liegt, als auch von halokinetischen Aktivitäten (Salzkissen-Stadium und primäre Randsenke sowie Salzstock-Stadium und sekundäre Randsenke) beeinflusst. Auf dem Salzstock Gorleben sind nur Relikte von kreidezeitlichen Sedimenten punktuell erhalten geblieben.

## **2.3     *Paläozän bis Untermiozän***

Die Ablagerungen des **Paläozän bis Untermiozän** waren ursprünglich fast im gesamten Gebiet vorhanden. Infolge quartärer Erosion, insbesondere in den Rinnen, und seltener aufgrund innertertiärer Erosion, bestehen heute Verbreitungslücken der tertiären Schichten. Die Sedimente, die vorwiegend klastisch ausgebildet sind (Sande, Schluffe, Tone), wurden auf einem durch die wechselnde Ausdehnung der damaligen Nordsee geprägtem überwiegend marinen Schelf am Südrand des nordwesteuropäischen Tertiärbeckens abgelagert. Die tertiäre Schichtenfolge wird deutlich von der halokinetischen Entwicklung der Salzstruktur Gorleben–Rambow beeinflusst. Sie ist über der Salzstruktur stark kondensiert (auf ca. 50 bis 200 m) und schwillt in den Randsenken über die Normalmächtigkeiten (ca. 600 m) hinaus auf etwa 1100 m in der NW-Randsenke an.

## **2.4     *Quartär***

Mit einem zeitlichen Hiatus von ca. 15 Mio. Jahren folgen die Ablagerungen des **Quartär**, die das gesamte Gebiet überdecken.

Die Basisfläche des Quartär setzt sich aus Elementen unterschiedlicher Entstehung und verschiedenen Alters zusammen. Auffälligstes Element der Quartärbasis sind mehr oder weniger parallel verlaufende tiefe Rinnen (> 200 m). Sie sind beim beginnenden Zerfall des ersten Elster-Inlandeisvorstoßes infolge vorwiegend glazihydromechanischer Ausräumung entstanden. Markanteste Struktur und größte zusammenhängende Eintiefung ist die Gorlebener Rinne. Sie erstreckt sich in NNE-SSW-Richtung und endet relativ abrupt. Die Gesamtlänge beträgt etwa 40 km. Über eine Länge von ca. 10 km quert sie spitzwinklig die Salzstruktur Gorleben–Rambow. Im zentralen Teil des Salzstocks Gorleben sind über eine Länge von ca. 6 km und einer Fläche von etwa 7,5 km<sup>2</sup> die tertiären Schichten vollständig erodiert, so dass dort elstereiszeitliche Sedimente das Hutgestein und an eng begrenzten Stellen das Salinar direkt überlagern. Hier ist die Rinnenbasis mit Tiefen zwischen –240 m und fast –300 m mit einem besonders starken Relief ausgebildet.

Die Lagerungsverhältnisse des Quartär wurden vorwiegend durch glaziäre Prozesse wie Erosion, Exaration oder glazigene Dynamik und weniger durch Auswirkungen der Subrosion bestimmt. Die Schichtenfolge ist vom Ende der Menap-Kaltzeit bis einschließlich des Holozän nahezu vollständig durch Sedimente vertreten.

Zum Ende des Tertiär und in der Präglazial-Zeit hat sich infolge Abtragung die Überdeckung des Salzstockdaches so verringert, dass lokale Subrosion einsetzen konnte. Im südwestlichen Scheitelbereich des Salzstocks Gorleben kam es durch zunehmende Subrosion während der **Menap-Kaltzeit** zur Entstehung eines flachen Sedimentationsbeckens, wobei sich im **Bavel- und Cromer-Komplex** Sedimentakkumulation und subrosionsbedingtes Einsinken die Waage hielten. Die Absenkung betrug damals 0,06 bis 0,2 mm/Jahr. Die Bildung der relativ eng umgrenzten Vorkommen setzte vor ca. 1 Mill. Jahren (Altersangaben: NLF B 2004) ein. Sie stellen damit die ältesten quartären Sedimente auf dem Salzstock dar. Die Schichtenfolge lässt sich in einen unteren sandigen Bereich und einen oberen Abschnitt mit einer Wechselfolge von tonig-schluffigen und humosen Schichten unterteilen. Die Faziesbedingungen waren fluviatil bzw. limnisch bis fluviatil. Präglaziale Ablagerungen waren vermutlich primär auch über dem nordöstlichen Salzstock Gorleben verbreitet. Hier und im weiteren Umfeld wurden diese präglazialen Sedimente durch das folgende eiszeitliche Geschehen erodiert.

Im Verlauf der **Elster-Kaltzeit** überfuhr das skandinavische Inlandeis zum ersten Mal Norddeutschland und damit den Gorlebener Raum vollständig. Die Sedimente der Elster-Kaltzeit lagern hauptsächlich in den tiefen quartären Rinnen und über dem süd-

westlichen Bereich der Salzstruktur Gorleben–Rambow. Sie bestehen im unteren Teil vor allem aus Schmelzwassersanden. Örtlich sind Geschiebemergel eingeschaltet. Den Abschluss der Rinnenfüllung bilden die feinkörnigen Sedimente des Lauenburger-Ton-Komplexes, die z. T. noch von Nachschüttsanden überlagert werden.

In den elsterzeitlich nicht vollständig verfüllten Rinnenhohlformen kamen in der darauf folgenden **Holstein-Warmzeit** limnische bis limnisch/fluviatile Schluffe, Mudden und Sande zum Absatz. In diese schaltete sich eine marine Transgression mit tonigen und sandigen Sedimenten ein.

Zum Ende des Holstein-Interglazials waren nicht alle Sedimentationsräume verlandet. In verbleibenden, nur unvollständig verfüllten Sedimentationsräumen, setzte sich die limnische und limnisch-fluviatile Sedimentation, anscheinend ohne größere Rezession, unter den kaltzeitlichen Bedingungen des Saale-Frühglazials, hier der Fuhne-Kaltzeit, mit Fein- bis Mittelsanden fort.

Die glaziären Ablagerungen der **Saale-Kaltzeit** besitzen unter den quartären Schichten die größte Verbreitung. Im Unterschied zu den älteren quartären Sedimenten, die weitestgehend an die quartären Rinnen gebunden waren, treten sie nahezu flächendeckend im Untergrund des gesamten Fernfeldes auf. Während der Saale-Kaltzeit haben sich die skandinavischen Gletscher dreimal über die Salzstruktur hinweg ausgebreitet. Dementsprechend sind drei Grundmoränenhorizonte mit Geschiebemergeln ausgebildet, zwischen die sich Schmelzwassersande und glazilimnische Beckenbildungen einschalten, wobei die Schmelzwassersande dominieren. Der Aufbau dieser Schichtenfolge ist insgesamt durch einen kleinräumig komplizierten Wechsel gekennzeichnet.

Durch die drenthezeitliche Inlandvergletscherung wurden Sedimente des Holstein und obere Partien des Lauenburger-Ton-Komplexes intensiv gestaucht und teilweise verschuppt. Der Tiefgang der glazigenen Deformationen reicht über dem Salzstock Gorleben bis in eine Tiefe von ca. 100 m unter Gelände. Außerhalb der Salzstruktur hat die glazigene Beanspruchung lokal einen Tiefgang bis in die Schichten des Hamburg-Ton-Komplexes, bis z. T. 140 m unter Gelände.

Feinsandige, schluffige Sedimente der **Eem-Warmzeit** wurden nur in zwei Bohrungen außerhalb der Salzstruktur Gorleben–Rambow nachgewiesen. Vermutlich sind diese Ablagerungen nur lokal in ehemaligen Hohlformen erhalten geblieben.

Während der **Weichsel-Kaltzeit** wurde die Salzstruktur Gorleben-Rambow nicht mehr vom Eis überfahren. Der weiteste Vorstoß des Inlandeises (Brandenburger

Randlage) liegt nordöstlich des Modellgebietes (vgl. Abb. 1), wo die Wasserscheiden auf den Geest-Hochflächen mit den saalezeitlichen Ablagerungen verlaufen. Unter periglaziären Bedingungen kam es in dem weitgehend vegetationslosen Raum auf den Geestflächen zu Abtragungs- und Umlagerungsvorgängen und im Elbtal zur Aufschüttung der weichelzeitlichen Niederterrasse. Die Ablagerungen der Niederterrasse sind im gesamten Gebiet mit Ausnahme der Geest-Hochflächen verbreitet und bilden somit vielfach die heutige Oberfläche. Petrographisch können die Mittel- bis Grobsande in eine ältere (untere) sowie eine jüngere (obere) Niederterrasse unterschieden werden. Die Ablagerungsformen sind ausschließlich ein Abbild fluvial gesteuerter Erosion und Akkumulation. Im Weichsel-Spätglazial wurden Flugsande und organogene Ablagerungen gebildet.

Zur **Holozän**-Zeit kamen vorherrschend fluviale Sedimente, Auelehm und Auesand zur Ablagerung, sowie lokal Mudde und Torf. Die im Weichsel-Spätglazial beginnende Flugsandaufwehung setzte sich ins Holozän fort und bildete Einzeldünen und ganze Dünenfelder. Morphologische Formen oder erhöhte Mächtigkeiten holozäner Ablagerungen, die Hinweise auf subrosive Prozesse im oberflächennahen Bereich über dem Salzstock Gorleben geben könnten, sind nicht vorhanden.

### **3 Entwicklungsgeschichte des Referenzstandortes (Salzstruktur Gorleben-Rambow)**

Mit Hilfe der Schichtabfolgen vom Zechstein bis Quartär auf und neben der Salzstruktur Gorleben-Rambow lässt sich die Entwicklungsgeschichte des Gebietes rekonstruieren (ZIRNGAST et al. 2003: Randsenkenanalyse). Der Zechstein besaß primär eine Mächtigkeit von über 1000 m. Er weist heute außerhalb der Salzstöcke nur noch Restmächtigkeiten von 100 bis 500 m auf. Der größte Teil des mobilen Salzes wanderte in die Salzstöcke. Die Zechsteinbasis liegt heute in einer Tiefe von –3100 bis –4450 m. Unter dem Salzstock Gorleben ist die Zechsteinbasis als Hochlage ausgebildet, die zur Entstehung des Salzstocks an dieser Stelle beitrug. Es fehlen bedeutende Störungszonen, die den Salzaufstieg eingeleitet haben könnten.

Im Salzeinzugsgebiet des Salzstocks Gorleben sind nach den Ergebnissen der Randsenkenanalyse von den primär max. 1400 m mächtigen Zechsteinsalzen 53% in den Salzstock gewandert. 185 km<sup>3</sup> Salz sind im Salzeinzugsgebiet noch vorhanden, etwa die Hälfte davon ist im Salzstock akkumuliert. Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes in Höhe der geplanten Einlagerungssohle in 840 m Tiefe Salzfließgeschwindigkeiten von max. 0,34 mm/Jahr während der Oberkreide und bis 0,07 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär auf. Die eingewanderten Salzmengen hoben

dabei die Salzstockoberfläche etwa 0,08 mm/Jahr zur Oberkreidezeit und 0,02 mm/Jahr im Zeitraum Miozän bis Quartär. Die Berechnungen zur Randsenkenanalyse belegen, dass die Salzeinwanderung seit dem Kreidemaximum bis zur jüngsten geologischen Vergangenheit stetig abnahm.

Prinzipiell ist die Salzwanderung abhängig von der Mächtigkeit überlagernder Deckschichten, der im betrachteten Zeitabschnitt herrschenden tektonischen Verhältnisse und dem Salzangebot im Untergrund.

Für den Nachweiszeitraum (1 Mill. J.) ist davon auszugehen, dass aufgrund der verbliebenen geringen Salzmengen unter dem Nebengebirge in Verbindung mit der bestehenden überregionalen tektonischen Beanspruchungsplan keine erneute massive Salzeinwanderung in die Struktur mit entscheidenden Änderungen der geologischen Standortverhältnisse stattfindet.

Im Einzelnen stellt sich die Entwicklung der Salzstruktur Gorleben-Rambow und der angrenzenden Gebiete wie folgt dar:

Die Lagerungsverhältnisse des über dem Zechstein folgenden Buntsandstein sind von den Salzbewegungen im Untergrund geprägt. In den Salzabwanderungsgebieten liegt die Basis des Buntsandstein in einer Tiefe zwischen –3000 und –4300 m. An den Salzstockrändern ist sie z. T. steil aufgeschleppt. Die Mächtigkeit des Unteren und Mittleren Buntsandstein schwankt zwischen 500 und 800 m. Eindeutig nur auf Salzbewegungen zurückzuführende Mächtigkeitsschwankungen sind nicht nachweisbar.

Erst in der Ausbildung des Schichtkomplexes Oberer Buntsandstein und Muschelkalk, dessen Mächtigkeit zwischen 300 und 700 m schwankt, ist der Einfluss von Salzwanderungen erkennbar. Nordwestlich des Salzstocks Gorleben deuten geringere Mächtigkeiten auf die beginnende Salzakkumulation hin, die zur Bildung eines ausge dehnten Salzkissens führte.

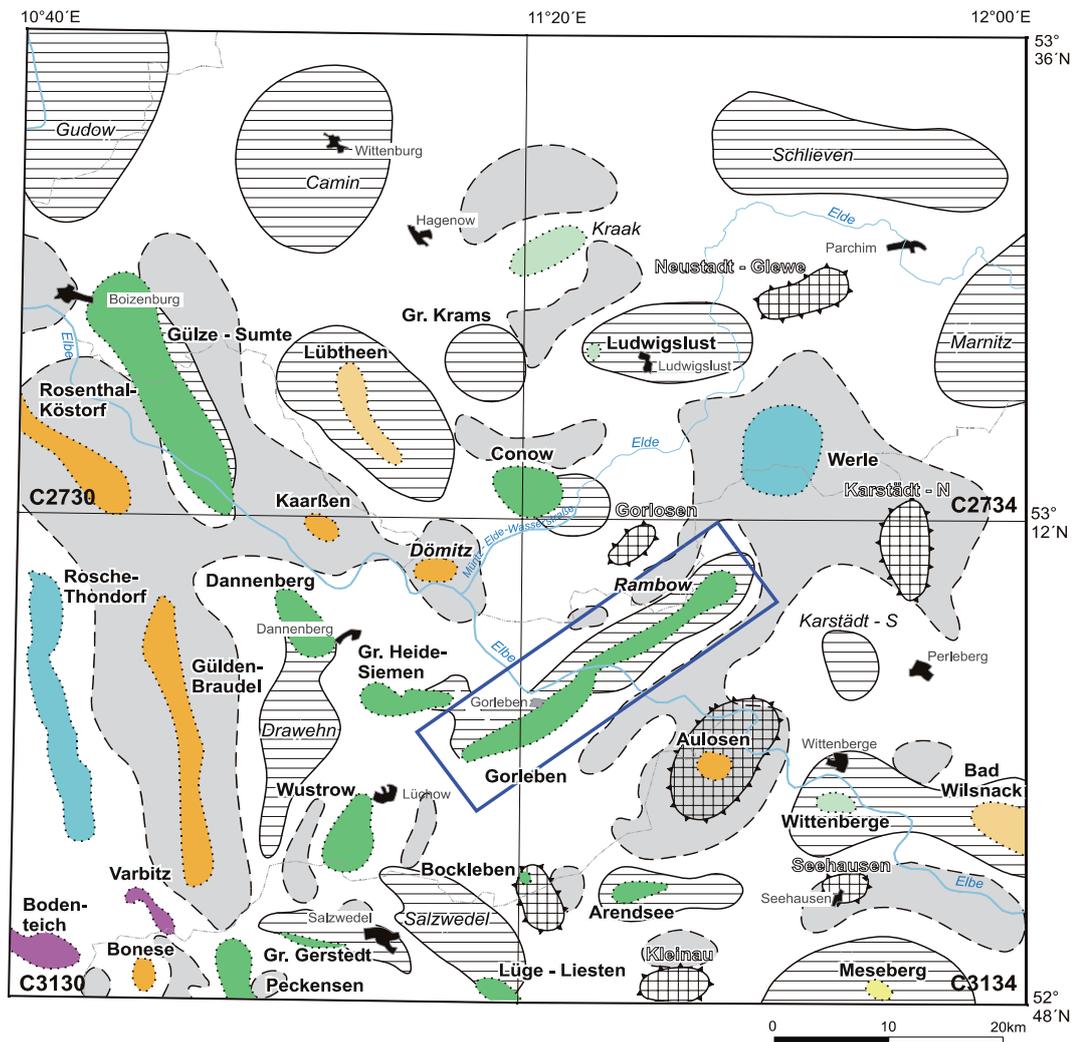
Im Keuper verstärkte sich die Salzakkumulation, was sich an den Mächtigkeitschwankungen dieser Formation ablesen lässt. Während dieser Zeit entstanden nordwestlich und südöstlich der Salzstruktur Gorleben–Rambow die Diapire Dömitz und Aulosen (Lage s. Abb. 2), wodurch es in diesen Bereichen zu einer starken Salzabwanderung kam. Diese Salzabwanderungsgebiete begrenzten ein großes Salzkissen im Bereich der späteren Salzstruktur Gorleben–Rambow.

Im Jura wanderte das Salz weiter von den Rändern in das Zentrum des Kissens, wodurch sich mit Jurasedimenten gefüllte primäre Randsenken bildeten, die auf das Salzkissenzentrum zuwanderten. Eine regionale Hebung im höheren Jura führt zur Abtragung von ca. 400 bis 500 m Sediment, so dass der Jura meist nur in den Randsenken erhalten blieb. Während dieser Hebungsphase begann das Diapirstadium der Salzstruktur Gorleben–Rambow, das bis Ende Oberkreide andauerte.

Außerhalb der Randsenken zeigen die flächig verbreiteten Sedimente der Albtransgression das Ende der Hebungsphase an. Die hohen Mächtigkeiten der Unterkreide in den sekundären Randsenken weisen aber auf einen weiteren starken Salzfluss in die Salzstruktur hin.

Die Oberkreide streicht östlich der Salzstruktur Gorleben–Rambow aus, da dort die Bildung des Prignitz-Lausitzer Walls zur tertiären Kappung mit Erosion der Kreidesedimente führte. Oberkreiderelikte auf dem Hutgestein des Salzstocks Gorleben belegen, dass eine Überdeckung der Struktur in der höheren Oberkreide erfolgte, was das Ende des Diapirstadiums anzeigt. Hohe Oberkreidemächtigkeiten treten in der nordwestlichen Randsenke von Gorleben auf, die auf den immer noch starken Salzabfluss in diesem Gebiet während dieser Zeit hinweisen.

Im Tertiär nahm die Salzabwanderung deutlich ab. Die Salzstruktur Gorleben–Rambow war trotz des anhaltenden Salzaufstiegs fast überall von tertiären Schichten bedeckt. Die Randsenkenmächtigkeiten sind nachschubbedingt entwickelt. Die höchsten Tertiärmächtigkeiten treten in der nordwestlichen Randsenke auf, da dort die höheren Restsalzmächtigkeiten im Untergrund weitere Salzabwanderungen ermöglichten. Aufgrund dieses weiterhin ablaufenden Salzaufstiegs kam es zur Ausbildung von Scheitelgräben in den aufgewölbten Deckschichten des Tertiär. Das letzte, mit Ausnahme von Rinnengebieten, flächig vorhandene tertiäre Schichtglied sind die Unteren Braunkohlesande. Vom darüber folgenden Hamburg-Ton sind über dem Salzstock Gorleben nur noch Relikte vorhanden. Größere geschlossene Verbreitung zeigt er nordwestlich von Gorleben.



**Legende**

**Salinarstrukturen**

Salzstock  
**Bonese**

Salzkippen  
**Camin**

Schildkrötenstruktur  
**Kleinau**

Gebiete vollständiger Salzabwanderung

**Durchbruchsalter der Salzstöcke**

Quartär - Tertiär

Tertiär

Oberkreide

(Oberjura) - Unterkreide

Mittlerer Jura

Unterer Jura

Trias

Bereich der Struktur Gorleben-Rambow

C3134 Blattnummer der TK 100

Abb. 2: Lage und Alter der Salinarstrukturen im Modellgebiet (aus: ZIRNGAST et al. 2003).

## 4 Tektonische Verhältnisse am Referenzstandort

### 4.1 Störungsmuster

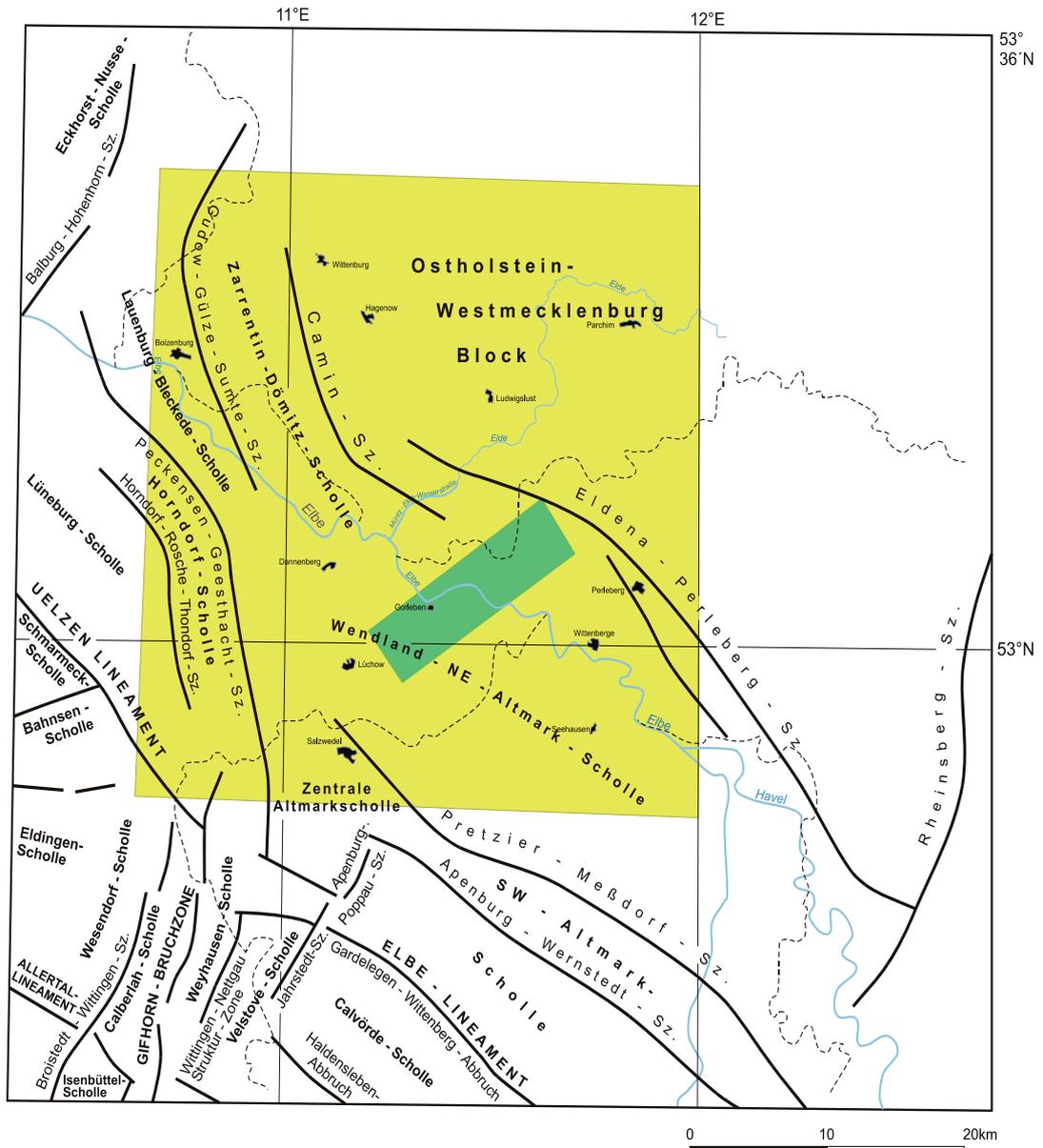
Das markanteste strukturgeologische Element der generell nach Norden in Richtung auf das Zentrum des Norddeutschen Beckens bis in Teufen von tiefer als –5100 m abtauchenden Zechsteinbasis ist die Altmark-Schwelle, in deren Kulmination Teufen von höher als –3200 m zu beobachten sind. Zu den Rändern hin gliedert sich die Schwelle fingerförmig in Teilschwellen und -senken auf, die das paläogeographische Bild des Rotliegend-Beckens in diesem Raum reliktsch nachzeichnen, um dann schließlich zu den umgebenden Senkungszonen abzutauchen. Hierzu gehört auch der Strukturbereich Gorleben–Rambow.

Im Störungsmuster ist auffällig, dass die lang aushaltenden Störungen, die von NW in das Blattschnittgebiet hinein reichen (Störungszonen Horndorf – Rosche-Thondorf, Rosenthal – Gülden-Braudel, Gudow – Gülze-Sumte und Camin) am Rand der Altmark-Schwelle enden. (vgl. Abb. 3).

Die von KAPUSTIN (1971) und GLUSCHKO et al. (1976) vornehmlich nach den geophysikalischen Potentialfeld-Methoden aber auch nach der lang gestreckten Form der Salzstruktur Gorleben–Rambow postulierte Rambow–Marnitz-Störung, die besonders den präpermischen Sockel durchschlagen haben soll, konnte durch neuere Reflexionsseismik im postpermischen Deckgebirge und durch die Unterschießung des Salzstocks Gorleben (ZIRNGAST 1991) nicht bestätigt werden.

Die in Abb. 3 dargestellten Störungen und Störungszonen, die den **Sockel** in ein Schollenmosaik gliedern, sind im wesentlichen im älteren Mesozoikum angelegt und abschnittsweise während des jüngeren Mesozoikum und teilweise auch im Tertiär wieder bewegt worden, oft gegenläufig zur Erstanlage. Die dargestellten Lineamente sind meist keine Einzelstörungen, sondern vielmehr Störungsbündel mit zwischengeschalteten Leisten- und Rhomboidal-Schollen.

Die mesozoischen und tertiären Bewegungen an diesen Sockelfugen sind vielfach, wenngleich nicht immer, Auslöser und Ursache der Strukturbildungen im postsalinaren Oberbau (Salzstrukturen, Gräben, Inversionsstrukturen). Die tektonischen Impulse, die von den Sockelbewegungen ausgingen, erreichten den Oberbau gefiltert und gepuffert durch das zwischengeschaltete Zechstein- und Rotliegend-Salz. Viele der Oberbau-Strukturen, insbesondere Inversionsstrukturen mit und ohne Salzeteiligung, aber auch viele Salzstöcke, sind jedoch durch die Bewegungen im Sockel angeregt. Dies wird



**Legende**

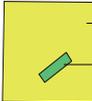
-  Blattschnitt
-  Bereich der Struktur Gorleben - Rambow
- Sz. Störungszone

Abb. 3: Subsalines Sockelstörungsmuster (aus: ZIRNGAST et al. 2003).

besonders deutlich in den Gebieten, in denen das Zechsteinsalz nur geringmächtig ist und sich so nur passiv und nicht strukturgestaltend verhält.

Im Mesozoikum können Zeiten der Dilatations-Deformation (Abschiebungen, Grabenbildung) und Zeiten der Kompression (Auf- und Überschiebungen, Inversion) unterschieden werden.

Die großen Rift-Systeme, die NW-Deutschland in NNW-, N- und NNE-Richtung durchziehen, aber auch die großen WNW- bis NW-streichenden Lineamente wurden vor der Basis der Solling-Folge („H“-Diskordanz) angelegt. Die Dilatationsbewegungen an diesen Sockel-Lineamenten setzten sich im Röt und Muschelkalk fort, wie Mächtigkeitsunterschiede beiderseits der Großstörungen beweisen. Im Lias und Dogger sind Dilatationsbewegungen vorwiegend an den NW- bis WNW-gerichteten Lineamenten zu beobachten, aber auch die meridionalen Riftsysteme waren noch in Bewegung. Diese Bewegungen waren die Vorläufer für die Bildung des WNW-ESE-streichenden oberjuraschisch-unterkretazischen Niedersachsen-Beckens, das randlich an den Blattschnitt heranreicht. Der Oberjura war die Epoche der größten Grabensubsidenz und damit stärkster Dilatation im Niedersachsen-Becken. Diese Grabenbeckenbildung hielt bis in die Unterkreide an und klang im Oberapt aus. Im Alb, Cenoman und Turon herrschte weitgehend tektonische Ruhe.

Vom Buntsandstein bis zum Apt kann an den Sockelfugen nur Dehnung beobachtet werden. Das änderte sich in der Oberkreide, genauer im Oberturon. Der ca. acht Mio. Jahre dauernde Zeitabschnitt vom Coniac bis in das mittlere Campan war eine Zeit allgemeiner Kompression und Inversion. Der Sockel erfuhr eine Verkürzung, es entstanden Auf- und Überschiebungen, die z. T. seismisch und mit Bohrungen nachzuweisen sind. Als Folge dieser Sockelverkürzungen erfolgte eine Inversionsdeformation im Oberbau.

Es wird aufgrund geophysikalischer und Inkohlungsanomalien angenommen, dass während oder kurz vor der Inversion in den Kernbereichen des Niedersachsen-Beckens Intrusivkörper mit basischen oder intermediären Chemismus aufdrangen. Im Umfeld der Salzstruktur Gorleben–Rambow gibt es hierfür jedoch keine Anhaltspunkte.

Die Einengung und Inversion schwächten sich im Verlauf des Santon ab, die bruchhafte Verformung war mit dem mittleren Campan abgeschlossen.

Während des Känozoikum ist im Norddeutschen Becken generell ein starkes Abflauen der tektonischen Aktivität zu verzeichnen. Die nachgewiesenen Bewegungen im terti-

ären Oberbau wurden verursacht durch Sockelbewegungen, die sich auch durch das Salz in den Oberbau durchsetzten, sowie durch Halokinese, Subrosion und Setzung. Eine Neuanlage von nur im Tertiär aktiven Sockelstörungen wurde nicht erkannt. Nach BRÜCKNER-RÖHLING et al. (2002) waren im gesamten Norddeutschen Becken maximal 10% der kartierten Sockelstörungen im Tertiär aktiv. Dabei fanden die Bewegungen im Verlauf des Tertiär bevorzugt immer an den gleichen Sockelstörungen statt, allerdings oft an unterschiedlichen Segmenten der gleichen Störungszone. Die tertiären Dilatationsbewegungen sind bevorzugt an den Störungszonen zu beobachten, an denen während der oberkretazischen Inversion die stärksten Kompressivbewegungen stattgefunden hatten.

Im Umfeld der Salzstruktur Gorleben–Rambow konnten keine tertiären Bewegungen an Sockelstörungen identifiziert werden.

Die Mehrzahl der im Tertiär bewegten Störungen im **Oberbau** steht mit der Halokinese und/oder Subrosion in Zusammenhang, hat also keine endogen-tektonischen Ursachen. Hierzu zählen Scheitelgräben und -halbgräben die als Kompensation der Dehnung im Dachbereich während der Kissenbildung bzw. infolge des Salzstockaufstiegs entstanden sind. Auch subrosionsbedingte Störungen sind entstanden, indem tertiäre Deckschichten in die durch Ablaugung des Salzes im Dachbereich entstandene Hohlform z. T. auch bruchhaft abgesunken sind. Zu diesen beiden Gruppen zählen im Blattschnitt z. B. die Störungen im östlichen Dachbereich der Salzstruktur Gorleben–Rambow oder die Scheitelstörungen über dem Salzstock Groß Heide–Siemen.

#### **4.2 Vertikalbewegungen der Kruste ab dem jüngeren Tertiär**

Die Norddeutsche Senke gilt als Gebiet in Deutschland, in der sich in der jüngsten geologischen Vergangenheit relativ stabile tektonische Verhältnisse eingestellt haben. Dies trifft besonders für den Abschnitt seit der Holstein-Warmzeit bis heute zu. Das Spannungsfeld mit der mittleren horizontalen Hauptspannung ist gleichförmig mit einer NNW-Orientierung ausgeprägt. Sie ist in der großräumigen strukturellen Entwicklung Nordeuropas begründet, die seit dem ausgehenden Ober-Miozän vor ca. 10 Millionen Jahre einsetzte (Neotektonische Periode i. S. BECKER 1993). Im Bereich Gorleben herrscht nach GRÜNTAL et al. (2001: map 5) lokal eine mehr nordöstliche Orientierung vor.

Aus den Untersuchungen rezenter Krustenbewegungen werden für den Bereich der Salzstruktur Gorleben–Rambow Absenkungsbeträge von < 1 mm/Jahr angege-

ben (FRISCHBUTTER 2001). Wenn man von einer Absenkung seit der Holstein-Warmzeit von ca. 20 m ausgeht ( $\geq 0,1$  mm/Jahr), sind die absoluten Beträge geringer (ZIRNGAST et al. 2003). Der erweiterte Bereich um Gorleben als Teil der Zentraleuropäischen Depression (LUDWIG 2001; vgl. SZEDER et al. 2005) weist generell eine absinkende Tendenz von ca. > 300 m seit dem Unter-Oligozän (Rupel: Alter ca. 34 Mill. Jahre) auf, was einer mittleren jährlichen Subsidenz von ca. 0,01 mm/Jahr entspricht. Der generelle Trend von Krustenabsenkung und -hebung im weiteren Bereich um die Struktur Gorleben–Rambow ist in Abbildung 4 dargestellt (LUDWIG 2001: Fig. 2).

Eine regionale Subsidenz dürfte für die Zukunft wahrscheinlich sein, wenn die neotektonischen Verhältnisse für die nächste Million Jahre Gültigkeit und die von LUDWIG (2001) angegebenen durchschnittlichen Werte der regionalen Vertikalbewegungen von etwa 0,01 mm/Jahr (ca. > -300 m/ca. 34 Mill. Jahre) weiterhin Bestand haben. Danach würde sich das Fernfeld innerhalb der nächsten Million Jahre um den geringen Betrag von ca. 10 m absenken.

Eine Besonderheit im Quartär stellen die durch die Auflast des Inlandeisgletschers bedingten Krustendeformationen dar. Während das mächtige Inlandeis in Skandinavien eine starke Absenkung verursachte, kam es an seinen Rändern zu einer Aufwölbung. Das Inlandeis der Weichsel-Kaltzeit soll eine randliche Hebung von ca. 60 m verursacht haben (vgl. ZIRNGAST et al. 2003: 248ff.), wovon auch der Referenzstandort betroffen gewesen wäre. Nach dem Abtauen des weichselzeitlichen Inlandeises wechselten die Bewegungsrichtungen in den jeweiligen Gebieten, um die Krustendeformation abzubauen und die vorkaltzeitlichen Verhältnisse wieder herzustellen. Heute ist der skandinavische Bereich noch ein Hebungsgebiet mit Raten von bis zu > 8 mm/Jahr. Entsprechend müsste die Hebungs-/Senkungs-Dynamik auch während der viel mächtigeren und großräumigeren älteren Kaltzeiten abgelaufen sein. Genaue Daten hierüber liegen für das Referenzgebiet allerdings nicht vor. Offenbar sind die durch die Eisauflast bewirkten vertikalen Krustenbewegungen in NW-Deutschland nur von einer kurzen Dauer oder Ausprägung, so dass sie sich nicht in den geologischen Ablagerungen widerspiegeln. Daher dürfte die seit dem Miozän bestehende überregional wirksame Neotektonik das bestimmende Element für die langfristige weitere Entwicklung der Vertikalbewegungen sein.



## **5.1 Tertiär- und Quartärbedeckung**

Vom Strukturrand aus greifen tertiäre Schichten über die Strukturoberfläche, wobei das Paläozän und Untereozän die größte flächige Verbreitung besitzen. Durch die quartäre Erosion fehlen die jüngeren tertiären Abfolgen über dem zentralen Bereich des Salzstocks Gorleben und z. T. über dem Ostteil des Salzstocks Rambow.

Die Erkundungsergebnisse zeigen einen unterschiedlichen Aufbau des Deckgebirges über dem Salzstock Gorleben und dem Übergangsbereich zum Salzstock Rambow im Gebiet Dömitz-Lenzen. Über den Flanken des Salzstocks Gorleben ist das Tertiär steil aufgeschleppt und bildet den so genannten Ringwall, in dessen Bereich die Schichten ihre höchste Position erreichen. Im zentralen Bereich über dem Salzstock Gorleben sind die Schichten des Tertiär stark gestört. Die Bohrerergebnisse zeigen, dass die Schichten hier eine unruhige jedoch relativ flache Lagerung aufweisen. Scheitelstörungen können nur im steil stehenden Flankenbereich ausgehalten werden, wo sie nur einen geringen Versatz zeigen.

Das Deckgebirge im Übergangsbereich zum Salzstock Rambow besitzt dagegen einen ganz anderen Aufbau. Über einem aufgewölbten Salzstockdach sind die Schichten des Tertiär angeschleppt und zeigen eine an Scheitelstörungen versetzte intakte Schichtabfolge. Nur unter dem zentralen Scheitelgrabenbereich zeigt die Salzstockoberfläche mit dem Hutgestein eine auf Subrosion zurückgehende Einebnung. In dem Bereich fehlen das Paläozän, das Unter-Eozän sowie das Mittel-Eozän, was eine Lage des Salzstocks am Meeresboden während dieser Zeitspanne wahrscheinlich macht.

## **5.2 Hutgestein des Salzstocks Gorleben**

Oberhalb des Salzspiegels ist meist Hutgestein (Kappe über dem Salzgebirge, die weitgehend aus Gips besteht) ausgebildet. Das Hutgestein eines Salzstocks entsteht durch Umkristallisieren aus flüssiger Phase und durch Auflösung der leicht löslichen Salzminerale mit Ablagerung der schwer oder nicht löslichen Bestandteile am Salzspiegel. Im Hutgestein liegen also die jüngsten, aus dem Lösungsvorgang entstehenden Schichten unten am Salzspiegel und die ältesten am Top des Hutgesteins.

Hauptanhydrit, Pegmatitanhydrit, die Anhydritmittel aus dem Anhydritmittelsalz sowie alle tonreichen Abfolgen werden in das Hutgestein eingebaut, ohne dass ihr primäres Gefüge verloren geht. Größere Mächtigkeiten von Hutgestein deuten auf das Vorhandensein von Einschaltungen größerer Hauptanhydritblöcke oder von Ablaungsresten des höheren Zechstein 3 in die Hutgesteinsabfolge hin.

Die Oberfläche des Hutgesteins zeigt ein starkes Relief mit Höhenunterschieden von ca. 200 m (Hochlagen: ca. –100 m; Tieflagen: ca. –300 m), was zum einen auf unterschiedliche Hutgesteinsmächtigkeiten und zum anderen auf den Einfluss der quartären Rinne zurückzuführen ist, in der das Hutgestein ganz oder teilweise erodiert wurde. Die erbohrten Mächtigkeiten des Hutgesteins schwanken zwischen maximal 111 m (GoHy 1151) und 0 m (GoHy 1141, GoHy 1290, GoHy 1301). Im Allgemeinen liegt die mittlere Mächtigkeit des Hutgesteins zwischen 20 und 40 m.

Bestimmte Schichtfolgen mit charakteristischem Gefüge innerhalb des Hutgesteins kommen immer wieder flächenhaft über den gesamten Salzstock verbreitet vor. In der Standardabfolge sind schematisch von oben (alt) nach unten (jung) zu unterscheiden:

- Flaser- und Knollengips,
- Liniengips,
- Sprenkelgips,
- Hutgesteinsbrekzie und
- Geschichtetes Gips- und Anhydritgestein.

Den drei obersten Typen des Hutgesteins ist gemeinsam, dass sie nur vereinzelt von Klüften und Störungen durchzogen oder von Hohlräumen durchsetzt sind. Die wenigen vorkommenden sind mit Material aus dem überlagernden Deckgebirge verfüllt. Erst in den unteren Metern der Sprenkelgipsabfolge nimmt eine Zerrüttung des Gesteins zu.

Während Flaser-/Knollengips, Liniengips, Sprenkelgips sowie Geschichtetes Gips- und Anhydritgestein aus der Umwandlung von Anhydrit in Gips als Folge der Subrosion an der Salzstockoberfläche herzuleiten sind, steht die Bildung der Hutgesteinsbrekzie in ursächlichem Zusammenhang mit der Formung der elsterzeitlichen Gorlebener Rinne (BORNEMANN et al. 2004). Die für die Rinnengenese verantwortlichen, unter hohem Druck stehenden Schmelzwässer sind lateral von der sich bildenden Rinne ausgehend auch in die damalige, salzmechanisch als Schwachstelle anzusehende Grenzfläche zwischen Hutgestein und Salinar eingedrungen und haben dort eine Aufarbeitung des vorhandenen Hutgesteinmaterials bewirkt. Zusammen mit ihren typisch eckigen, auf geringe Transportwege hinweisenden Gipsbruchstücken und den eingeschwemmten eiszeitlichen Sedimenten und Gesteinen des Deckgebirges bildete sich die auffällige Hutgesteinsbrekzie. Abhängig von den Druckverhältnissen scheint das erodierende Schmelzwasser aber nicht an allen Stellen in den Salzspiegelbereich eingedrungen zu sein, da in einigen Bohrungen die Brekzie nicht angetroffen wurde. Außerdem scheint

das zur Hutgesteinsbrekzie führende Sedimentationsgeschehen zeitlich mehrphasig nacheinander stattgefunden zu haben, worauf aufeinander folgende Lagen mit gradierter Schichtung oder andere Sedimentationsstrukturen hindeuten (MINGERZAHN 1987: 37ff.). Mit zunehmender Distanz vom Rinnenbereich sind zudem eine Verringerung der Brekzienbildung und eine Abnahme des eiszeitlichen Materials zu beobachten.

Da das Alter der Hutgesteinsbrekzie im Zusammenhang mit der Rinnengenese während der Elster-Kaltzeit (spätere Eiszeiten weisen keine vergleichbaren Rinnenbildungen im Gorlebener Gebiet auf!) herzuleiten ist, kann das Alter der unter ihr liegenden, jüngeren Hutgesteinsschichten, bzw. der über ihr liegenden, älteren Abfolgen entsprechend zeitlich eingestuft werden. Die darunter liegenden Schichten sind jünger und die darüber liegenden älter als die Elster-Kaltzeit.

Auf dem Hutgestein des Salzstocks Gorleben sind als älteste Sedimente isolierte Reste der ehemaligen Kreidebedeckung erbohrt. Ihre Mächtigkeit liegt meist unter 10 m. Der größte Teil des Hutgesteins ist von tertiären Sedimenten überdeckt. Lediglich im Zentrum der quartären Rinne und im Bereich von isolierten Hutgesteinsaufragungen liegt Quartär direkt auf der Hutgesteinsoberfläche.

### **5.3 Salzspiegel**

Die Lage des Salzspiegels (Grenzfläche zwischen Hutgestein und unterlagerndem Salinar) über dem Salzstock Gorleben schwankt zwischen ca. –340 und –160 m (BORNEMANN 1991). Auch im angrenzenden Übergangsbereich zum Salzstock Rambow zwischen Elbe und Lenzen ist der Salzspiegel in Tiefen zwischen –341 und ca. –230 m erbohrt. Auf dem Salzstock Rambow gibt es zwei Bohrungen, die die Salineroberfläche bei –207 bzw. –91 m angetroffen haben. Im Bereich der Elbe sinkt die Strukturoberfläche zwischen den Salzstöcken Gorleben und Rambow bis auf ca. –400 m ab. Bohrungen fehlen hier, so dass zur Ausprägung und Teufe des Salzspiegels keine Aussagen gemacht werden können.

Über dem Salzstock Gorleben befinden sich die höchsten Salzspiegelbereiche im Südostteil der Strukturoberfläche. Im Bereich der Gorlebener Rinne führte die elsterzeitliche Ausräumung zu einer Tieferlegung des Salzspiegels bis unter –300 m. Mit Ausnahme dieser Zone bildet der Salzspiegel eine schwache Aufwölbung über den zentralen Bereichen des Salzstocks. Zu den Salzstockrändern hin taucht er bis auf mindestens –300 m ab.

Zahlreiche Salzspiegelbohrungen trafen am Salzspiegel nur das Hauptsalz der Staßfurt-Folge an. Die Bohrbefunde ergaben, dass Süßwässer aus dem Deckgebirge keine nennenswerten mineralogischen Veränderungen an den Steinsalzschiechten bewirkten. Eine Ausnahme bilden die Bohrungen GoHy 3080 und GoHy 1181 (BORNEMANN et al. 1988a; BORNEMANN 1991), die nur die jüngsten Schichten des Hauptsalzes (Kristallbrockensalz in überkippter Lagerung) und darunter das Hangendsalz antrafen. Das Vorkommen von Tonflocken, Calcit und einer bereichsweisen Vergipsung von Sulfaten zeigen einen Einfluss von Deckgebirgswässern bis zur Endteufe der Bohrung, bei 28,7 m unter dem Salzspiegel an. Die Veränderungen sind mit der stratigraphischen Nähe zum hier unterlagernden und vermutlich abgelagerten Kaliflöz Staßfurt zu begründen, von dem ausgehend die Deckgebirgswässer das umgebende Steinsalz beeinflussen konnten (BORNEMANN et al. 2004).

Mit einer Serie von Bohrungen (z. B. GoHy 1302 – 1305, GoHy 3153, GoHy 3154) wurden die besonderen Veränderungen des mit seinen leicht löslichen Kalium-/Magnesiummineralen am Salzspiegel austreichenden Kaliflöz Staßfurt untersucht. Das Kaliflöz im vollständigen abgelagerten Zustand liegt als z. T. rot gefärbtes Steinsalz vor, das mehr oder weniger Gipskristalle, Polyhalit, Hämatitschüppchen (GoHy 3153) oder auch starke Imprägnationen und Lagen von klastischem Deckgebirgsmaterial enthält. Kainitit zeigt z. B. in der Bohrung GoHy 1304 ebenfalls die Einwirkung von Grundwasser auf das Flöz an, da er aus der Umwandlung von Carnallitit abzuleiten ist. Insgesamt ergab sich, dass das Kaliflöz bis in mehreren Zehnermetern abgelagert und in extremen Fällen bis ca. 170 m (GoHy 1305) unterhalb des Salzspiegels durch Grundwässer verändert sein kann. Auf der anderen Seite ist das in Trümmercarnallitit-Fazies aufgeschlossene Kaliflöz der Bohrung GoHy 3154 (BORNEMANN et al. 1988b) in nur ca. 26 m unterhalb des Salzspiegels durch Grundwässer nicht beeinflusst und weist wie das umgebende Hauptsalz weder Umwandlungsprodukte noch andere Veränderungen auf. Daraus ergibt sich, dass die Eindringtiefe der Grundwässer in das Kaliflöz Staßfurt und seine Ablagung örtlich großen Unterschieden unterworfen sind. Die Verhältnisse können sich zudem schon auf kurzen Entfernungen ändern. Offenbar findet die Ablagung aber bevorzugt an solchen Stellen statt, wo sich das Kaliflöz in überkippter Lagerung befindet und an denen die Schutzwirkung des darüber liegenden geringdurchlässigen Grauen Salztons (z3GT) nicht wirksam werden kann.

Eine spezielle Untersuchung des am Salzspiegel austreichenden Kaliflöz Staßfurt erfolgte beim Abteufen des Schachtes Gorleben 1, indem vom Schacht aus die Bohrungen RB 377 und RB 061 direkt im Einfallen in das Flöz gebohrt wurden. Die Bohrungen und die Schachtaufschlüsse erbrachten eine detaillierte Ansicht über seine quartäre

Beeinflussung. (BORNEMANN 1991) bzw. über die Verhältnisse am Salzspiegel (BORNEMANN et al. 2002b: Anl. 1). In beiden Bohrungen endet die Einwirkung der zur Verwitterung des Kaliflöz Staßfurt führenden Lösungen in einem relativ horizontalen Niveau von etwa 325 m Teufe. Dies entspricht einer lotrechten Teufe von 70 m unterhalb des Salzspiegels. Die angetroffenen Faziesbereiche sind in sich sehr inhomogen. Dies zeigt, dass der Umwandlungsvorgang des Flözes komplex war und in mehreren Umkristallisationsschritten abgelaufen sein muss.

Auch Salzgesteine aus anderen stratigraphischen Bereichen wie z. B. der Abfolge vom Gebänderten Deckanhydrit (z2DA) über den Grauen Salzton (z3GT) und das Leine-Karbonat (z3LK) bis zum Hauptanhydrit (z3HA) zeigen eine Überprägung durch Grundwasser am Salzspiegel. Dies konnte in den drei Bohrungen GoHy 1121, GoHy 1141 und GoHy 1291 anhand der dort vorgefundenen Kluffüllungen nachgewiesen werden. Während in den oberen Partien, dicht unterhalb des Salzspiegels, diese aus Tonen des Deckgebirges und Steinsalz bestehen, werden die Füllungen zur Tiefe hin durch Steinsalz oder Sylvit und letztlich durch Carnallit ersetzt. Am Salzspiegel ausstreichender Hauptanhydrit bewirkt gegenüber seiner Umgebung keine oder kaum eine Erhöhung des Salzspiegelniveaus, wohl aber ein in seiner Mächtigkeit vergrößertes Hutgestein.

Die geschilderten Beispiele zeigen, dass aufgrund der Ablaugungsvorgänge das ansonsten relativ ebene Salzspiegelrelief an Stellen mit ausstreichenden leicht löslichen Salzmineralen stark ausgeprägt sein kann. Die Tabelle 4 bei BORNEMANN (1991) fasst Werte für die Eindringtiefen der Deckgebirgswässer unterhalb des Salzspiegels zusammen.

#### **5.4 Stratigraphie und Petrographie**

Bei der Beschreibung der Schichtfolgen sind zwei unterschiedliche Deformationsstockwerke im Salzstock Gorleben zu unterscheiden (BORNEMANN et al. 2004). Zum einen handelt es sich hierbei um die Kernzone des Salzstocks, vertreten durch Schichten des Hauptsalzes (z2HS) der Staßfurt-Folge sowie zum anderen die bis zum Salzstockrand angelagerten jüngeren Schichtfolgen der Leine- und Aller-Folge (z3, z4). Die unterschiedlichen Bewegungen der beiden Stockwerke werden durch das Kaliflöz Staßfurt im Grenzbereich Staßfurt-/Leine-Folge mit extremer Ausdünnung oder intensiver Verfaltung und Anstauung ausgeglichen. Der generelle Unterschied der Schichten in den beiden Stockwerken besteht darin, dass der sedimentäre Charakter des Hauptsalzes infolge des zurückgelegten Aufstiegsweges zumeist zerstört ist. Die jüngeren Schichten der Leine- und Aller-Folge dagegen haben keine längeren Wege zurückge-

legt und sind daher nur intensiv verfaltet. Ihre primär-sedimentären Kennzeichen sind zumeist erhalten geblieben. Bei der bisherigen Erkundung des Bergwerkbereiches wurden bislang nur Schichten vom Basissalz der Staßfurt-Folge, über die der Leine-Folge bis zum Tonbrockensalz der Aller-Folge angetroffen. Ihre petrographische Ausbildung ist zusammengefasst im Folgenden dargestellt.

Die Aufklärung der Stratigraphie und die Ansprache der zum Teil intensiv verfalteten Schichten wird entscheidend durch eine konsequente Auswertung der Brom-Spurenelementkonzentrationen erleichtert, die sich bei den Schichten eines Eindampfungszyklusses in signifikanter Weise unterscheiden (vgl. Kap. 5.9.4).

#### 5.4.1 Staßfurt-Folge

Die Salze der Staßfurt-Folge (Zechstein 2) liegen infolge ihrer starken Durchbewegung während des Salzaufstiegs als salztektonische Brekzie vor. Der ursprüngliche primär sedimentäre (diagenetische) Schichtverband ist während des Aufstiegs durch Zerschneiden und Wiederverheilen überwiegend zerstört und homogenisiert worden. Das Gestein setzt sich aus mehreren verschiedenartigen Komponenten zusammen, die ein unterschiedliches Bildungsalter haben (BORNEMANN et al. 2000).

Die Halite der Staßfurt-Folge werden in drei Schichtglieder aufgeteilt, das Basissalz (z2BS, nicht erbohrt), das Hauptsalz (z2HS) und das Hangendsalz (z2HG). Im Hauptsalz soll das Endlager errichtet werden.

Das **Hauptsalz (z2HS)** lässt sich mit Hilfe der Menge und Ausbildung der sulfatischen Einlagerungen in drei Abschnitte untergliedern. Der älteste Abschnitt wird als Knäuelsalz (z2HS1) bezeichnet. Er besteht aus dunkelgrauem bis schwarzem mittel- bis grobkristallinen Steinsalz, das durch Anhydrit in disperser Verteilung sowie durch Anhydritknollen und -knäuel in unregelmäßiger Verteilung sehr stark verunreinigt ist. Bereichsweise kommen gehäuft 1 bis 12 cm große eckige Steinsalzkristallbrocken und gerundete Steinsalzaugen vor. Die Steinsalzkristallbrocken sind vorwiegend klar, teilweise enthalten sie aber auch eine interne Feinschichtung durch Aufreihung feiner Lösungs- und Gasbläschen. Die Schichtung ist im Knäuelsalz schwer erkennbar, da größere Reinsalzsichten fehlen und infolge der starken Durchbewegung die anhydritischen Verunreinigungen den primären sedimentären Schichtverband nur noch selten abbilden. Außer dem Anhydrit kommen keine anderen Minerale im Halit des Knäuelsalzes vor. Beim überlagernden Streifensalz (z2HS2) handelt es sich um die regelmäßige Wechsellagerung von bis zu 0,5 m mächtigen reineren Bändern und Streifen, in die durch Anhydritfetzen und -schlieren verunreinigte Halitbänke unter-

schiedlicher Mächtigkeit zwischengelagert sind. Neben Anhydrit kommen normalerweise auch in den Schichten des Streifensalzes keine weiteren Minerale im Halit vor. Ausnahmen sind hier beispielsweise stärker deformierte Bereiche mit Einschaltungen von dem doppelt gelagerten isoklinalen Kaliflöz (z. B. Salzstockerkundungsbohrung Go 1005). Hier wurden im höheren Streifensalz bis ca. 1 cm große rote Carnallitnester beobachtet, die zumeist in Zwickeln den Steinsalzkristallbrocken anlagern. Der gleiche Befund gilt hier auch für das überlagernde Kristallbrockensalz. Die carnallitischen Einlagerungen weisen auf hochkonzentrierte Lösungsfronten hin, die wahrscheinlich infolge des Einspießens des Kaliflözes Staßfurt in benachbarte Schichtfolgen das Hangend- und Kristallbrockensalz durchdrungen haben. Das Kristallbrockensalz (z2HS3) als jüngste Abfolge des Hauptsalzes wird durch das massenhafte Auftreten von Steinsalzkristallbrocken und -augen gekennzeichnet, deren Vorkommen vom Liegenden zum Hangenden zunimmt. Die Steinsalzkristallbrocken sind sehr rein und zeigen teilweise eine interne Feinschichtung und erreichen Größen von über 10 cm. Sie liegen nicht mehr in ihrem ursprünglichen sedimentären Verband, sondern sind rotiert und schwimmen oftmals orientierungslos in einer fein- bis mittelkristallinen Steinsalzmatrix, die vom Liegenden zum Hangenden hin abnehmend durch dispers verteilten Anhydrit und vereinzelte Anhydritschlieren sowie -linien verunreinigt ist. Zum Hangenden wird der Anhydritanteil durch Polyhalit ersetzt.

Mit dem relativ scharfen Aussetzen der Steinsalzkristallbrocken und -augen wird die Grenze zum **Hangendsalz (z2HG)** gezogen. Für das Hangendsalz ist die engständige durchhaltende und regelmäßige Wechselfolge von ca. 2 bis 10 cm breiten Reinsalzstreifen mit ein bis wenige Zentimeter breiten absätzigen dunkelgrauen anhydritisch-polyhalitischen Flockenlinien charakteristisch.

Die Grenze Hangendsalz zu den darüber folgenden **Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE)** wird mit der ersten durchgehenden Kieseritlinie gezogen. Sie bestehen aus grauem feinkristallinem Steinsalz mit unregelmäßig eingelagerten dunkelgrauen bis schwarzen anhydritischen Streifen und Bändern. Der weiße bis hellgraue Kieserit nimmt in Annäherung an das Kaliflöz Staßfurt stark zu. Untergeordnet kommt ein geringer Polyhalitgehalt vor. In einzelnen Aufschlüssen sind die Kieseritischen Übergangsschichten von sekundär gebildetem Sylvin in größeren milchig-trüben Kristallen oder auch von sekundär gebildetem, rotem und weißem Carnallit durchsetzt.

Die Grenze zum **Kaliflöz Staßfurt (z2SF)** ist zumeist scharf und liegt dort, wo verstärkt Carnallit einsetzt. Das Kaliflöz liegt in allen Salzstockerkundungs- und Salzspiegel-

bohrungen in Trümmercarnallit-Fazies vor. Der Befund gilt auch für die untertägige Erkundung bis auf Teilbereiche mit Sonderfazies in der Aufbeulung des Kaliflözes zwischen den Schächten. Das Kaliflöz besteht aus zerbrochenen Lagen und Knauern von weißem bis dunkelgrauem Kieserit und sehr wenig Anhydrit. Zerbrochene hellgraue feinkristalline Halitbänke schwimmen in einer Matrix aus rotem, violetter und weißem oder klarem Carnallit. Bereichsweise ist der Carnallit gasreich und als Knistercarnallit ausgebildet. Wegen der starken Deformation ist die sedimentär angelegte Schichtung nur noch in vereinzelter mächtigeren Halitbänken erkennbar. Generell lässt sich das Kaliflöz auf Grund der Deformation in zwei Teilbereiche gliedern. Der liegende Teil besteht aus einer mehr oder weniger ausgeprägten Wechselfolge von stark zerstörtem Carnallit und Steinsalzbänken, wobei trotz der starken Deformation die sedimentäre Ausbildung der Schichten noch erkennbar ist. Im hangenden Teil des Flözes (meist mehrere Meter bis zum überlagernden Decksteinsalz) sind die Carnallit- und Halitschichten infolge stärkerer Deformation in ein homogenes Gemenge übergegangen. Die Steinsalzbänke sind total zerbrochen und in cm- bis dm-dicke runde Knollen aufgelöst, die richtungslos verteilt in einer Carnallitmatrix schwimmen. Bereichsweise hat die starke Deformation auch Fragmente der hangenden Schichten (Gebänderter Deckanhydrit und Grauer Salzton) mit in die Zerstörung einbezogen. Meistens lassen sich daher im hangenden Teil des Kaliflözes auch Ton- und untergeordnet Anhydritbröckchen aus den oben genannten Schichten nachweisen. Die Mächtigkeit des Kaliflözes Staßfurt variiert stark. Sie liegt im Durchschnitt zwischen 15 und 30 m. In Abhängigkeit von der tektonischen Position kann das Flöz vollständig abgequetscht sein oder es kann bei intensiver Verfaltung eine Mächtigkeit bis über 70 m erreichen.

Der Übergang vom Kaliflöz Staßfurt zum **Decksteinsalz (z2DS)** ist scharf. Er besteht in der Regel aus rotbraunem oder hellgrauem vorwiegend feinkristallinem Halit von 0,2 bis 0,5 m Mächtigkeit. Farblose Halitlagen sowie dunkelgraue bis schwarze mm-dicke Anhydritlagen zeichnen die Schichtung nach. In vielen Durchgängen fehlt das Decksteinsalz und das Kaliflöz Staßfurt wird direkt vom Gebänderten Deckanhydrit überlagert.

Der untere Teil des **Gebänderten Deckanhydrits (z2DA)** besteht aus dunkel- bis hellgrauem Anhydritgestein mit zwischengelagertem Tonstein und Kieserit, sodass eine Bänderung erkennbar ist. Der Obere Gebänderte Deckanhydrit besteht aus einer Wechsellagerung von bis zu 10 cm dicken grauen Anhydrit- und schwarzen Tonsteinbänken. Die verschiedenen Bänke sind scharf gegeneinander abgegrenzt. Das Gestein ist z. T. von feinen Klüften durchzogen, die vorwiegend durch roten Carnallit verheilt sind.

#### 5.4.2 Leine-Folge

Der **Graue Salzton (z3GT)** bildet die Basis der Leine-Folge (Zechstein 3). Seine Ausbildung lässt eine Untergliederung in Unteren und Oberen Grauen Salzton (z3GTU, z3GTO) zu. Bereichsweise ist die Abfolge stark geklüftet. Die Klüfte sind zumeist als Fiederklüfte ausgebildet und durch Faserhalit oder Fasercarnallit verheilt. Der untere Teil besteht durchschnittlich aus 55 Gew.-% Anhydrit und als weiteren mineralogischen Bestandteilen aus Hydrotalkit, Chlorit und Quarz. Untergeordnet sind Magnesit, Steinsalz, Illit und Kaolinit vertreten. Der Obere Graue Salzton (z3GTO) ist durch schwarzen, mm-feingeschichteten und mürben Tonstein gekennzeichnet. Die Anhydritgehalte sind geringer und das Sediment ist feinkörniger als jenes im Unteren Grauen Salzton.

Die Grenze zum **Leine-Karbonat (z3LK)** ist durch den Materialwechsel von einem schwarzen Tonstein zu beige-grauem anhydritischen Magnesitgestein scharf. Das Leine-Karbonat besteht aus einem hellgrauen bis beige-grauen feinkristallinen dichten kaum geschichteten anhydritischen Magnesitgestein, das nur bereichsweise durch hellgraue Anhydritfetzen und dünne Anhydritlagen geschichtet ist. Im Hangenden vorkommende Ooide sind vorwiegend anhydritisiert und zeigen damit, dass zahlreiche Um- und Rekristallisationen auf das Gestein eingewirkt haben.

Mit einer scharfen Grenze lagert der **Hauptanhydrit (z3HA)** dem Leine-Karbonat auf. Er besteht aus blaugrauem, zum Hangenden hin aus grauem Anhydrit, in den beige-graue magnesitische Fläsern, Schlieren und Lamellen eingelagert sind, die ehemalige Algenstrukturen nachzeichnen. Die Mächtigkeiten des Hauptanhydrit liegen zwischen 40 und 80 m. Aufgrund seiner petrographischen Ausprägung lässt sich der Hauptanhydrit in den

- Lamellenanhydrit (z3HA1),
- Flocken- und Fläseranhydrit (z3HA2),
- Lamellenanhydrit 2 (z3HA3),
- Fläseranhydrit (z3HA4),
- Schlierenanhydrit (z3HA5),
- Bänderanhydrit (z3HA6),
- Lamellenanhydrit 3 (z3HA7),
- Bündelanhydrit (z3HA8),

- Flaser- und Bänderanhydrit (z3HA9),
- Maseranhydrit (z3HA10),
- Bänderanhydrit (z3HA11),
- Schwarzes Tonbänkchen (z3HA12) und
- Anhydritschale (z3HA13) feingliedern.

Einzelheiten dazu sind detailliert in BORNEMANN et al. (2004) nachzulesen.

Der Bänderanhydrit ist durch das massenhafte Vorkommen von Stylolithen gekennzeichnet, die in den anderen Schichten des Hauptanhydrits nur vereinzelt zu finden sind. Massenberechnungen mit Hilfe der Amplitudenhöhe der Stylolithen ergaben Lösungsbeträge des Sulfats von 19 und 26 %. Insgesamt weist der Hauptanhydrit primär-sedimentär bedingte Mächtigkeitsänderungen von 20 bis max. 30 m auf engstem Raum auf. Die Ursachen sind hauptsächlich im Ausfall oder in den schwankenden Mächtigkeiten der Zonen vom Bündelanhydrit (z3HA8) bis zum Bänderanhydrit (z3HA11) zu finden.

In der Salzspiegelbohrung GoHy 3155 wurde das Schwarze Tonbänkchen (z3HA12) und die feingeschichtete Anhydritschale (z3HA13) angetroffen.

Die halitische Abscheidungsphase der Leine-Folge setzt mit dem **Basissalz (z3BS)** an einer scharfen Grenze über dem Hauptanhydrit ein. Das hellgraue bis hellbraune, feinkristalline und zumeist intensiv verfaltete Basissalz ist durch sehr viele hellgraue, bis 1 cm breite anhydritische Linien im Abstand von wenigen mm bis zu 10 cm durchzogen. Die normale Linienschichtung wird bereichsweise durch bis zu 40 cm dicke Halitbänke unterbrochen.

Die Grenze zwischen Basis- und **Liniensalz (z3LS)** liegt dort, wo der Halit durch das Aussetzen von anhydritischen Staublinien reiner ist, die Linienabstände regelmäßig sind und ein Farbumschlag von (hell-)braun nach hellgrau erfolgt. Für das Liniensalz sind die regelmäßig vorkommenden von bis zu 1 cm bis ausnahmsweise 4 cm dicken, hellgrauen, teilweise feingeschichteten Anhydritlinien im Abstand von 15 bis 20 cm und zum Hangenden von 30 bis 50 cm charakteristisch. Das Liniensalz enthält ca. 230 Linien (1 - 230), wobei die 110. Linie wegen ihrer speziellen petrographischen Ausbildung (vgl. BORNEMANN et al. 2004: 100ff.) einen markanten Leithorizont innerhalb der Abfolge darstellt. Die Linien sind zur stratigraphischen Orientierung und damit zur Identifizierung von strukturellen Einzelheiten wie Faltenbau oder Lagerungsverhältnisse

hervorragend geeignet. Der zwischen den Anhydritlinien gelagerte Halit ist fein- bis mittel-, z. T. grobkristallin und zumeist farblos bis grau. Anhand der petrographischen Ausbildung der einzelnen unterschiedlichen Salzlagen ist eine z. T. starke Beanspruchung des Liniensalzes mit der Ausbildung von Sigmoidalgefüge und von durch sekundäres feinkristallines Steinsalz verheilte Bruchflächen (Kleinstörungen) erkennbar.

Über dem Liniensalz folgt das **Orangesalz (z3OS)**, das in das Untere (z3OSU), Mittlere (z3OSM) und Obere Orangesalz (z3OSO) gegliedert werden kann. Die Dreigliederung ergibt sich aus einer vorwiegend aus Anhydrit bestehenden Bank. Sie wird als Mittleres Orangesalz oder auch als Gorleben-Bank bezeichnet. Makroskopisch ist das fein- bis mittelkristalline Untere Orangesalz (z3OSU) hellorange bis orangebraun gefärbt. Steinsalzkristallbrocken-Lagen kommen nur untergeordnet vor. Kennzeichnend sind mm-dünne anhydritisch-polyhalitische Flockenlinien (Liniennummern 231 - 275), die zum Hangenden zunehmend diffus ausgebildet und nahezu nur noch im Durchlicht deutlich erkennbar sind.

Das Mittlere Orangesalz (Gorleben-Bank, z3OSM) kann in sieben Zonen gegliedert werden. Es besteht vereinfacht aus einer Folge von mit Polyhalit- und Anhydritflocken verunreinigten Steinsalzhorizonten, feinkristallinem oder geschichtetem Anhydritgestein und Tonlagen. Eine speziell auszuhaltende Zone (IV) bildet eine immer schichtparallel verlaufende mit halitischen oder carnallitischen Bestegen verheilte Bewegungszone, welche Öffnungsweiten von 0,1 bis 34 cm erreicht. Die Bewegungszone der Gorleben-Bank wirkte während der Faltung als Scherhorizont zwischen dem Unteren und Oberen Orangesalz. Kennzeichnend für die geschichteten Anhydritlagen (Zone V bis VI) sind sedimentär angelegte Mächtigkeitsschwankungen mit einer Lösungs- und Gasführung.

Das Obere Orangesalz (z3OSO) ist fein- bis mittelkristallin und überwiegend gelborange bis braunorange gefärbt und von typischen grauen Anhydritlinien (Liniennummern 1 - 124, Zählung neu beginnend, vgl. oben) durchzogen, die zumeist intensiv verfaltet sind. Eine von der Normalausbildung abweichende Fazies ist im Bereich um die Schächte auf der 840 m- und auf der 820 m-Sohle festzustellen. Hier wurde im mittleren und oberen Teil des Oberen Orangesalzes in Form von massenhaft vorkommenden, dispers verteilten sowie lagig angeordneten Polyhalitflocken eine sekundäre Polyhalitbildung festgestellt, die auch mit einer rot-orangen Verfärbung des Halits einhergeht. Weiterhin kommen stark polyhalitisierte Sulfatlinien sowie idiomorph ausgebildete bis 1 cm große Anhydritkristalle vor. Wahrscheinlich sind diese Umbildungen durch eine Lösungsfront verursacht worden, die im Gefolge der

Zechstein 2-Aufbeulung (s. folg. Kap.) des Kaliflözes Staßfurt sowie der Abpressung des Hauptanhydrits freigesetzt wurde. Während der Abpressung rissen Klüfte auf, die eine Migration von Lösungen in die Nachbargesteine ermöglichten.

Über dem Orangesalz (Grenzlinien 120 bis 124) lagert das nahezu strukturlos erscheinende **Bank-/Bändersalz (z3BK/BD)**. Es ist fein- bis mittelkristallin, sehr rein und im Durchlicht hellorange bis weiß durchscheinend. Einzige Strukturelemente sind nicht durchhaltende wenige mm-dünne, zumeist stark verfaltete anhydritisch-polyhalitische Flockenlinien und diffus ausgebildete Linien.

Das nachfolgende **Bunte Salz (z3BT)** lässt sich in drei Schwaden- und drei Reinsalzzonen untergliedern, wobei die Schwadensalzzonen Anhydritlinien enthalten und durch diffus verteilte Anhydritflocken und Anhydritschmitzen verunreinigt sind. Die Reinsalzzonen enthalten dagegen anhydritische Verunreinigungen in geringerem Umfang.

Mit einer Anhydritbank beginnt das **Anhydritmittelsalz (z3AM)**. Im Anhydritmittelsalz wurden 9 Anhydritmittel unterschiedlicher Mächtigkeit festgestellt. Das Gestein besteht aus zumeist ungeschichtetem und feinkristallinem grauen Anhydrit, selten aus einem sylvinitischen Kieserit-Anhydritgestein (Anhydritmittel 9), das durch fein- bis grobkristallines, unterschiedlich stark durch Anhydritschlieren, -flasern und -fetzen verunreinigtes Steinsalz getrennt ist. Nahezu alle Aufschlüsse des Anhydritmittelsalzes sind gekennzeichnet durch das Vorkommen von Carnallitnestern sowie von Klüften, die durch sekundären Carnallit und Halit verheilt sind. Dieser Befund gibt einen Hinweis darauf, dass die Anhydritmittel während des Salzaufstiegs Reservoirs für hochkonzentrierte Lösungen waren, die auch derzeit noch in den Anhydritmitteln enthalten sein können. Durch das Zerschneiden der Anhydritmittel im Gefolge der Deformation wurden die Lösungen teilweise freigesetzt, imprägnierten die benachbarten Halite und es kam zur Ausscheidung der sekundären Carnallite und Halite. Die Gesteinsbeeinflussung durch Lösungen wird auch dadurch bestätigt, dass in der Salzstockerkundungsbohrung Go 1005 von ca. 1762 bis 1790 m sowohl die Anhydritmittel (z3AM7 bis z3AM9) als auch der dispers verteilte Anhydrit im Halit nahezu vollständig in Polyhalit umgewandelt sind.

Das überlagernde **Schwadensalz (z3SS)** besteht aus einer schmutzig-grauen fein- bis mittel-, vereinzelt grobkristallinen Steinsalzfolge, die von anhydritischen Flocken in Streifen und Bändern mit unregelmäßiger Verteilung durchsetzt wird. Das

Schwadensalz und die im Folgenden beschriebenen jüngeren Schichten wurden nur durch Bohrungen aufgeschlossen.

Der ca. 10 m mächtige Horizont des vertaubten **Kaliflözes Riedel (z3RI/na)** besteht aus rotbraunem bis dunkelgrauem fein- bis mittelkristallinem Steinsalz mit dunkelgrauen tonig-anhydritischen Flocken und Schlieren und Carnallit gefüllten Zwickeln in unregelmäßiger Verteilung. Das Flöz wie auch die anderen Kaliflöze (Kaliflöz Ronnenberg: z3Ro, Kaliflöz Bergmannsseggen: z3Be) der Leine-Folge wurden nur in den Aufschlussbohrungen Go 1003, 1004 und 1005 angetroffen.

Die Grenze zum überlagernden **Tonmittelsalz (z3TM)** liegt dort, wo rotbraune Tonbröckchen im Steinsalz eingelagert sind. Das Tonmittelsalz (Wechselfolge Steinsalzschiefer mit anhydritischen Einlagerungen und tonigen, untergeordnet sandigen Zwischenschichten) wird in fünf Abschnitte gegliedert, von denen drei als Tonmittel und zwei als Reinsalze ausgebildet sind.

#### 5.4.3 Aller-Folge

Der **Rote Salztou (z4RT)** bildet den pelitischen Fuß der Aller-Folge (Zechstein 4) und besteht aus rotbraunem Tonstein, der teilweise bis zu 5 cm große anhydritische Feinsandsteinknollen sowie bis zu 2 cm große deformierte idiomorphe Steinsalzkristalle enthält.

Mit scharfer Grenze folgt im Hangenden der **Pegmatitanhydrit (z4PA)**. Die sedimentologische Abfolge der vorwiegend aus Anhydrit bestehenden Bank lässt eine Untergliederung in fünf Sedimentationseinheiten zu (s. BORNEMANN 1991; KLÖCKER 2000). Insgesamt besitzt die Abfolge eine bankrechte Mächtigkeit von ca. 1,5 m.

Das über dem Pegmatitanhydrit liegende **Basissalz (z4BS)** ist orangefarben und feinkristallin. Kennzeichnend sind hellgraue mm bis 2 cm dicke Anhydritlinien in unregelmäßiger Verteilung. Zum Hangenden kommen Anhydritlinien nur noch untergeordnet vor und gehen in dünne polyhalitische Linien und Flockenlinien über. Im Steinsalz sind bis zu 2 cm große kieseritische Flatschen unregelmäßig verteilt.

Die Schichten des **Schnee- und des Rosensalzes (z4SS, z4RS)** lassen sich in den Aufschlüssen des Salzstocks teilweise nicht trennen. Dieses Steinsalz ist rotorange, vorwiegend feinkristallin und enthält bereichsweise eingelagerte Kieseritflocken. Kennzeichnend sind dünne polyhalitische Linien mit Anhydrit im Abstand von

20 bis 50 cm. In unregelmäßiger Verteilung kommen vereinzelt mm bis 2 cm große Carnallitnester vor. Die Gesamtmächtigkeit beider Einheiten beträgt ca. 8 m.

Das jüngste erbohrte Schichtglied der Aller-Folge ist das **Tonbrockensalz (z4TS)**. Es wurde aufgrund der unterschiedlichen Ausbildung der Toneinlagerungen in das *Untere* und *Obere Tonbrockensalz* (z4TSU bzw. z4TSO) unterteilt. Das Untere Tonbrockensalz (z4TSU) ist graubraun bis braunorange gefärbt und enthält im Abstand von 5 bis 20 cm dicke schichtig angeordnete Tonflockenlagen, die ihrerseits hellgraue Anhydritflatschen, -fetzen und -bröckchen enthalten.

Im Gegensatz dazu enthält das **Obere Tonbrockensalz (z4TSO)** Tonflocken und -brocken in unregelmäßiger Verteilung. Eine Schichtung ist nur schwer erkennbar. Weitere Verunreinigungen sind hellgraue feinkristalline mm bis 1 cm große Anhydritknoten und -flasern.

### **5.5     *Aufnahmekapazität des Hauptsalzes für mögliche Endlagerbereiche***

Auf Basis der bisherigen Erkundungsergebnisse und einer vorläufigen Endlagerplanung (Stand 2000) wurde anhand der Verbreitung des Hauptsalzes (Einlagerungsmedium) die potentielle Ausdehnung eines Einlagerungsbereiches abgeschätzt (BORNEMANN et al. 2004). Basis für eine Flächenbestimmung waren die auf der 840 m-Sohle und die 150 m unterhalb der 840 m-Sohle gelegenen Ausstriche des Hauptsalzes. Die Grenze zum Kaliflöz Staßfurt aus Richtung der Kernzone kommend lieferte im Norden bzw. Süden die Berechnungsgrundlage. Die westliche Brenzung ergab sich aus dem Sicherheitspfeiler zur Rechtsamsgrenze. Nach Osten wurde die Grenze bei 150 m östlich des Querschlags 1 Ost angenommen.

Als Ergebnis ergaben sich in Abhängigkeit von der gewählten Größe eines Sicherheitspfeilers für das Niveau der 840 m-Sohle eine Verbreitungsfläche des Hauptsalzes zwischen 370.700 und 305.700 m<sup>2</sup> sowie auf dem Niveau 150 m unterhalb der 840 m-Sohle zwischen 390.900 und 325.700 m<sup>2</sup> (vgl. BORNEMANN et al. 2004: Tab. 4.1\_1). Diese Zahlen spiegeln den Diskussions- und Wissensstand des Jahres 2000 wider. Sie sind als Orientierungshilfe anzusehen, die frühere Vermutungen eines für die Aufnahme eines Endlagers ausreichend großen Hauptsalz Körpers im Zentralbereich des Salzstocks bestätigen.

## 5.6 Internbau des Salzstocks Gorleben

Der Internbau eines Salzstocks ist durch eine starke Verfaltung der Schichtfolgen gekennzeichnet. Im Salzstock und grundsätzlich bei den durch Zechsteinschichten aufgebauten Salzstöcken in Deutschland sind zwei unterschiedliche Deformationsstockwerke verwirklicht. Das eine umfasst die Steinsalze der Staßfurt-Folge (z2) und das andere die jüngeren Schichten der Leine- und Aller-Folge (z3 u. z4). In Abhängigkeit von der äußeren Form einer Salzstruktur lassen sich Unterschiede in der Art und Anordnung von Falten sowie den großräumigen Einfaltungen der beiden salztektonischen Einheiten des z 2 und z 3/4 feststellen. Rundliche und kleine ovale Salzstöcke weisen einen äußerst komplizierten Internbau auf. Bei langgestreckten ovalen Diapiren fallen die großräumigen Einfaltungen weniger intensiv aus. In der Längsachse letzterer werden daher weitestgehend zusammenhängende Bereiche von homogenen Haliten des Zechstein 2 angetroffen. Zu diesem Typ zählt auch der Salzstock Gorleben.

Der interne Bauplan wird schematisch durch einen NW-SE-Schnitt verdeutlicht (Abbildung 5).

Insgesamt können vier tektonisch-stratigraphische Einheiten ausgehalten werden, die unter Berücksichtigung einer nicht genauer bestimmbareren Querfaltung vorwiegend in axialer Richtung des Salzstocks ausgerichtet sind.

Die **Einheit 1** umfasst die NW-Flanke des Salzstocks mit Schichten der Leine- und Aller-Folge. Daran schließt sich nach SE die **Einheit 2** an, die die Kernzone des Salzstocks darstellt und aus dem Hauptsalz der Staßfurt-Folge besteht. Im Erkundungsbereich 1 handelt es sich dabei um einen einfach gebauten Sattel, der im Kern die ältesten Schichten des Hauptsalzes (Knäuelsalz) und auf der Nord- und Südflanke Schichten des Streifen- und Kristallbrockensalzes enthält. Als lokale Besonderheit existiert zwischen den Schächten eine sich südöstlich der Kernzone anschließende spezielle z2-Aufbeulung. In südöstlicher Richtung folgt die **Einheit 3** mit der SE-Flanke des Salzstocks, die eine markante inverse Mulde darstellt und z3- und z4-Schichten enthält. Die Muldenachse verläuft mit dem südöstlichen Salzstockrand parallel. Innerhalb der Mulde wurden die jüngsten am Salzspiegel ausstreichenden Schichten nachgewiesen. Die **Einheit 4**, der nach SE angrenzende Salzüberhang, besteht vorwiegend aus überkippt gelagertem Hauptsalz, das der Kernzone entstammt. Die beschriebenen Lagerungsverhältnisse in diesem Salzstockprofil sind mit der Bewegungsgeschichte des aufdringenden Salzes zu erklären. Während des Diapirstadiums überfaltete das fließfähigere Hauptsalz der Staßfurt-Folge die langsam fließenden, zurückbleibenden Salzgesteine der Leine- und Allerfolge und legte sich

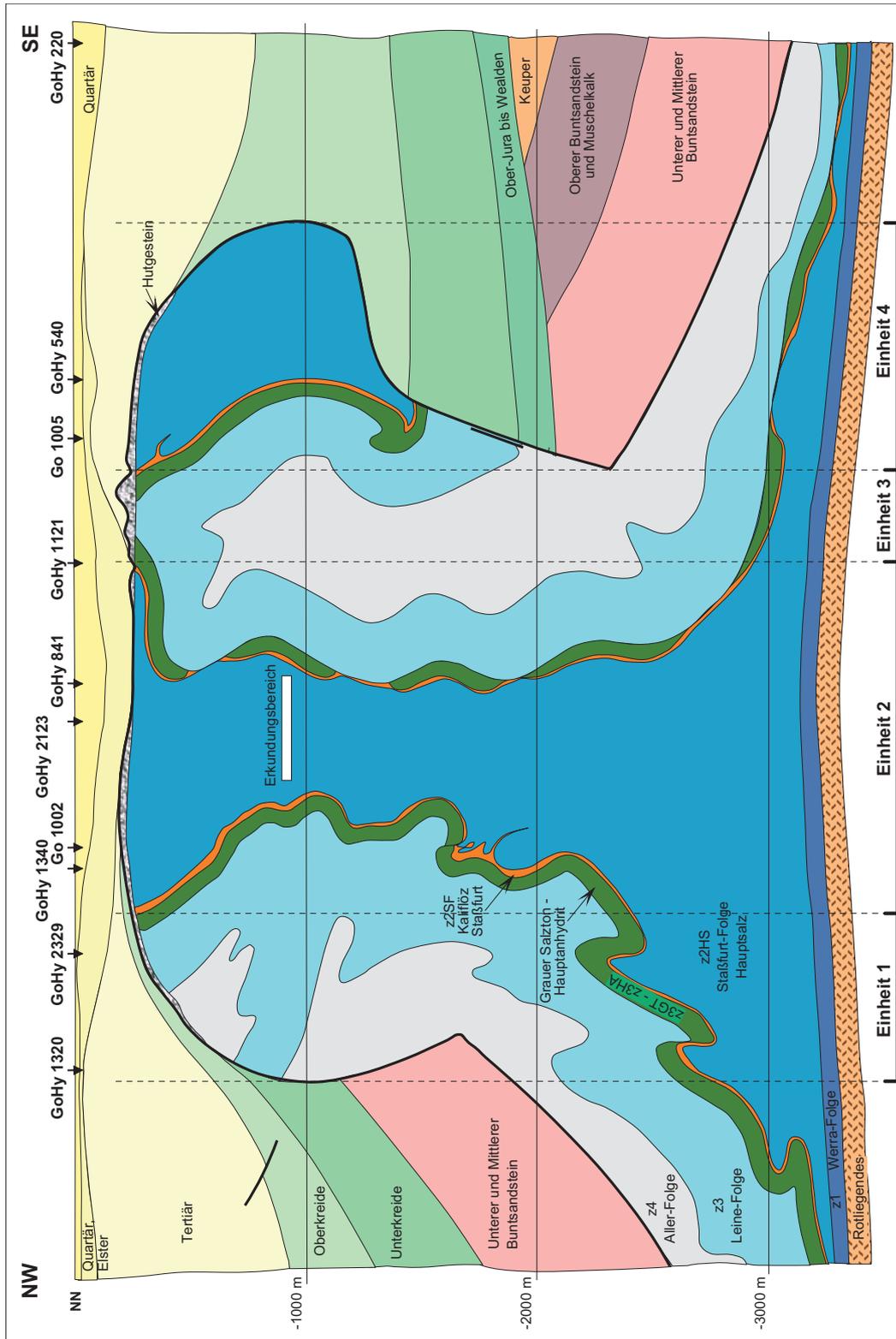


Abb. 5: Vereinfachter Schnitt durch den Salzstock Gorleben (aus: BORNEMANN et al. 2004: Abb. 3.3.2\_2).

zumindest im SE als Salzüberhang über die älteren Nebengesteine der Oberkreide. Dabei wurden die Salzgesteine des z3/4 als inverse Mulde ausgeformt.

Im Salzstock Hänigsen-Wathlingen wurden wie im Salzstock Gorleben in der Längsachse ausgerichtete flach abtauchende Faltenachsen mit einem gewissen Anteil von Querkaltung nachgewiesen (DE BOER 1971), so dass dieser von seinem internen Verformungsbild eine Orientierung für die untertägige Erkundung des Salzstocks Gorleben lieferte.

Falten kommen im Salzstock Gorleben in allen Größenordnungen mit Amplituden im cm- bis 100 m-Bereich vor. Die Faltung erstreckt sich über alle vorkommenden Schichtfolgen nahezu bruchlos. Nur der Hauptanhydrit bildet eine Ausnahme, indem er bei der Verfaltung zerbrach und in einzelne Segmente aufgegliedert wurde, die heute isoliert als einzelne Schollen im umgebenden Steinsalz schwimmen. Ein ähnliches Verhalten wird bei den dickeren Anhydritmitteln des z3AM beobachtet. Hier bildeten sich boudinartige<sup>1</sup> Körper aus, die perlschnurartig in der Schichtung aufgereiht sind. Meist liegen isoklinale Falten vor, die immer einen stärker deformierten Bereich kennzeichnen. Die Faltenachsen tauchen relativ flach bis maximal 30° ab. Faltenachsen mit höheren Abtauchwerten wurden dagegen seltener beobachtet. Hieraus kann abgeleitet werden, dass Großfalten im Salzstock ebenfalls ein mehr oder weniger flaches Achsenabtauchen aufweisen. Belege für Kulissenfalten als Großfalten, die eine steilachsige Deformationsform voraussetzen, gibt es nach den Erkundungsergebnissen nicht.

Der Deformationsstil wird teufenabhängig von der Aufwölbung der z2-Schichten im Zentrum des Salzstocks bestimmt. In den Schächten tauchen beispielsweise die B-Achsen senkrecht zum Umriss der Zechstein 2-Aufbeulung ab. Insgesamt sind zwischen den Schächten im Infrastrukturbereich fünf verschieden strukturierte Teilbereiche auszuhalten:

- Lokale Zechstein 2-Aufbeulung zwischen den Schächten südöstlich der z2-Kernzone,
- SE-vergente Falten im Bereich Schacht 1,

<sup>1</sup> Boudinage, [von franz. boudin = Blutwurst] Struktur, die sich häufig in Sedimenten und Metamorphiten mit Kompetenzkontrast findet. Bei Extension parallel zum Lagenbau werden kompetente Lagen gedehnt, ausgedünnt und brechen in gleichmäßigen Abständen. Die einzelnen Körper bekommen ein „wurstähnliches“ Aussehen. Die Form der Boudins hängt vom Kompetenzkontrast ab. Ist er hoch, sind die Enden der einzelnen Körper nur geringfügig eingeschnürt. Ist er nicht so groß, ist die Abrundung stärker ausgeprägt. Bei geringem Kompetenzkontrast kommt es nur zu einem rhythmischen Ab- und Anschwellen der kompetenteren Lage, ohne dass es zu einem Abreißen kommt  
LEXIKON DER GEOWISSENSCHAFTEN. A-Edi (2000).-- Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 1; Berlin - ISBN 3-8274-0299-9.

- SW-vergente Falten im Bereich Schacht 2,
- Faltenzone nördlich der Zechstein 2-Aufbeulung,
- "Scher"- und Faltenzone im Grenzbereich Zechstein 3 zu Zechstein 2.

Der in beiden Schächten und im Infrastrukturbereich angetroffene Faltungstyp ist als eine Biegescherfaltung anzusprechen. Er resultiert daraus, dass mächtige inkompetente halitische Schichten im Wechsel mit geringmächtigen kompetenten anhydritischen Schichten in Falten gelegt wurden. Da die kompetenten anhydritischen Schichten nur einen kleinen Teil des gesamten Schichtpakets ausmachen, ist der Anteil von Scherbewegungen so groß, dass bereichsweise der Übergang zur reinen Scherfaltung fließend ist. Die Gorleben-Bank und auch die mächtigeren Anhydritmittel entsprechen hier den kompetenten und die umgebenden Schichten, wie z. B. der Bereich mit Liniensalz bis Unteres Orangesalz oder mit Oberes Orangesalz bis Bank-/Bändersalz den inkompetenten Schichten. Die kompetenteren hüllen die inkompetenteren Schichten durch Bildung von Großfalten ein. Dabei kommt es in den inkompetenteren Schichten im Faltenkern der Großfalten zu den typischen disharmonischen Kleinfalten mit stark geneigten Achsenflächen. Bemerkenswert ist, dass nur im Schacht Gorleben 1 der für einen Salzstock charakteristische isoklinale Faltenbau vorliegt, während in Schacht Gorleben 2 eine enge Faltung anzutreffen ist.

Eine strukturelle Besonderheit im Dach der z2-Aufbeulung stellt das dort angestaute Kaliflöz Staßfurt mit Mächtigkeiten von ca. 70 m dar. Das Kaliflöz ist im Bereich der 840 m- und 820 m-Sohle aufgeschlossen und erstreckt sich bis in eine abgeschätzte Höhenlage von ca. 770 m (BORNEMANN et al. 2004: 130). Zur Teufe hin ab der 930 m-Sohle folgen die Schichten des Hangend- und Kristallbrockensalzes. Auf den Flanken der Zechstein 2-Aufbeulung geht die Flözmächtigkeit auf ihren normalen Wert zurück. Die Schichten vom Hauptanhydrit (z3HA) bis Deckanhydrit (z2DA) (insgesamt max. ca. 100 m bankrecht) wurden bis auf einzelne isolierte Teilschollen salztektonisch abgepresst. Das Basissalz ist nur noch in tektonisch überprägten Resten vorhanden. Das Einpressen des Kaliflözes und der damit verbundene Schichtausfall von ca. 100 m führten zu starken Spannungsumlagerungen in diesem Raum, die die Zertrümmerung des Mittleren und Unteren Orangesalzes bewirkten. Die Anlage von Klüften in der Füllortstrecke von Schacht 2 im Bank-/Bändersalz (820 m-Sohle) sowie im Schacht 2 selbst von 802 bis 850 m im Oberen Orange- bis Bank-/Bändersalz ist auch auf den oben genannten Vorgang zurückzuführen. Die geologisch-strukturellen Verhältnisse sind in Abbildung 6 verdeutlicht (vgl. BORNEMANN et al. 2004: 130ff.).

Durch die Bildung der Zechstein 2-Aufbeulung kam es an deren nördlicher und östlicher Flanke infolge des Einwirkens migrierender salinärer Lösungen aus dem abgepressten Hauptanhydrit zu Vertaubungserscheinungen im Kaliflöz Staßfurt. Am Bohrkernmaterial können verschiedene Stadien der Kaliflözvertaubung bzw. -umwandlung ausgehalten werden.

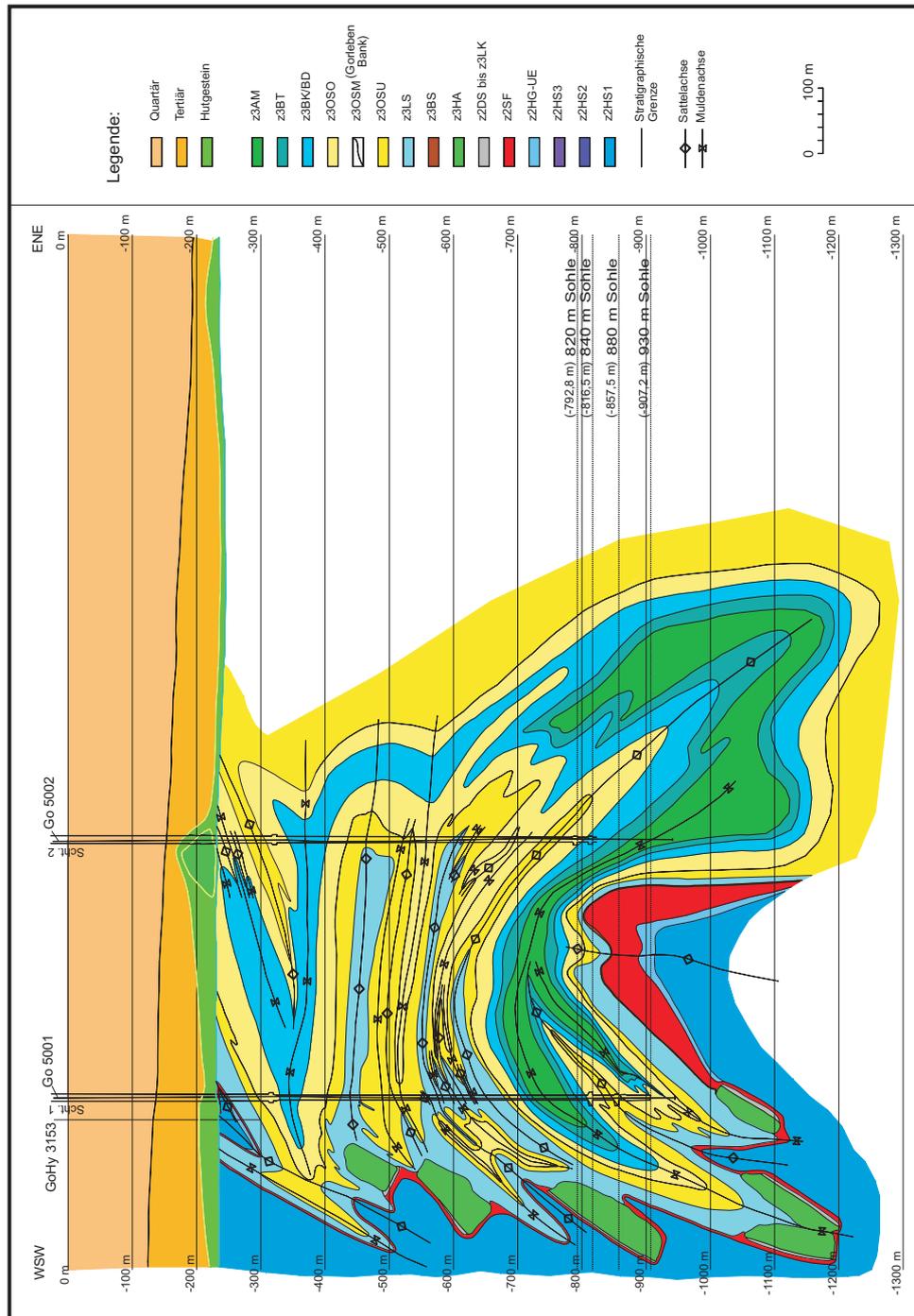


Abb. 6: Geologischer Vertikalschnitt durch die Schächte Gorleben 1 und 2 (aus: BORNEMANN et al. 2002a).

## **5.7 Schächte**

Die Schächte sind der direkte Zugang von der Erdoberfläche zu einem Endlager. Sie stellen damit auch nach ihrer Verfüllung einen potentiellen Ausbreitungspfad für Radionuklide aus dem Endlager dar. Die in ihnen angetroffene Geologie des Salinars muss im Rahmen der Langzeitsicherheit betrachtet werden, da den Salzgesteinen als Barriere gegen die Radionuklidenausbreitung eine besondere Bedeutung zukommt. Die Kenntnisse aus der Auffahrung der Schächte unterhalb des Salzspiegels werden beispielhaft für den Standort Gorleben kurz umrissen. Sie beruhen auf den Ausführungen in BORNEMANN et al. (2002b). Die oberhalb des Salzspiegels liegenden Schichten des Hutgesteins und des Deckgebirges sind an anderer Stelle des Berichtes beschrieben (vgl. Kap. über das Hutgestein u. die Hydrogeologie).

Der Schachtausbau endet im Schacht 1 bei ca. 350 m und im Schacht 2 bei ca. 357 m. Darunter steht das Salzgebirge abgesehen von einzelnen Betonringen zur Stoßsicherung offen an. Im Schacht 1 erfolgte abweichend vom Soll-Ausbruchsdurchmesser von 7,53 m im Teufenbereich der Gorleben-Bank (856,0 und 864,0 m RHB) ein geänderter Schachtausbau mit einem Ausbruchsdurchmesser von 8,53 m. Im Bereich der betonierten Fülltaschen der 880 m-Sohle (887,5 bis 896,1 RHB) betrug der Ausbruchsdurchmesser 8,7 bis 9,7 m.

Beide Schächte weisen mit acht Großfalten ein vergleichbares tektonisches Inventar auf.

### **5.7.1 Schacht 1**

Im Bereich des Schachtes Gorleben 1 streichen am stark reliefierten Salzspiegel (256 m) die Schichten der Staßfurt-Folge mit dem Kristallbrockensalz (z2HS3), Hangendsalz (z2HG), Kieseritische Übergangsschichten (z2UE) und dem Kaliflöz Staßfurt aus. Das Flöz wie auch das Hauptsalz sind in Salzspiegelnähe durch Deckgebirgswässer beeinflusst. Eine postelsterzeitliche junge Erosion ist allerdings nur schwach ausgeprägt. Unterhalb der Teufe von ca. 279 m folgen die Schichten der Leine-Folge, die bis zur Endteufe des Schachtes (933,2 m) mehrfach durchörtert wurden. Die angetroffenen Schichtglieder sind in Tabelle 1 aufgelistet und in Abbildung 6 dargestellt.

Tab. 1: Teufen der Schichtglieder der Leine-Folge in Schacht 1  
(aus: BORNEMANN et al. 2002b: Tab. 4).

Stratigraphie	Symbol	Teufe [m]	Bemerkungen
Liniensalz	z3LS	279,70 - 312,20	
Unteres Orangesalz	z3OSU	312,20 - 327,50	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	327,50	
Oberes Orangesalz	z3OSO	327,50 - 359,10	
Bank-/Bändersalz	z3BK/BD	359,10 - 391,80	Muldenkern
Oberes Orangesalz	z3OSO	391,80 - 433,80	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	433,80 - 435,20	
Unteres Orangesalz	z3OSU	435,20 - 456,20	
Liniensalz	z3LS	456,20 - 484,50	Sattelkern
Unteres Orangesalz	z3OSU	484,50 - 578,25	Muldenkern
Liniensalz	z3LS	578,25 - 706,40	Sattelkern
Unteres Orangesalz	z3OSU	706,40 - 714,90	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	714,90 - 715,75	
Oberes Orangesalz	z3OSO	715,75 - 732,25	
Bank-/Bändersalz	z3BK/BD	732,25 - 742,90	
Buntes Salz	z3BT	742,90 - 750,80	
Anhydritmittelsalz	z3AM	750,80 - 804,80	Muldenkern
Buntes Salz	z3BT	804,80 - 817,90	
Bank-/Bändersalz	z3BK/BD	817,90 - 833,60	
Oberes Orangesalz	z3OSO	833,60 - 860,80	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	860,80 - 861,20	
Unteres Orangesalz	z3OSU	861,20 - 888,20	Sattelkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	888,20 - 888,40	
Oberes Orangesalz	z3OSO	888,40 - 933,20 (E.T.)	

Da an der Grenze zwischen den z2- und z3-Schichten das Liniensalz direkt unter dem Kaliflöz folgt, müssen etwa 100 m der bankrechten Normalabfolge zwischen Kaliflöz und dem mittleren Liniensalz salztektonisch bedingt abgeschert worden sein (BORNEMANN et al. 2002b: 32). Die Ausbildung der Schichten ist im Kapitel „Stratigraphie und Petrographie“ dargestellt bzw. ausführlich in BORNEMANN et al. 2000b: 26ff.) beschrieben.

Tab. 2: Teufen der Schichtglieder der Leine-Folge in Schacht 2  
(aus: BORNEMANN et al. 2002b: Tab. 10).

Stratigraphie	Symbol	Teufe	Bemerkungen
Oberes Orangesalz	z3OSO	258,2 - 303,5	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	303,5 - 303,9	
Unteres Orangesalz	z3OSU	303,9 - 335,5	Sattelkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	335,5 - 336,2	
Oberes Orangesalz	z3OSO	336,2 - 370,5	
Bank- / Bändersalz	z3BK/BD	370,5 - 434,8	Muldenkern
Oberes Orangesalz	z3OSO	434,8 - 461,5	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	461,5 - 461,7	
Unteres Orangesalz	z3OSU	461,7 - 544,0	Sattelkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	544,0 - 546,0	Muldenkern
Oberes Orangesalz	z3OSU	546,0 - 555,0	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	555,0 - 556,8	
Oberes Orangesalz	z3OSU	556,8 - 566,0	Sattelkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	566,0 - 567,6	
Oberes Orangesalz	z3OSO	567,6 - 601,8	Muldenkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	601,8 - 602,5	
Oberes Orangesalz	z3OSU	602,5 - 626,8	
Linien­salz	z3LS	626,8 - 641,5	Sattelkern
Unteres Orangesalz	z3OSU	641,5 - 691,8	
Mittleres Orangesalz	z3OSM	691,8 - 692,3	
Oberes Orangesalz	z3OSO	692,3 - 765,5	Muldenkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	765,5 - 766,5	
Unteres Orangesalz	z3OSU	766,5 - 795,3	Sattelkern
Mittleres Orangesalz	z3OSM	795,3 - 796,0	
Oberes Orangesalz	z3OSO	796,0 - 834,5	
Bank- / Bändersalz	z3BK/BD	834,5 – 843,3 (E. T.)	

### 5.7.2 Schacht 2

Innerhalb des Schachtes stehen nur Schichten der Leine-Folge an. Am wenig gegliederten, ebenen Salzspiegel streicht das deutlich subrosiv beeinflusste Obere Orangesalz aus. Wie im Schacht 1 wurden auch in Schacht 2 die Schichten der Leine-Folge bis zur Endteufe bei ca. 840 m mehrfach durchörtert (vgl. Tab. 2 u. Abb. 6).

### 5.7.3 Frostrisse

Beide Schächte wurden im Gefrierverfahren abgeteuft. Die bei den Schachtkartierungen nachgewiesenen Risse im höchsten Teil des Schachtes werden auf dieses spezielle Abteufverfahren zurückgeführt. Nahezu alle Frostrisse des Schachtes 1 sind annähernd parallel zum Streichen der Schichten im Steinsalz ausgerichtet, zeigen jedoch ein deutlich steileres Einfallen. Die mit ca. 80 gon einfallenden Frostrisse im Schacht 2 streichen SW-NE, d. h. annähernd parallel zur Schichtung des Salinars. In beiden Schächten ist eine Topfrisszone i. S. von BURGHARDT et al. (1982) etwa am Tiefsten des Gefrierschachtausbaus mehr oder weniger deutlich ausgebildet. Die Frostrisse kommen ab dem Salzspiegel bis in die Teufe von 356 m im Schacht 1 und ca. 315 m im Schacht 2 vor. Um den Schachtmittelpunkt sind sie bis zu einer Entfernung von ca. 25 bzw. 37 m anzutreffen.

Alle Risse weisen bis zur 1. Hauptvorbohrsohle einen Besteg aus gefrorener Lösung auf (Schacht 2). Darunter enthalten sie zumeist Verpressmaterial.

## 5.8 *Natürliche bruchhafte Diskontinuitäten*

Eine Aussage zur geologischen Langzeitsicherheit eines geplanten Endlagers muss u. a. die Abschätzung eines unterstellten Transportpfades für Fluide enthalten, der die Verbreitung von Radionukliden aus dem Endlagerbereich in das Deckgebirge zulässt. Als Transportpfad kommen bruchhafte Diskontinuitäten wie Klüfte oder Störungen in Frage.

An dieser Stelle soll nur auf die natürlich entstandenen Klüfte, nicht aber auf die möglicherweise neu entstehenden künstlichen, mit der Einlagerung von radioaktiven Abfällen und den damit verbundenen Auffahrungen von Strecken etc. verbundenen Klüfte eingegangen werden.

Natürlich entstandene Klüfte oder Störungen sind in Salzgesteinen generell anzutreffen, doch sind sie meist mit Salzmineralneubildungen verheilt und geschlossen (vgl. FISCHBECK et al. 1993; FISCHBECK et al. 1997). Sie stehen für eine Ausbreitung von Radionukliden nicht mehr zur Verfügung. Es werden daher im Folgenden nur Klüftvorkommen und Zerrüttungszonen innerhalb des Salzstocks beschrieben, die als potentielle Transportpfade interpretiert werden können.

### 5.8.1 Klüfte

Offene Klüfte (im Sinne von lösungserfüllt) wurden bei den Erkundungsarbeiten im Rahmen der Schacht- und Streckenauffahrungen entweder direkt angetroffen oder ihr Vorhandensein konnte indirekt in Bohrungen aufgrund von zulaufenden Salzlösungen abgeleitet werden.

Vor allem im Unteren Orangesalz, aber auch vereinzelt im Liniensalz und selten im Oberen Orangesalz entstanden durch den „Störkörper“ Gorleben-Bank bei entsprechender salztektonischer Deformation Klüfte. Die Klüfte sind häufig an den unmittelbaren Bereich zur Gorleben-Bank gebunden. Sie gehen meist fingerartig von der Gorleben-Bank aus ins Liegende hinein, wo sie sich z. T. verästeln und die Schichtung häufig bankrecht durchlaufen. Selten sind die Klüfte spitzwinklig zur Schichtung bzw. schichtparallel ohne sichtbare Verbindung zur Gorleben-Bank angeordnet.

In der Regel sind die Klüfte mit sekundärem, hypidiomorphem, mittel- bis grobkristallinem Halit verfüllt. Carnallit bildet vereinzelt Zwickelfüllungen. Teilweise sind Resthohlräume vorhanden. Auf einer Kluffläche ist meist ein z. T. bis mehrere mm-mächtiger sekundärer Sulfatsaum ausgebildet, welcher die zur Zeit der Kluffbildung liegende Fläche markiert. Versätze sind am Stoß nicht zu erkennen. Die Klüfte treten nur maximal 1 bis 3 m im Liegenden auf und nur selten im unmittelbar Hangenden der Gorleben-Bank. Die Entstehung der Klüfte ist eng an die Gorleben-Bank gebunden, da diese einen mechanischen Störkörper im Steinsalz darstellt und sich durch ihr rheologisches Verhalten von der halitischen Umgebung unterscheidet.

Die häufig im Tonmittelsalz (z3TM) auftretenden Klüfte sind durch Fasersteinsalz oder Fasercarnallit und die im Roten Salzton (z4RT) vorkommenden durch Fasersteinsalz verheilt.

Der Hauptanhydrit (z3HA) zeichnet sich generell als ein stratigraphischer Bereich aus, in dem mit Klüften gerechnet werden muss. Die Ursache der Klüftung dürfte in den gesteinsmechanisch spröden Eigenschaften und dem kompetenten Verhalten des Hauptanhydrits während der Halokinese liegen.

In Teilbereichen weist der Hauptanhydrit eine intensive Zerschering auf. Die einzelnen Klüfte sind vorwiegend mit Carnallit, Sylvin oder Steinsalz verheilt. Untergeordnet sind auch Borate als Kluffbesteige zu finden. Neben zahlreichen Klüften kommen im Hauptanhydrit auch größere Störungen vor. Zumeist haben diese Störungen abschie-

benden Charakter und bewirken einen Schichtausfall von wenigen Metern bis in den 10 m-Bereich.

Im tieferen Hauptanhydritdurchgang der Bohrung Go 1003 (vgl. BORNEMANN 1991) wurde jedoch auch eine Überschiebung angetroffen, die eine Schichtverdoppelung von ca. 10 bis 15 m hervorruft.

Alle Störungszonen sind Dezimeter bis mehrere Meter breit und mit sekundärem Carnallit oder durch das eingeflossene Kaliflöz Staßfurt verheilt. Diese Füllungen weisen zumeist eine hohe Gasimprägnation (Knistercarnallit) auf. Bereichsweise wurden in den Störungszonen neben dem Carnallit auch eingeschleppte Brocken von Grauem Salzion und Leine-Karbonat gefunden.

Neben den Klüften und Störungen kam es bei weitergehender Deformation auch zur Zerlegung des Hauptanhydrits in einzelne z. T. rotierte Blöcke von unterschiedlicher Größe, die sich stratiform aufreihen. Die einzelnen Blöcke sind von den umgebenden Salzgesteinen umflossen und so gegeneinander abgeschirmt, dass keine weitreichenden Verbindungen des Kluftnetzes einzelner Blöcke untereinander möglich sind. Daher enthalten die einzelnen Blöcke Relikte von alten, unter petrostatischem Druck stehenden Lösungs- und Gasvorkommen, die während der Deformation in die Hauptanhydritblöcke gelangten und dort zusätzlich durch Auskristallisationsprozesse im Kluftnetz eingeschlossen wurden.

Kluftvorkommen in anderen Salzstöcken oder Salzlagerstätten werden zusammenfassend in der Arbeit von z. B. WEISS (1980) beschrieben.

### **5.8.2 Zerrüttungszonen**

Unter einer Zerrüttungszone werden Gesteinsbereiche verstanden, die aus Steinsalz- bzw. Anhydritbruchstücken, eingebettet in einer sekundären Halitmatrix, bestehen. Derartige Bereiche treten vor allem im Liniensalz bis einschließlich im Unteren Orangesalz bei starker salztektonischer Deformation auf, wie z. B. im östlichen Bereich der Kaliflözaufbeulung zwischen den beiden Schächten.

### **5.8.3 Klüfte und Störungen in den Schächten**

Schacht 2 zeichnet sich gegenüber dem Schacht 1 durch ein häufigeres linsenförmiges oder nesterartiges Vorkommen von Sekundäreinschlüssen im Salzgestein aus. Das gilt auch für die sekundären Füllungen der angetroffenen Klüfte. Die Sekundärvorkommen wurden vorwiegend in den Teufenbereichen 350 bis 365 m, 400 bis 420 m und

bei 450 m beobachtet. Sie kommen sowohl in den Faltenkernen als auch auf den Faltenflanken vor. Die einzelnen Klüfte erweitern sich zu 1 bis 2 dm dicken, maximal 2 m langen Linsen, die mit Kristallinat verheilt sind. Die Kluffüllung besteht aus grobkristallinem klaren Halit und/oder Carnallit. Die Größe der linsenförmigen oder nesterartigen Vorkommen variiert von wenigen Zentimetern bis zu 50 x 100 cm, überwiegend sind sie jedoch länglich in der Größe von ca. 10 x 40 cm ausgebildet. Bemerkenswert ist die Form dieser Klüfte, die in etwa dem Querschnitt eines Brotes ähneln. Neben der Füllung von klarem grobkristallinen Halit und Carnallit als Zwickelfüllung enthalten die Klüfte unten über der gradlinigen Grenze einen bis zu 1 cm dicken, sekundär gebildeten Sulfatsaum. Die Lage dieser brotlaibförmigen Strukturen zur Schichtung im umgebenden Gestein ist variabel.

Im Bereich von 810 bis 840 m Teufe kommen einzelne größere Klüfte vor, die gegen die Schichtung einfallen und über den gesamten Schachtquerschnitt zu verfolgen sind. Die Kluffspuren verlaufen nicht durchgehend und sind bereichsweise abgesetzt. Als Kluffüllung kommen überwiegend grobkristalliner Halit, Carnallit und sekundärer Anhydrit vor. Jeweils unter diesen Klüften sind zahlreiche brotlaibförmige Strukturen (Klüfte) in unterschiedlicher Anordnung zu finden.

Anhand mineralogischer Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass es sich bei den Bereichen um lösungsmetamorphe Umkristallisationen handelt, die sich vor oder wahrscheinlicher gegen Ende der Diapirphase bildeten.

## **5.9     *Fluide***

### **5.9.1    Geochemische Systematik salinärer Lösungen**

Bei den im Salzgebirge vorkommenden Lösungen kann zwischen natürlichen Lösungen, die sich aus Gebirgslösungen und Lösungseinschlüssen (fluid inclusions) zusammensetzen, und den anthropogen verursachten sowie einer Mischung beider Typen (Mischlösungen) unterschieden werden.

Die Gebirgslösungen und Lösungen der Einschlüsse lassen sich in Restlösungen aus konzentriertem Meerwasser und in Metamorphoselösungen gliedern. Unter den anthropogen verursachten Lösungen werden jene aus Wetterlösungen, die durch die Auffahrung der Schächte bedingten Wässer bzw. allgemein die aus technischen Maßnahmen herrührenden Lösungen zusammengefasst. Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung kann eine Klassifikation der Lösungen gemäß dem Schema von HERRMANN et al. (1978) und VON BORSTEL (1992, 1993) in fünf

Tab. 3: Schema zur Klassifikation von Salzlösungen in marinen Evaporiten (HERRMANN et al. 1978).

Schema		Bezeichnung der Lösungen	mol/1000 mol H <sub>2</sub> O	Absoluter Salzanteil		Dichte [g/cm <sup>3</sup> ] bei 20° C	
Hauptgruppe	Untergruppe			g/100g Lösung [%]	g/1000 mL Lösung		
1	-	Süßwasser	-	bis 0,1	bis 1	bis 1,001 ±0,0005	
2	A	Salzwasser	NaCl-Lösung	NaCl > KCl und MgCl <sub>2</sub>	> 0,1 bis 3,5	> 1 bis 35	> 1,0005 bis 1,02 ±0,01
	B		KCl-Lösung	KCl > NaCl und MgCl <sub>2</sub>			
	C		MgCl <sub>2</sub> -Lösung	MgCl <sub>2</sub> > NaCl und KCl			
	D		CaCl <sub>2</sub> -Lösung	vorhanden			
3	A	schwach konzentrierte Salzlösungen	NaCl-Lösung	NaCl > KCl und MgCl <sub>2</sub>	> 3,5 bis 14	> 35 bis 150	> 1,02 bis 1,11 ±0,01
	B		KCl-Lösung	KCl > NaCl und MgCl <sub>2</sub>			
	C		MgCl <sub>2</sub> -Lösung	MgCl <sub>2</sub> > NaCl und KCl			
	D		CaCl <sub>2</sub> -Lösung	vorhanden			
4	A	konzentrierte Salzlösungen	NaCl-Lösung	NaCl > KCl und MgCl <sub>2</sub>	> 14 bis 27	> 150 bis 350	> 1,10 bis 1,24 ±0,02
	B		KCl-Lösung	KCl > NaCl und MgCl <sub>2</sub>			
	C		MgCl <sub>2</sub> -Lösung	MgCl <sub>2</sub> > NaCl und KCl			
	D		CaCl <sub>2</sub> -Lösung	vorhanden			
5	A	stark konzentrierte Salzlösungen	NaCl-Lösung	NaCl > KCl und MgCl <sub>2</sub>	> 27	> 350	> 1,22
	B		KCl-Lösung	KCl > NaCl und MgCl <sub>2</sub>			
	C		MgCl <sub>2</sub> -Lösung	MgCl <sub>2</sub> > NaCl und KCl			
	D		CaCl <sub>2</sub> -Lösung	vorhanden			

Hauptgruppen erfolgen. Anhand der Gesamtsalzkonzentration werden die Lösungen in die Hauptgruppen Süßwasser, Salzwasser, schwach konzentrierte Salzlösungen, konzentrierte Salzlösungen und stark konzentrierte Salzlösungen gegliedert (Tab. 3). Die weitere Differenzierung ermöglichen die Untergruppen A, B, C, und D.

Die Hauptgruppe 1 beschreibt Süßwasser und die Hauptgruppe 2 Salzwasser mit einem Salzgehalt von 0,1 bis 3,5 %. Der Grenzwert von 3,5 % entspricht dem Salzgehalt von Meerwasser. Die Hauptgruppe 3 umfasst schwach konzentrierte Salzlösungen mit einem Salzgehalt bis zu 14 %. Wässer der Hauptgruppe 4 enthalten bis zu 27 % an gelösten Komponenten. Hierbei handelt es sich um konzentrierte Salzlösungen, die z. B. bereits an NaCl gesättigt sein können. Die stärker konzentrierten Lösungen der Hauptgruppe 5 sind bei einer Salzkonzentration von mehr als 27 % mindestens an NaCl gesättigt. Mit den Buchstaben A, B, C und D werden den fünf Hauptgruppen jeweils vier Untergruppen zugeordnet. Sie geben an, ob eine Lösung vorwiegend NaCl, KCl oder MgCl<sub>2</sub> enthält und ob sie zusätzlich CaCl<sub>2</sub> aufweist (Tab. 3). Mit den Klassifizierungen ist es möglich, die Löse- und Reaktionsfähigkeit der während bergbaulicher Tätigkeiten im Salinar angetroffenen Lösungen zu beschreiben und einzuschätzen.

### 5.9.2 Ausbildung der Lösungsvorkommen

Lösungen können als Feuchtstellen, Tropfstellen oder zulaufend (Zulaufstellen) angetroffen werden. Die Zuflüsse sind zeitlich nicht immer konstant, sondern können sich verringern, vollständig versiegen oder sich periodisch in ihren Zulaufraten verändern. Sie werden unter dem Begriff **Zutrittslösungen** zusammengefasst (SCHRAMM 2005):

- Als Feuchtstelle wird ein Lösungszutritt ohne erkennbare sich frei bewegendende Lösung bezeichnet. Gelegentlich kommen in diesem Zusammenhang kleine Stalaktiten von wenigen Zentimetern Länge vor.
- Als Tropfstellen werden Lösungszutritte definiert, bei denen einzelne Tropfen aus dem Salzgebirge austreten. Oft kommen an diesen Stellen Stalaktiten und Stalagmiten vor.
- Als Zulaufstellen werden solche Orte bestimmt, an denen Lösungen mit erhöhten Zuflussraten von unter einem Liter bis zu mehreren Kubikmetern pro Minute zutreten.

Neben den Zutrittslösungen sind **Standlösungen** in Form von

- Pfützen/Tümpel (offene Standlösungen) und
- verdeckten oder reliktschen Lösungen bekannt.

Einen weiteren Typ von Lösungsvorkommen stellen **Lösungseinschlüsse** (fluid inclusions) dar. Bei diesen Lösungseinschlüssen handelt es sich um fluide Einschlüsse im Salzgestein. Die Einschlüsse können intrakristallin oder interkristallin an Korngrenzen vorkommen. Ihr Stoffbestand ist identisch mit den primären Meerwasserrestlösungen oder den sekundär gebildeten metamorphen Lösungen, aus denen sich die Wirtminerale bildeten.

### 5.9.3 Lösungsvorkommen im Salzstock Gorleben

Die angetroffenen Lösungsvorkommen sind nicht beliebig im Salzstock verteilt, sondern an bestimmte stratigraphische Horizonte mit einer entsprechenden petrographischen und strukturellen Ausbildung gebunden. Diese Horizonte zeichnen sich dadurch aus, dass ihr sedimentärer oder diagenetisch bedingter Verband trotz der halokinetischen Deformation erhalten geblieben ist (SCHRAMM 2005). Andererseits kommen z. B. im Knäuelsalz oder allgemein im Hauptsalz, das durch eine extreme Deformation und

Homogenisierung gekennzeichnet ist, verglichen mit den vorher genannten keine nennenswerten Mengen von Lösungen vor (BORNEMANN et al. 2004: 83).

Diese Gesetzmäßigkeit erlaubt es bei bekanntem geologischem Bau der Struktur, mögliche Lösungszutritte und ihr Ausmaß bei der Auffahrung vorherzusehen.

Bei der bisherigen Erkundung wurden Lösungszutritte hauptsächlich in den anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge (z3) angetroffen, in denen kluff- oder schichtgebundene Speicherräume möglich sind. Die angetroffenen Lösungen stehen unter petrostatischen Druck, was eine Verbindung zu den über dem Salzstock befindlichen Aquiferen ausschließt (vgl. NOWAK et al. 2002: 10ff.). Des Weiteren treten Lösungszutritte an der Grenze zwischen der Staßfurt- und der Leine-Folge (z2/z3) auf. Vom Zechstein 2 aus dem Bereich des Knäuel- bzw. des Hauptsalzes sind Lösungszutritte als Feuchtstellen z. T. ohne erkennbare Zutrittspunkte bekannt. Ihre Mengen sind in der Größenordnung von wenigen Litern oder mit einer Ausdehnung im Bereich von ein bis mehreren Kubikmetern bestimmt worden. Z. T. waren die Mengen gar nicht bestimmbar.

Das Volumen der bisher angetroffenen Reservoirs beträgt je nach stratigraphischem Horizont, in dem die Lösungen und Gase gespeichert sind, zwischen wenigen  $\text{cm}^3$  im Hauptsalz (z2) bis in den Bereich von etwa  $10^3 \text{ m}^3$  im Hauptanhydrit (NOWAK et al. 2002: 62ff.). Die Größe der Zutritte im Hauptanhydrit ist abhängig von der Größe der Hauptanhydritschollen, wobei die Wegsamkeiten innerhalb einer Scholle vollständig vernetzt sein können. Für die Zutritte aus dem Grenzbereich z2/z3 liegt die Gesamtausdehnung hydraulisch kommunizierender Gebirgsbereiche über den 10 m-Bereich, wenn bestimmte strukturelle Voraussetzungen vorliegen.

In Tabelle 4 sind beispielhaft einige Vorkommen von Lösungszutritten, Kondensaten und Gasen aufgelistet.

#### **5.9.4 Chemismus der Lösungsvorkommen**

Der Chemismus der Lösungen ist einerseits für das chemische Umfeld von Abschlussbauwerken, Behältern, etc. und die Ausbreitung von Radionukliden in wässriger Lösung und andererseits zur Klärung genetischer Fragestellungen wie Herkunft, Platznahme und Alter der Lösungen von Bedeutung. Der chemische Ausgangszustand für die langzeitliche stattgefunden Entwicklung im Einlagerungsbereich kann durch die Zusammensetzung der bei der Salzstockerkundung angetroffenen Lösungen in

Tab. 4: Beispiele von Lösungszutritten, Kondensaten und Gasen im Salzstock Gorleben.

Schichten	Zutrittsmengen	Bemerkungen
Anhydritmittel 1, 7 9 (z3AM)	<p>Feuchtstellen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feuchtstelle in der Elektrowerkstatt, 840 m-Sohle;</li> <li>• Feuchtstelle in der KFZ-Werkstatt, 840 m-Sohle;</li> <li>• Feuchtstelle in der Verbindungsstrecke KFZ-/E-Werkstatt, 840 m-Sohle;</li> <li>• drei Feuchtstellen in der Abwetterstrecke nach Süden, 820 m-Sohle</li> </ul>	Boudinierte, nicht verbundene Kluftrreservoirs in 0,2 -2,3 m mächtigen Anhydritlagen
Gorleben-Bank (z3OSM)	<p>Feuchtstellen und Zutritte bis max. 4 m<sup>3</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Füllort und in der Füllortstrecke Schacht 1, 840 m-Sohle, max. 4 m<sup>3</sup>;</li> <li>• Schacht 1 von 858 bis 863 m, max. 1 m<sup>3</sup> (Schätz.);</li> <li>• Bandstrecke 880 m-Sohle (Streckenvorbohrungen), 3,8 m<sup>3</sup></li> </ul>	Geschichtete Anhydritbank von wenigen mm bis ca. 0,7 m; Reservoirs: schichtparallele, teilweise verheilte Störungen, Klüfte, Carnallitfüllungen in Faltenkernen unterhalb der Bank, aufblätternde schichtparallele Anhydritlamellen
Hauptanhydrit (z3HA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bohrung RB012, 166 m<sup>3</sup>;</li> <li>• Bohrung RB233, 49 m<sup>3</sup>;</li> <li>• Bohrung RB031, 28 m<sup>3</sup>;</li> <li>• Querschlag 1W, max. 5,1 m<sup>3</sup></li> </ul>	Reservoirs in teilweise verheilten Klüften, die den Hauptanhydrit unregelmäßig verteilt durchsetzen. Reservoirgröße in Abhängigkeit von der Größe der Hauptanhydritscholle.
Grenze Zechstein 3 zu Zechstein 2 (z3/z2)	<p><u>Drusenartige Hohlräume:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Querschlag 1W, bei Vorbohrungen auf Lösungen und Gase, 27 l und 21 l;</li> <li>• Arbeitsräume 840 m-Sohle, 15,8 l und 7,9 l</li> </ul> <p><u>Störungen/Klüfte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bohrung RB014, 80 m<sup>3</sup>;</li> <li>• Bohrung RB023, 24 m<sup>3</sup></li> </ul>	Voraussetzung für Lösungszutritte: Hauptanhydrit muss infolge der salztektonischen Deformation abgepresst und das Kaliföz entweder angestaut oder in seiner Mächtigkeit stark reduziert sein. Reservoirs: drusenartige Hohlräume und Störungen/Klüfte in Verbindung mit stark deformierter Schichtenfolge vom Unteren Orangesalz, Liniensalz bis Gorleben Bank
Hauptsalz (z2HS)	<p>Feuchtstellen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Querschlag 1E/ Bohrort 3.1, wenige Liter; entspricht Feuchtstelle in der Bohrung RB119 bei 177 m, gering und nicht messbar;</li> <li>• Bohrung RB120 bei 127,3 m, Feuchtstelle (Kondensat), nicht messbar;</li> <li>• Bohrung RB032 bei 303 m, Feuchtstelle (Kondensat), nicht messbar</li> </ul>	Ehemalige Lösungen sedimentären und diagenetischen Ursprungs oder Metamorphoselösungen infolge der salztektonischen Durchbewegung zum Salzspiegel oder in die Anhydrit-Kluftrspeicher der z3-Folge abgepresst
Knäuelsalz (z2HS1)	Feuchtstellen mit Kondensat und Gasvorkommen, Ausdehnung im m <sup>3</sup> -Bereich	Reservoirs an anhydritische Einschaltungen innerhalb des Knäuelsalzes gebunden

Verbindung mit einer eventuellen anthropogen bedingten Einbringung von weiteren Lösungen über den Versatz beschrieben werden.

Tabelle 5 gibt die Durchschnittswerte chemischer Analysen verschiedener Lösungstypen nach SCHRAMM (2005) an.

Danach kommen Lösungen vor, die zunächst ein Gleichgewicht mit den sie einschließenden Salzmineralen nach der Ablagerung eingingen. Sie wurden häufig während des Salzaufstiegs mobilisiert und in ihre heutigen Reservoirs transportiert. Dabei wurde die primäre chemische Signatur während des Transportes oder durch ihre neue Speicherumgebung teilweise geändert, indem sich neue Gleichgewichte einstellten. Es entstanden sekundäre chemische Signaturen oder Mischsignaturen. Nur ein kleiner Teil der salzstockinternen Lösungen zeigt keine nachweisbaren Hinweise auf Lösungsmigration, d. h. diese Lösungen sind am Ort ihrer primären Speicherumgebung verblieben.

Die genetischen Vorstellungen werden unterstützt durch umfangreiche Untersuchungen zu den Bromgehalten in den Salzmineralen (weitere Details z. B. in BORNEMANN et al. (2001)). Während einer Eindunstungsphase bildet Brom keine eigenständigen Minerale, sondern wird diadoch für Chlor in chloridische Minerale eingebaut, wobei im Zuge fortschreitender Eindunstung die Bromidkonzentration in der Restlösung kontinuierlich ansteigt. Daraus resultiert während des Verlaufs der Eindunstungsphase eine ebenfalls kontinuierlich steigende Bromidkonzentration in den ausfallenden Haliten. Mit den Bromwerten werden damit Aussagen zu den Einflüssen möglicherweise salzstockexterner Lösungen auf das Mineralspektrum im Salzstock, daneben aber auch die Klärung von stratigraphischen Fragen und damit von Lagebeziehungen der Salzschichten ermöglicht.

Die im Erkundungsbergwerk (ohne Schächte), den Tiefbohrungen und den Einschlüssen vorkommenden Lösungen sind überwiegend an Carnallit oder Sylvit gesättigt. Untergeordnet kommen an Kieserit oder Bischofit gesättigte Lösungen vor. Diese salzstockinternen Lösungen sind einerseits durch Mischung primärer Meerwasserrestlösung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder andererseits aus der Reaktion von Kaliflözgestein mit NaCl-gesättigten Lösungen entstanden. Anhand charakteristischer geochemischer Signaturen konnte nachgewiesen werden, dass die Lösungen im Verlauf der Migration zum Teil mit Schichtsilikaten oder Karbonaten reagierten.

Alle in den Schächten beprobten Lösungen (z. B. aus 400 Teufe in vom Schacht ausgehenden Erkundungsbohrungen; BORNEMANN et al. 2004: 175) sind NaCl-gesät-

Tab. 5: Mittelwerte von Dichte, Haupt-, Neben- und Spurenkomponenten von Lösungen im Erkundungsbergwerk, in Tiefbohrungen und in Einschlüssen (I) sowie Schächten (II) nach SCHRAMM (2005).

Lokalität/ Stratigraphie/ Probenzahl	Art der Sättigung	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Haupt- gruppe	Unter- gruppe	2K	Mg	SO <sub>4</sub>	2NaCl	2KCl	MgCl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	[ppm]									
															(fiktive) Hauptkomponenten [Gew.-%]									
					Jänecke-Ionen-%																			
I/div./18	Kieseritisch	1,314	5	C	0,92	96,23	2,85									152,4	0,6	4196	23,8	1,6	589	588	4,9	
I/2SF/106	sy/vinitisch	1,238	4,5	A, C	36,87	57,00	6,13	13,048	7,4442	7,9		1	0,100		5	1090								
I/div./107	carnallitisch	1,299	4,5	C, D	2,46	96,44	1,10						0,054		122,4	1,8	4234	14,8	42,3	624	457	5,7		
I/2SF, z2HG/5	carnallitisch	1,286	5	D	1,28	98,72							0,285	1,2233	148,8		2849							
I/z3HA/17	carnallitisch	1,308	5	C, D	2,62	96,75	0,64						0,057	0,407	37,1	0,8	3916	10,8	86,1	621	270,3	9,7		
I/z3OSU/11	carnallitisch	1,310	5	C	1,45	97,19	1,36						0,030		109,1		4074							
I/z3OSM/6	carnallitisch	1,293	5	C	3,07	95,31	1,62						0,090		124,0	0,6	3826	18,7	1,6	735	400,7	0,3		
I/z3OSO/31	carnallitisch	1,310	(4), 5	C; D	1,78	97,55	0,67						0,040	0,150	108,7	2,5	5038	15,3	39,4	641	510,5	6,4		
I/z3BT/4	carnallitisch	1,270	5	C	2,05	95,24	2,71						0,020		202,5		4060							
I/z3AM/7	carnallitisch	1,301	5	C	2,40	95,83	1,77						0,028		207,5		3955							
I/z3SS/2	carnallitisch	1,294	5	C	4,96	93,68	1,33						0,065		195,0		3710							
I/z3RI/15	carnallitisch	1,289	5	C	4,85	93,76	1,4						0,032		155,3		4192							
I/div./20	bischofitisch	1,343	5	D	0,23	99,74	(0,57)	0,555	0,122	34,069			0,008	1,218	99,9	0,3	5443	10,76	93	1017	297	9,1		
II/z3OS/21	sy/vinitisch	1,250	4,5	D	11,59	88,41	0	3,370	3,360	16,639			0,027	5,373	22,6	93,6	1834	1,29	170,4	9,47	5,6	39,1		
II/z3OS/19	carnallitisch	1,287	5	C, D	4,26	94,39	1,35	1,770	1,712	24,906	0	0,507	0,039	2,416	118,5	40,6	3518	9,01	125,9	224,9	5,2	49,99		
II/z3OS/102	Biodrittsättigungs- fläche nicht er- leicht	1,213	4,5	A, D	25,78	58,68	15,54	22,805	1,319	1,573	0,021	0,899	0,292	0,297	2,3	45,3	316	0,16	155,4	195,2	4,6	13,4		

tigt und meistens infolge bergbaulicher Maßnahmen beeinflusst. Allerdings kommen in den Schächten auch untergeordnet Lösungen vor, die zusätzlich an Sylvit (nur Schacht 2) oder an Carnallit gesättigt sind. Diese salzstockinternen Lösungen können als nicht bergbaulich beeinflusst interpretiert werden. Sie sind durch Migration verändert worden, in deren Folge es zur Mischung mit NaCl-gesättigten Lösungen oder einer Wechselwirkung mit dem umgebenden Gestein kam.

Von Bedeutung für das chemische Milieu im Salzgestein und für eine Ausbreitung von Radionukliden in wässriger Lösung ist weiterhin, dass an unbeeinflussten Proben bislang nur reduzierende Verhältnisse und im Falle der  $MgCl_2$ -Lösungen niedrige pH-Werte festgestellt wurden.

### **5.9.5 Wassergehalte des Hauptsalzes**

Wassergehalte des Hauptsalzes erlangen z. B. bei der Diskussion zur Eisenkorrosion von Abfallbehältern unter anaeroben Bedingungen nach Verschluss des Bergwerkes an Bedeutung.

An Salzproben aus dem Erkundungsbereich 1 im Salzstock Gorleben wurden durchschnittlich 0,0164 Gew.-%  $H_2O$  im Hauptsalz bestimmt (SANDER et al. 2001). Die Wassergehaltsbestimmungen im Knäuelsalz, Streifensalz und Kristallbrockensalz ergaben z. T. sehr niedrige Gehalte von 0,014 Gew.-%, 0,017 Gew.-% bzw. 0,012 Gew.-% (SANDER et al. 2000).

Im Gegensatz dazu wurden z. B. in der Asse-Struktur Wassergehalte in Steinsalzproben mit einem Mittel von bis zu 0,05 Gew.-% (GIES et al. 1994: 32) bestimmt. Die geringen Wassergehalte im Hauptsalz des Salzstocks Gorleben sind auf die starke Brekzierung und Homogenisierung der Steinsalzsichten bei der Diapirbildung zurückzuführen, bei der die im Steinsalzgefüge ursprünglich eingeschlossenen Lösungen freigesetzt, mobilisiert und abgepresst wurden.

Wenn unterstellt wird, dass ein durchschnittlicher Lösungsgehalt ( $H_2O$ ) von  $< 0,02$  Gew.-% in Form von intra- und interkristallinen Flüssigkeitseinschlüssen vorliegen, dann würden daraus pro  $m^3$  Salzgestein etwa  $< 0,43$  Liter Wasser zur Verfügung stehen ( $[NaCl\text{-Dichte}] 2168 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0002 \text{ l/kg}$ ).

### 5.9.6 Kohlenwasserstoff-Vorkommen (KW)

Beim Auffahren des Bergwerkes sowie bei den vorangehenden Erkundungsarbeiten wurden Kohlenwasserstoffvorkommen angetroffen. KW-Vorkommen sind in folgenden Bereichen möglich:

- Kluftspeicher in Anhydritgesteinen oder Tonsteinen. Hierzu gehören Gebänderter Deckanhydrit, Grauer Salzton, Leine-Karbonat, Hauptanhydrit, Anhydritbank im Basissalz, Gorleben-Bank und Anhydritmittel im Anhydritmittelsalz,
- durch sekundäres Steinsalz verheilte Störungs- oder Kluftzonen im Grenzbereich z2/z3 und teilweise im Liegenden der Gorleben-Bank,
- ausgedünntes Kaliflöz Staßfurt im Grenzbereich z2/z3 bei Abwesenheit der Schichten des Gebänderten Deckanhydrits bis Hauptanhydrits.

In den Schachtvorbohrungen Go 5001 und Go 5002 traten beispielsweise flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe zu. Go 5001 hatte vor allem zwischen 864,5 und 872 m im Bank-/Bändersalz (z3BK/BD; Zutrittsstelle war die Gorleben-Bank bei 857 m) sowie zwischen 960,0 und 967,8 m im Orangesalz (z3OS) ihre Zuflüsse. Die Zuflussmessungen in der Bohrung Go 5001 ergaben Werte von knapp 5 m<sup>3</sup> Kondensat, während die Zuflusswerte der Bohrung Go 5002 insgesamt sehr gering waren. Weitere Hinweise auf das Vorkommen von Gas ergaben sich aus dem Auftreten von „Knistersalzen“. Sie wurden in verschiedenen Steinsalzhorizonten und im Carnallitit angetroffen.

Nahezu ausschließlich im Knäuelsalz (z2HS1), der ältesten Schichtfolge des Hauptsalzes, das in Teilbereichen zwischen 10 bis 20 % anhydritische Einschaltungen enthalten kann, wurden geringfügige Zutritte von Kondensat und Gas festgestellt (vgl. NOWAK et al. 2002: 58ff.). Die Verteilung der innerhalb des Knäuelsalzes gefundenen Kondensatvorkommen ist unregelmäßig und eine Gesetzmäßigkeit bezüglich der Lage der Gesamtstruktur des Hauptsalzsattels ist nicht erkennbar. Im Kernmaßstab (98 mm) machen sich allerdings zwischen KW-imprägnierten und benachbarten KW-freien Bereichen signifikante Unterschiede im Korngefüge und der Br-Verteilung bemerkbar, die möglicherweise auf eine tektonische Beanspruchung dieser Salzpartien hindeuten (POPP et al. 2002). Die Vorkommen sind bei länglicher bandartiger Erstreckung annähernd schichtig ausgerichtet, wobei sich der KW-imprägnierte Bereich durch eine stärkere Ausrichtung des Korngefüges und erhöhten Br-Gehalten auszeichnet. Sie sind auf

die halitischen Partien des Knäuelsalzes beschränkt und als intrakristalline Einschlüsse oder hauptsächlich im interkristallinen Porenraum zu finden.

An eindeutig kondensatführendem Material des Knäuelsalzes wurden Einschlussvolumina mit einer Variationsbreite von 0,04 und ca. 250 ml/m<sup>3</sup> bestimmt. Diese Werte entsprechen einem Volumenanteil von nicht mehr als rund 0,02 bis 0,03 % KW im Gestein. Unter Berücksichtigung der Beobachtung, dass der größte Teil der Fluide interkristallin gebunden ist und bei der Probennahme möglicherweise entweichen konnte, sind Werte von 0,1 bis 0,2 % denkbar (vgl. Disk. in POPP et al. 2002: 150). Die Konsequenzen der Vorkommen für die Langzeitsicherheit eines möglichen Endlagers mit HAW-Abfällen sind noch nicht abschließend diskutiert.

Bislang durchgeführte isotopengeochemische Untersuchungen (GERLING et al. 2002) und erdölgeologische Beckenmodellierungen (CRAMER 2005: 33) zeigen, dass das Muttergestein - wie bei allen anderen Kohlenwasserstoffvorkommen im Salzstock Gorleben - der kalkige Stinkschiefer des z2 ist. Folgendes Modell zum Migrationsweg der Kondensate in das Knäuelsalz ist denkbar (BORNEMANN et al. 2001):

- Die Kondensate sind während der Deformationen zu Beginn der Salzkissenbildung aus dem Liegenden in die noch flach gelagerten, als Liniensalz sedimentierten ältesten Schichten des Hauptsalzes migriert. Wegsamkeiten für die Kondensate wurden durch das Zerschneiden der Steinsalzkristallbänke, der feinkristallinen Steinsalzzwischenlagen und der Anhydritlinien geschaffen. Beim Verheilen der Bruchstrukturen erfolgten ein interkristalliner Einbau der Kondensate in die feinkristalline Steinsalzmatrix und ein intrakristalliner Einbau in die sekundär „verheilten“ Bereiche der Matrix.
- Beim weiteren Salzaufstieg kommt es zum Zerschneiden und Wiederverheilen der Steinsalzschiefer (Brekzie). Die Kondensate wurden während dieses Prozesses wiederholt mobilisiert und durch das Wiederverheilen in das umgebende Steinsalz eingebunden.

Beispiele für Zutrittsmengen im Hauptsalz sind in Tab. 4 ersichtlich:

Die Modellierung des Erdöl- und Erdgaspotenzials ergab weder für die heutige Situation noch für eine Zeit der geologischen Vergangenheit eine wirtschaftlich rele-

vante Akkumulation von KW im Bereich der Salzstruktur Gorleben-Rambow (CRAMER 2005: 37).

### **5.9.7 Zutritte von Lösungen, Kondensaten und Gasen in den Schächten**

Eindeutige geologische, nicht auffahrungsbedingte Lösungszutritte konnten erst unterhalb der Stützringe identifiziert werden. Sie traten vornehmlich im Schacht 2 auf. Schacht 1 hatte Zutritte nur bei ca. 860 m und bei ca. 875 m.

Nachfolgend sind alle Zutrittsstellen von Lösungen und auch von KW-Gasen bzw. Kondensaten beschrieben, die während der Schacht(2)kartierung beobachtet wurden.

- Von 304,4 bis 308,3 m starker Geruch nach Kohlenwasserstoff (KW) im Bereich der Gorleben-Bank,
- Von 312,2 bis 314,4 m am Weststoß starker Geruch nach KW,
- Von 330,2 bis 336,4 m starker Geruch nach KW und deutliche Gasfreisetzung im Bereich der Gorleben-Bank,
- Beim Stoßen der 17 m langen Vorbohrung 00YES02 RB172 Zutritt von Gas und Kondensat im Fundamentbereich,
- 348,2 bis 356,8 m Zutritt von KW-Gas und Kondensat aus sekundär mit Steinsalz verheilten Klüften sowie Hohlräumfüllungen,
- An der Grenze Stützringe zu Steinsalz einzelne kleine Feuchtstellen,
- Von 356,8 bis 359,0 m unterhalb der Stützringe schwacher Geruch nach KW-Stoff im Oberen Orangesalz,
- Von 359,0 bis 363,5 m schwacher Gaszutritt im Bereich der durch sekundäres Steinsalz verheilten Hohlräumfüllungen im Oberen Orangesalz,
- Von 363,5 bis 366,5 m einzelne Ankerbohrlöcher mit geringem Zutritt von Lösung und Kondensat im Oberen Orangesalz,
- Von 366,5 bis 372,5 m intensiver Geruch nach KW im Übergangsbereich Oberes Orangesalz zu Bank-/Bändersalz, geringe Zutritte von Kondensat und Lösung aus Ankerbohrlöchern,
- Von 372,5 bis 384,6 m geringe KW-Gaszutritte und tröpfchenweise Kondensat aus sekundär mit Steinsalz gefüllten Hohlräumfüllungen im Bank-/Bändersalz,

- Von 384,6 bis 386,6 m Zutritt von Gas und Kondensat im E an einer sekundär verheilten Kluft (Bank-/Bändersalz),
- Von 386,6 bis 392,3 m mit 40 gon nach W einfallende Kluft, hier Gas- und Kondensatzutritte,
- Von 399,7 bis 402,0 m nur noch schwacher Geruch nach KW (Bank-/Bändersalz),
- Von 405,1 bis 419,1 m „Knistersalz“-Gasimprägnation in sekundären Carnalliten (Bank-/Bändersalz),
- Von 428,2 bis 431,2 m Gas- und Kondensatzutritt aus Ankerbohrlöchern (Bank-/Bändersalz),
- Von 434,7 m bis 437,7 m Gas- und Kondensatzutritt aus Ankerbohrlöchern (Oberes Orangesalz),
- Von 437,7 bis 440,5 m mehrere Risse mit Gas- und Kondensatzutritt (Oberes Orangesalz),
- Von 449,6 bis 461 m mehrere Ankerbohrlöcher mit Gas- und Kondensatzutritt (Oberes Orangesalz),
- Von 461,0 bis 464,0 m mehrere Ankerbohrlöcher mit Gas- und Kondensatzutritt (Unteres, Mittleres und Oberes Orangesalz)
- Von 464,0 bis 466,7 m mit Steinsalz verheilte Risse mit geringen Lösungszutritten (Unteres Orangesalz),
- 472,7 bis 480,5 m: Zutritt von Gas, Kondensat und Lösung (Unteres Orangesalz),
- Bei 485 m im W: Gaszutritt (Unteres Orangesalz),
- Bei 554,2 m im SE: Kondensat (Oberes Orangesalz),
- Bei 687,4 m zwischen S und SW Ankerbohrlöcher mit KW-Gas (Unteres bis Oberes Orangesalz),
- Von 820,5 bis 824,0 m Gas- und Kondensatzutritt aus Sprenglöchern, wahrscheinlich aus sekundär verheilten Klüften (Oberes Orangesalz bis Bank-/Bändersalz),
- Von 827,2 bis 834,0 m wie vor und
- Von 839,5 bis 841,0 m wie vor.

Alle Lösungszutritte im Bereich der Schächte 1 und 2, die während der Teufarbeiten auftraten, sind bis auf eine Ausnahme versiegt. Geringfügige Zutritte wurden bis Berichtsfassung von BORNEMANN et al. (2002b) noch in der Träufelrinne in Schacht 2 beobachtet. Für den Zeitraum von 04. Januar 1999 bis 18. Januar 1999 wurde beispielsweise eine Gesamtzulaufmenge von 390 ml bzw. eine Zulaufrate von 0,019 ml/min ermittelt.

### **5.9.8 Permeabilitäten in Lösungs- und Gasvorkommen**

Beim Anbohren eines homogenen Reservoirs werden gespannte Fluide über die Bohrung aus dem Reservoir ausgepresst. Im Verlauf des Zutritts müssen die Fluide aus immer weiter entfernten Reservoirbereichen an die Bohrung herangeführt werden. Bestimmend für die Raten, mit denen die Fluide zuströmen können, ist neben den herrschenden Drücken, den geometrischen Verhältnissen und den Viskositäten der Fluide die Permeabilität des durchströmten Gesteins (NOWAK et al. 2002: 58ff.).

Außerhalb von Lösungs- und Gasvorkommen weisen die duktilen Salzgesteine und der Hauptanhydrit keine Permeabilitäten größer  $10^{-21}$  m<sup>2</sup> auf und sind als undurchlässig zu betrachten. Die Barrierewirkung ist auf das Fehlen vernetzter Porenraumstrukturen zurückzuführen. In Lösungs- und Gasvorkommen besitzt das Gebirge eine Permeabilität, deren Größe von der Struktur des Porenraums abhängt. Die größten Permeabilitäten sind in den klüftigen Reservoirs möglich, die im Hauptanhydrit und an der Grenze z3 zu z2 existieren können. Hauptanhydrit, der in kompakten Bereichen als undurchlässig anzusehen ist, kann in klüftigen Bereichen Permeabilitäten von mehr als  $10^{-15}$  m<sup>2</sup> aufweisen. Die abseits von Kluffstrukturen als räumlich begrenzte interkristalline Filme vorhandenen Fluidvorkommen besitzen um Größenordnungen kleinere Permeabilitäten als Fluidreservoirs in Kluffstrukturen.

### **5.10 Subrosion des Salzstocks Gorleben**

Die Subrosionsraten verschiedener Salzstöcke können je nach geologischer Situation unterschiedlich hoch sein. Grundsätzlich findet eine Ablaugung an den Salzspiegeln der in Nordwestdeutschland vorkommenden Salzstöcke bis in eine Tiefe von ca. 180 m statt. In Salzspiegeltiefen von ca. 180 bis 420 m sind besondere Randbedingungen erforderlich, damit sich eine entsprechende Ablaugung des Salzes in Form von Subrosionserscheinungen wie Erdfälle oder Grundwasserversalzung manifestieren kann (KELLER 1990).

Vom Standort Gorleben ist eine „fossile“ und in geringem Umfang rezent ablaufende Ablaugung des Salzstockdachs ebenfalls bekannt. Während der Prälster-Zeit und in den nachfolgenden Perioden mit kaltzeitlichen Klimaverhältnissen war die Subrosion durch eine geringere Tiefenlage des Salzspiegels und durch die Gletschertätigkeit mit ihren Begleitprozessen zeitweise besonders ausgeprägt.

Belegt wird die lokale Subrosion im Zeitraum von der Anlage der quartären Rinnen bis Postholstein durch die Ausbildung der Hutgesteinsbrekzie, die Ablagerungen des Geschichteten Gips- und Anhydritgesteins sowie eine hohe Differenz in der Holsteinbasis über dem Salzstock. Die durchschnittliche Ablaugungsrate für den Zeitraum betrug 0,2 bis 0,3 mm/Jahr.

Für den Zeitraum der letzten 127 000 Jahre seit dem Beginn der Eem-Warmzeit konnten über der Salzstruktur Gorleben–Rambow im Gebiet zwischen Lenzen und dem südwestlichen Ende des Salzstocks Gorleben keine Subrosions- oder Einsenkungsbewegungen (Subsidenz) mit geologischen Methoden nachgewiesen werden. Einige Grundwässer zeigen allerdings im tieferen Bereich der Rinne Isotopensignaturen, die aufgrund ihrer lokalen Position und ihres holozänen Alters eine geringe rezente Subrosion am Salzspiegel wahrscheinlich machen. Die sehr geringe Subrosionstätigkeit wird auch durch die Tatsache unterstrichen, dass verglichen zu früheren Kaltzeiten der Salzspiegel aufgrund der epirogenetischen Absenkung des Gebietes tiefer liegt, so dass gering mineralisierte Grundwässer weniger gut das Salz subrodieren können. Die Aussage gilt auch für die Zukunft, da sich die geologischen Verhältnisse im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und an dessen Salzspiegel erst mit Beginn einer neuen Kaltzeit vom Ausmaß einer Elster- oder Saale-Kaltzeit ändern würden. Bei einer erneuten Klimaänderung wird eher mit einer Kaltzeit vom Ausmaß der letzten als mit dem der älteren Kaltzeiten gerechnet.

Da offenbar große Bereiche der am Salzspiegel in überkippter Lagerung ausstreichenden leicht löslichen Kaliflöze durch die quartäre Rinnenbildung beeinflusst und umgewandelt wurden, sind sie heute durch die abdeckenden halitischen Kristallite vor weitergehender Ablaugung geschützt. Entsprechendes gilt auch für andere Kaliflözvorkommen am Salzspiegel, die in normaler Lagerung durch den Grauen Salzton und durch tertiäre Tone geschützt sind.

Die aus der langfristigen Entwicklung des Salzstocks abgeleiteten mittleren Subrosionsraten betragen ca. 0,014 mm/Jahr für den Zeitraum Miozän bis einschließlich Quartär, ca. 0,046 mm/Jahr für verschiedenen Zeiträume zwischen Wealden und Unter-Eozän

(Diapirphase) und insgesamt ca. 0,035 mm/Jahr durchschnittlich für verschiedene Zeiträume vom Wealden bis Quartär (vgl. KELLER 1990: Tab. 5; ZIRNGAST 1991). Werden diese Werte zugrunde gelegt, bedeutet dies eine Tieferlegung des Salzspiegels um 14 bis maximal ca. 46 m in einer Million Jahre.

### **5.11 Zukünftige Entwicklung der Salzstruktur Gorleben**

Die halokinetische Entwicklung des Salzstocks Gorleben zeigt nach den Ergebnissen der Randsenkenanalyse einen starken Anstieg der Aufstiegs geschwindigkeit vom Beginn des Durchbruchs bis zur Kulmination in der Kreide sowie danach einen langsamen Rückgang bis zur Gegenwart, sieht man von den leicht erhöhten Aufstiegs geschwindigkeiten während der kurzen Zeitabschnitte des Ober- bzw. Unteroligozän ab. Bei den z. Zt. herrschenden regionalen geologischen Bedingungen ist eine Änderung der jüngsten Aufstiegs geschwindigkeit nicht zu erwarten.

Einen geringen Einfluss auf das Aufstiegsverhalten könnte eine weitere bedeutsame regionalgeologische Absenkung des Gebietes mit verstärkter Sedimentation haben, wie die erhöhten Aufstiegsraten nach entsprechendem Geschehen während der etwa 11 Mill. Jahre (GRADSTEIN et al. 2004) umfassenden Zeitspanne des Oligozän vermuten lassen. Auch deutliche vom bestehenden neotektonischen Beanspruchungsplan hervorgerufene Änderungen könnten zu regionalen kompressiven Verhältnissen führen, die das Restsalz im Salzstock zum verstärkten Aufstieg bewegen. Die Umorientierung des neotektonischen Beanspruchungsplanes erfolgt allerdings nicht abrupt, sondern gehört zu den langfristig ablaufenden geologischen Prozessen.

Insgesamt führen nur Prozesse eine Änderung des heutigen Aufstiegsverhaltens herbei, die in längeren geologischen Zeiträumen von Millionen von Jahren ablaufen. Nach JARITZ (1994) ist daher infolge der dynamischen Verhältnisse, von denen der Salznachschub aus der Tiefe abhängt, damit zu rechnen, dass der künftige Salzstockaufstieg über mindestens eine Million Jahre ohne wesentliche Veränderung ablaufen wird. D. h. es ist in der Zukunft mit einer durchschnittlichen Hebungsrate von ca. 0,01 bis 0,02 mm/Jahr bzw. einer Fließgeschwindigkeit im Einlagerungsbereich von etwa 0,07 mm/Jahr zu rechnen. Dies führt für die nächste Million Jahre zu einer Hebung von ca. 10 bis 20 m und zu einer Salzwanderung im Einlagerungsbereich von etwa 70 m.

Wenn gleichzeitig im betrachteten Zeitraum von einer Million Jahre die Subrosion eine durchschnittliche Absenkung von ca. 14 bis 46 m aufweist (vgl. vorh. Kap.), so würden sich zukünftig Salzaufstieg und Subrosionswirken ungefähr kompensieren. Damit ist

für die zu erwartende Änderung der Tiefenlage der Salzstockoberfläche nur die regionale Subsidenz mit einer durchschnittlichen Rate von etwa 0,01 mm/Jahr zu berücksichtigen, was rechnerisch eine Tieferlegung der Salzstockoberfläche von 10 m in der nächsten Million Jahre ergibt. Auch dieser Wert ist sehr klein, so dass keine wesentliche Änderung der Salzspiegellage stattfindet. Lokal erhöhte Subrosionsraten, die die Einebnung des vorhandenen Salzspiegelreliefs bewirken, bleiben dabei möglich und ändern an der vorhergehenden Aussage nichts.

## 6 Hydrogeologie am Referenzstandort

Die tertiären und quartären Deckschichten im Umfeld des Salzstocks Gorleben bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und -geringleitern. Die Oberfläche des Rupeltons (Oligozän, toloE) ist die Basis des regionalen Fließsystems (Abb. 7). Die über dem Oligozän lagernden miozänen Unteren Braunkohlensande (tmiBS1) sind als bedeutender überregional verbreiteter Grundwasserleiter anzusehen, der in den Randsenken um den Salzstock durchgängig verbreitet ist, über dem Salzstock jedoch fehlt. Die Unteren Braunkohlensande werden vom gering durchlässigen Hamburg-Ton (tmiHT) des Mittleren Miozän überlagert.

Prägendes hydrogeologisches Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks ist die Gorlebener Rinne. 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 (qe) des Quartär in einer Kontaktfläche von mehreren km<sup>2</sup> unmittelbar dem Hutgestein, lokal auch Zechsteinsalzen auflagern. 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 (qL) überlagert. Die überlagernde, insgesamt wesentlich inhomogenere, vertikal wie lateral stark gegliederte Schichtenfolge der weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen (qs, qN) 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 Grundwasserleiter, die weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen den oberen Grundwasserleiter. Beide Systeme werden durch die Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex

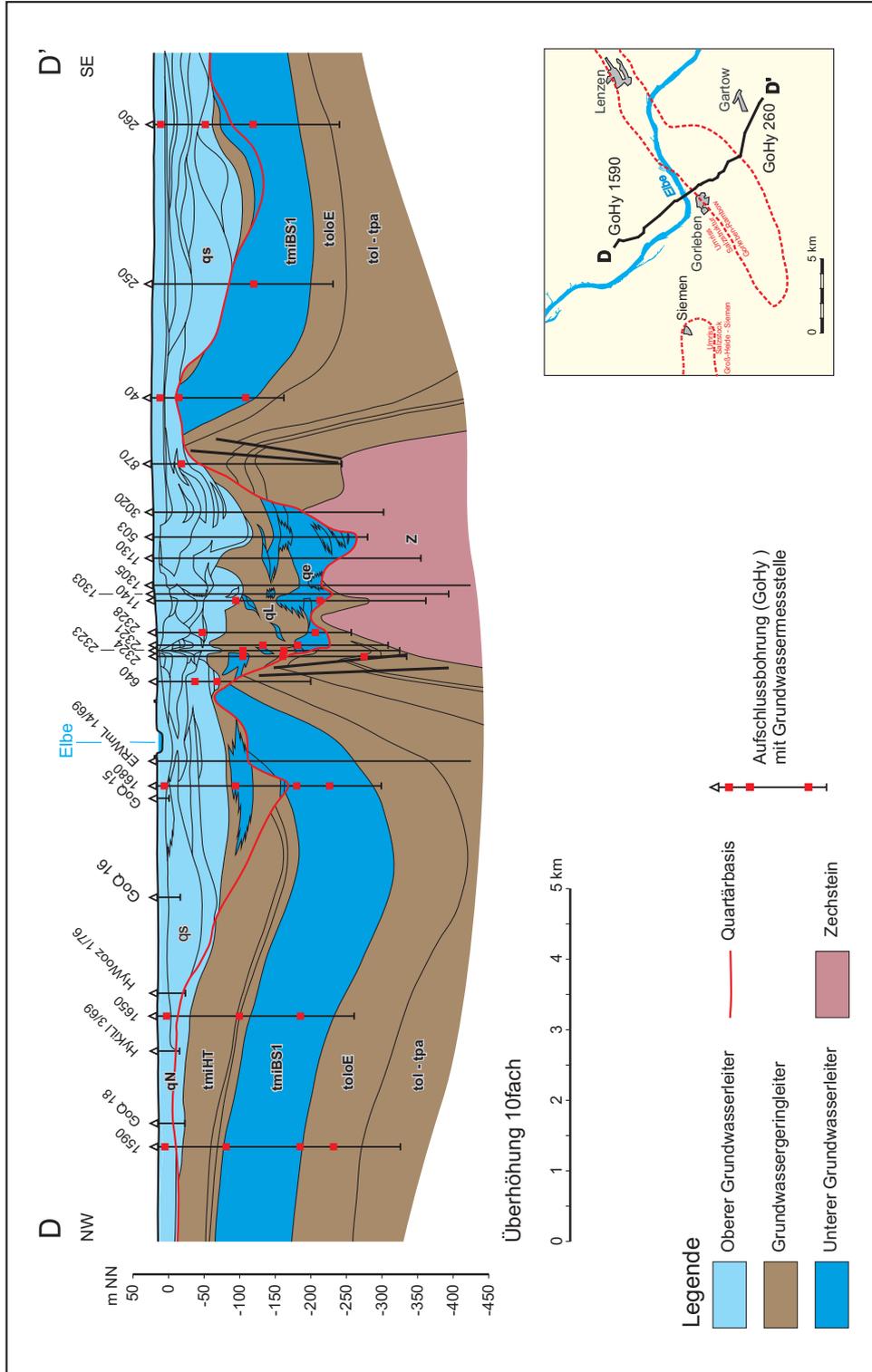


Abb. 7: Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben (aus: KLINGE et al. 2004).

getrennt (Abb. 7). Die Trennschichten sind in der Gorlebener Rinne sowie nördlich der Elbe lückenlos verbreitet, während im Südosten und Nordwesten größere Verbreitungslücken bestehen, so dass beide Grundwasserleiter hier in direktem Kontakt stehen.

### **6.1 Durchlässigkeitsbeiwerte und Pumpversuche**

Die an den verschiedenen Grundwasserleitern ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte liegen vorwiegend im Bereich von  $1 \cdot 10^{-4}$  bis  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Sie befinden sich damit in der Größenordnung, wie sie in der hydrogeologischen Fachliteratur für Grundwasserleiter angegeben wird. Die an bindigen Sedimenten ermittelten  $k_f$ -Werte streuen über etwa vier Größenordnungen zwischen  $10^{-7}$  und  $10^{-11}$  m/s und liegen damit in einem für Grundwassergeringleiter charakteristischen Bereich. Durch Pumpversuche wurde die hydraulische Anbindung des unteren Grundwasserleiters der Gorlebener Rinne an die Unteren Braunkohlensande der nordwestlichen Randsenke sowie an die präelsterzeitlichen Sedimente der Subrosionssenke über dem südwestlichen Teil des Salzstocks nachgewiesen (KLINGE et al. 2004). Bei Pumpversuchen im unteren Grundwasserleiter waren keine messbaren Absenkungen im oberen Grundwasserleiter zu verzeichnen. Hochwirksame hydraulische Kurzschlüsse zwischen dem oberen und unteren Grundwasserleiter scheinen zumindest im Nahbereich dieser Brunnenlokationen somit unwahrscheinlich (vgl. aber auch Kap. 6.2, letzter Absatz).

### **6.2 Oberflächennahe Grundwasserbewegung**

Die oberflächennahe Grundwasserbewegung und 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. Der tiefere Grundwasserabstrom wird durch die hochsalinen Ablaugungswässer von den Salzstöcken beeinflusst.

Die Geländeoberfläche im Gebiet von Gorleben weist nur sehr geringe Höhenunterschiede auf. Unter der topografischen Hochlage der Gartower Tannen im Südosten des Salzstocks liegt die Grundwasseroberfläche bei einer maximalen Grundwasserhöhe von knapp über 22 m. Aufgrund der hohen Infiltrationskapazität der dort anstehenden Dünensande weist das Gebiet praktisch keinen Oberflächenabfluss auf. Die langjährige Grundwasserneubildung erreicht Werte von bis zu 160 mm/Jahr auf. Das oberflächennahe Grundwasser strömt mit geringem Gefälle von 1 bis 1,5 ‰

nahezu radial von der Hochlage ab und tritt in den Niederungsgebieten der Seege und Elbe bzw. der Lucie in die Vorfluter über.

In der Elbe-Löcknitz-Niederung ist der Grundwasserabstrom stark anthropogen überprägt. Die Niederung ist von einem weit verzweigten Drainagesystem durchzogen, das über ein Schöpfwerk in die Elbe entwässert wird. Die hierdurch bedingte dauerhafte Absenkung des Grundwasserspiegels wird durch Infiltration von Oberflächenwasser aus der Elbe in den Grundwasserleiter kompensiert. Dies führt zu Gebietsabflüssen, die um den Faktor 3 über den natürlichen Oberflächenabflüssen liegen. Das Grundwasser strömt mit geringem Gefälle etwa parallel zur Elbe in ESE-WNW-Richtung. Am Nordrand des Untersuchungsgebietes erfolgt ein südlich, in Richtung der Elbe gerichteter Grundwasseranstrom aus den nördlich angrenzenden Höhenzügen der Mecklenburger Geest.

Die Fluktuation der Grundwasserstände im Untersuchungsgebiet wird unter natürlichen Bedingungen im Wesentlichen durch die witterungsbedingt saisonal unterschiedlich hohe Grundwasserneubildung gesteuert. Der langfristige Trend verläuft in den Geestgebieten weitgehend synchron mit der Entwicklung der Jahresniederschläge. An flussnahen Standorten der Niederungen fehlt dieser langfristige Trend. Hier werden die Veränderungen der Wasserspiegel im Wesentlichen durch den Wasserstand der Vorfluter gesteuert. Dabei verstärkt die Eindeichung der Flüsse diesen Einfluss, da sich bei Hochwasser höhere Wasserstände aufbauen, als dies unter natürlichen Bedingungen der Fall wäre.

Die Druckspiegel der tiefen Messstellen in den unteren Grundwasserleitern verlaufen weitgehend synchron mit den oberflächennahen Grundwasserständen, wobei allerdings die Amplitude der Schwankungen deutlich geringer ist. Dies zeigt, dass sich Veränderungen der Grundwasserspiegel im oberen Grundwasserleiter praktisch ohne Zeitverzug auf die Druckspiegel im unteren Grundwasserleiter durchpausen.

### **6.3 Süß-/Salzwassersystem**

Das Süß-/Salzwassersystem im Gebiet von Gorleben weist die für das norddeutsche Flachland typische Zweiteilung in einen oberen gering mineralisierten Süßwasserkörper wechselnder Mächtigkeit und einen unteren Salzwasserkörper auf. Eine vergleichbare vertikale Gliederung zeigt sich auch in der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer. Bei den Süßwässern handelt es sich vorherrschend um Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässer. Lediglich in den oberflächennahen Grundwässern dominiert Sulfat gegenüber Hydrogenkarbonat aufgrund der oberflächlichen Entkalkung der Sedimente. Im

Übergangsbereich zwischen Süß- und Salzwässern führen Ionenauschvorgänge 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.

Im Zentrum der Gorlebener Rinne führt der Kontakt von Zechsteinsalzen und Grundwasser erfüllten quartären Sedimenten zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer (Abb. 8). Die Salzwässer innerhalb des unteren Grundwasserleiters weisen durchgängig hohe Salzgehalte auf, die von ca. 100 g/l bis zur Salzsättigung von etwa 320 g/l reichen. Die Verbreitung dieser hochversalzten Solen ist nicht nur auf die Gorlebener Rinne begrenzt, sondern sie umfasst auch den zentralen, strukturell tiefsten Bereich der nordwestlichen Randsenke, deren unterer Grundwasserleiter mit den elsterzeitlichen Rinnensanden der Gorlebener Rinne hydraulisch verbunden ist. Die Oberfläche dieses Solenkörpers ist dort weitgehend horizontal ausgebildet, während seine Unterfläche an der Grundwasserleiterbasis verläuft. In den unterlagernden Schluffen des Eochatt (Ober-Oligozän) weisen die Porenwässer dagegen deutlich niedrigere Salzgehalte auf. Im Bereich der südwestlichen Senke sowie über dem westlichen Teil des Salzstockes mit durchgehender Tonüberdeckung ist die Salinität der Wässer an der Basis des Grundwasserleiters mit Salzgehalten von weniger als 10 bis etwa 30 g/l vergleichsweise niedrig; über dem randlichen Salzstock reicht der Süßwasserkörper verbreitet bis an die Grundwasserleiterbasis.

Messungen der Porenwasserdrücke des Salzwassers in Messstellen in der Gorlebener Rinne zeigen ein generelles Druckgefälle in nördliche Richtung. Dies lässt darauf schließen, dass das nördlich gerichtete Druckgefälle im Süßwasser in verringertem Maße auch auf das hochsaline Grundwasser übertragen wird und einen Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne in den unteren Grundwasserleiter der nordwestlichen Randsenke bewirkt. Hierauf deutet auch eine ausgeprägte Temperaturanomalie in der Gorlebener Rinne nördlich des Salzstocks hin. Die charakteristische Form des Solenkörpers innerhalb der nordwestlichen Randsenke, 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 Basis des Grundwasserleiters im Zentrum der Mulde liegt um etwa 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 folgend nach Nordwesten zum Zentrum der Randsenke abgelenkt, wo sie sich aufgrund ihrer erhöhten Dichte

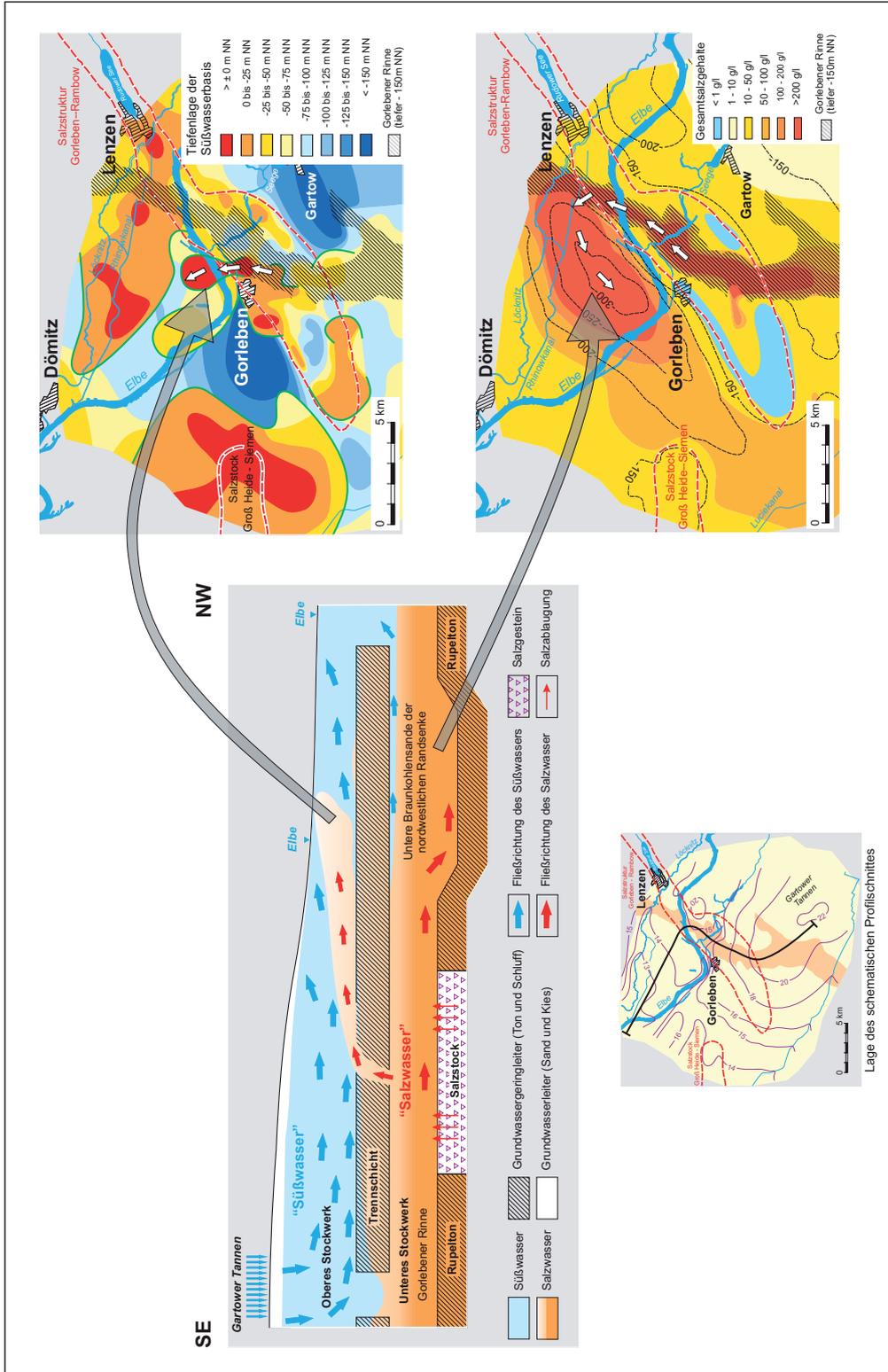


Abb. 8: Schema des Salzwatertransports aus der Gorleber Rinne (aus: KLINGE et al. 2004).

an der Basis des Grundwasserleiters sammeln. Ein direkter vertikaler Austrag dieser Salzwässer in oberflächennahe Grundwasserleiter wird durch flächenhaft verbreitete Grundwassergeringleiter erschwert. Zudem steht ein im unteren Grundwasserleiter unterhalb der Basis der Geringleiter verbreiteter artesischer Süßwasserkörper mit seinem erhöhten Druckpotenzial einem vertikalen Salzwasseraufstieg entgegen. Möglicherweise erfolgt im Westen von Dömitz außerhalb des Untersuchungsgebietes im Bereich einer vermuteten quartärzeitlichen Rinnenstruktur ein Austrag salzhaltiger Wässer in das oberflächennahe System (Abb. 8).

Die Mächtigkeit des Süßwasserkörpers schwankt im Untersuchungsgebiet Gorleben in starkem Maße. Die größten Süßwassermächtigkeiten von mehr als 100 bis maximal 170 m befinden sich in den Randsenken im Nordwesten und Südosten des Salzstocks in Neubildungsgebieten mit absteigender Grundwasserbewegung, in denen zudem ein direkter hydraulischer Kontakt zwischen dem oberen und dem unteren Grundwasserleiter besteht. Dagegen befindet sich über der Gorlebener Rinne eine prägnante Salzwasserhochlage, die sich in Nord-Süd-Richtung vom nordwestlichen Rand der Rinne im Osten Gorlebens bis nördlich der Elbe erstreckt. Im Süden dieser Versalzungszone wurden innerhalb des oberen Grundwasserleiters 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 Rinnengrundwasserleiters angetroffen. Die Mineralisation der Salzwässer verringert sich nach Norden hin bis auf Werte von 2 bis 10 g/l im Bereich der Elbe. Prinzipiell verhindert der den unteren Grundwasserleiter der Gorlebener Rinne flächenhaft überlagernde gering durchlässige Lauenburger-Ton-Komplex den direkten Salzwasseraustrag in den oberflächennahen Grundwasserleiter. Die Erstreckung dieser Salzwasserhochlage in Richtung des regionalen Grundwasserabstroms und die außergewöhnlich hohen Salzgehalte in ihrem Wurzelbereich liegen wahrscheinlich in einer Verbindung dieser Wässer mit den hochsalinen Wässern des unteren Rinnengrundwasserleiters begründet, auch wenn durch Erkundungsbohrungen im fraglichen Gebiet keine erhöhten vertikalen Durchlässigkeiten oder Verbreitungslücken im Lauenburger-Ton-Komplex nachgewiesen wurden. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich dabei um Salzwässer aus dem unteren Rinnengrundwasserleiter, die über lokal begrenzte hydraulische Fenster in den oberen Grundwasserleiter aufströmen und in den Aufstromgebieten der Elbeniederung in verdünnter Form an die Grundwasseroberfläche gelangen.

Aus der derzeitigen Süß-/Salzwässerverteilung können somit zwei Hauptausbreitungspfade der Salzwässer aus dem Kontaktbereich zwischen dem Zechsteinsalinar und dem elsterzeitlichen Rinnengrundwasserleiter abgeleitet werden (Abb. 8):

- 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 in der geschlossenen Muldenstruktur dieser Randsenke, ohne dass ein nennenswerter direkter vertikaler Austrag in oberflächennahe Grundwasserleiter erfolgt.
- 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.

#### **6.4 Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodelle**

Dreidimensionale Grundwasserströmungsmodelle führen unter der Annahme von Süßwasserbedingungen zu Wasserlaufzeiten von der Salzstockoberfläche in die Biosphäre in der Größenordnung von 10 000 Jahren. Für die Dichte beeinflussten Strömungsvorgänge der Salzwässer in der Gorlebener Rinne spiegeln diese Modelle die Realität jedoch nur in 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. Innerhalb der Gorlebener Rinne herrscht ein engräumiger Wechsel zwischen Solen pleistozänen und holozänen Alters und sowie Solen mit Mischsignaturen pleistozänen und holozänen Alters vor. Die Tatsache, dass etwa 10 000 Jahre nach Ende der letzten pleistozänen Kaltzeit die Salzwässer teilweise noch kaltzeitlich geprägt sind, bzw. Anteile kaltzeitlicher Wässern enthalten, lässt auf eine insgesamt geringere Durchströmung der Rinne im Vergleich zu Süßwasserbedingungen schließen.

### **7 Geomechanische Charakterisierung des Referenzstandortes**

Seit mehr als zwanzig Jahre wurden geomechanische Untersuchungen im Rahmen der Standortcharakterisierung durchgeführt. Die zahlreichen Ergebnisse werden zur Zeit in einem Bericht zusammengefasst. Sie ergänzen die im Vorhergehenden dargestellten Daten zum Deck-, Neben- und Salzgebirge, zur Hydrogeologie oder zur strukturellen Entwicklung des Referenzstandortes als Grundlage für die Erstellung des geologischen Referenzmodells.

Die Zusammenfassung wird die Beschreibung der verschiedenen angewandten Methoden (Gebirgsspannungsmessungen, geomechanische Messungen, hydraulische Untersuchungen, etc.), die Ergebnisse von In-situ-Untersuchungen aus den unterschiedlichen Bereichen des Grubengebäudes, die Aussagen zu Zielen und Art von Laborversuchen, die mit Hilfe der Versuche gewonnenen Kenngrößen und den daraus abgeleiteten Stoffgesetzen sowie die Ergebnisse von thermomechanischen Modellrechnungen enthalten. Der zusammenfassende Bericht trägt zur Vervollständigung der geowissenschaftlichen Datenbasis für den Referenzstandort bei. Die Datenbasis ist z. B. für die Beschreibung von Szenarien und der ihnen zugrunde liegenden FEPs (features, events, processes) oder als Randbedingungen für die Vorhersage zum Verhalten geotechnischer Barrieren (Versatz, etc.) im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse zwingend notwendig.

## **8 Relevanz der Inhalte des Referenzstandortmodells für die Langzeitsicherheitsanalyse**

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse sind Szenarien möglicher zukünftiger Entwicklungen des Referenzstandortes zu betrachten. Szenarien stützen sich auf die Identifikation von standortspezifischen FEPs (features, events, processes). Die „features“ ergeben sich aus der Standortbeschreibung eines spezifischen Standortes und an dieser Stelle aus den Inhalten des geologischen Referenzstandortmodells. Die Inhalte des Referenzstandortmodells finden weiterhin Eingang in die Nachweise zur Integrität z. B. des Wirtsgesteins oder der geotechnischen Barrieren. Die für eine Langzeitsicherheitsanalyse relevanten und wesentlichen Inhalte aus dem vorliegenden Referenzstandortmodell auf Basis der Kenntnisse bis zum Oktober 2000 sind:

- Am Referenzstandort steht ein Einlagerungsmedium (Hauptsalz) in der geforderten großen Tiefe von ca. 800 bis 1000 m für die Einlagerung von hochradioaktiven, Wärme erzeugenden Abfällen in ausreichender Menge und unverritz zur Verfügung.

Die Kenntnisse der stratigraphischen Abfolge sind durch die Weiterentwicklung der Brom-Methode und durch die feinstratigraphischen Analysen (z. B. Linienzählungen) der Schichtkomplexe verbessert worden, so dass Internstrukturen und die Lage von sicherheitsrelevanten Gesteinen (z. B. Hauptanhydrit) bei der Auffahrung möglicher Einlagerungsfelder bestimmt werden können.

- Die Verteilung natürlicher bruchhafter Diskontinuitäten (Klüfte) im

Wirtsgestein und der damit verbundenen Fluidvorkommen folgt bekannten Gesetzmäßigkeiten.

- Der Hauptanhydrit ist in Schollen zerbrochen, die hydraulisch voneinander isoliert sind. Fluidmigrationen zwischen Einlagerungsbereichen und Deck- und Nebengebirge über den Hauptanhydrit sind daher nicht möglich.
- Die Art, Genese und das Alter von Salzlösungsvorkommen innerhalb des Salzstocks sind bekannt und ihre Lage relativ zu einer möglichen Auffahrung der Einlagerungsbereiche vorhersehbar. Der Bereich des Hauptsalzes ist nahezu frei von Lösungsvorkommen. Sie sind untereinander nicht vernetzt. Dies gilt ebenfalls für die im zentralen Teil des Hauptsalzsattels auftretenden Kohlenwasserstoffvorkommen.
- Das Wirtsgestein befindet sich im chemischen Gleichgewicht mit darin enthaltenen Fluiden. Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind keine von außerhalb des Salzstocks eindringende Gebirgswässer vorhanden.

Die Aussage wird auch durch die Tatsache gestützt, dass die angetroffenen Salzstock internen Lösungen unter einem höheren als dem hydrostatischen Druck stehen.

- Die Entwicklung des Salzstocks ist abgeschlossen, so dass mit keinen hohen Aufstiegsraten innerhalb des Beurteilungszeitraumes von einer Million Jahre gerechnet werden muss.
- Die Integrität der Salzbarriere ist aus geologischer Sicht gewährleistet, da sich der Referenzstandort in einer tektonisch ruhigen Zone befindet und sich nur geringe Subrosionsraten im langfristigen geologischen Mittel herleiten lassen.
- Die im Deckgebirge vorhandene Hydrodynamik bewirkt, dass das Deckgebirge im Gegensatz zum Hauptsalz als eine Barriere zu betrachten ist, die nur eine geringe Rückhaltefunktion für Radionuklide beinhaltet. Dagegen würde das Deckgebirge aufgrund der Grundwasserbewegungen einen Beitrag zur Verdünnung möglicher Radionuklidkonzentrationen in der Geosphäre liefern.

## **9 Zusammenfassung**

Im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes ISIBEL („Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“)

von BGR, GRS und DBE TECHNOLOGY werden die Inhalte eines Referenzstandortmodells vorgestellt, die als Grundlage für Szenarienanalysen, Abschätzung der Integrität von Barriersystemen oder Ausbreitungsrechnungen sein können. Der Referenzstandort setzt ein HAW-Endlager im Wirtsgestein „Salz“ voraus.

Die Inhalte des Referenzstandortmodells beruhen auf der Datenbasis des Standortes Gorleben und sind beispielhaft als Teil eines möglichen Sicherheitsnachweises für einen noch zu bestimmenden endgültigen Endlagerstandort anzusehen.

Im Einzelnen werden die Geologie, die Entwicklungsgeschichte, die tektonischen Verhältnisse und die Hydrogeologie des Referenzstandortumfeldes beschrieben. Ein weiterer inhaltlicher Schwerpunkt ist die Darstellung der Geologie des Wirtsgesteins „Salz“ mit der Gesteinsausbildung, den strukturellen und geochemischen Gegebenheiten sowie den für Salzgesteine im Rahmen der Langzeitsicherheitsbetrachtungen wichtigen Lösungs- und Fluidvorkommen. Daneben wird ein kurzer Ausblick zur zukünftigen Entwicklung eines Referenzstandortes am Beispiel des Salzstocks Gorleben gegeben sowie die Relevanz der Inhalte des Referenzstandortmodells für die Langzeitsicherheitsanalyse diskutiert.

## BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE HANNOVER

Im Auftrag

(Dr. V. Bräuer)  
- Direktor und Professor -  
Abteilungsleiter B2  
Projektleiter Endlagerung

(Dr.-Ing. J. R. Weber)  
- Bergoberrat -  
Ref.-Leiter B 2.3

(Dr. S. Keller)  
- Geologieoberrat -  
Sachbearbeiter

## Literaturverzeichnis

- BECKER, A. (1993): An attempt to define a “neotectonic period” for central and northern Europe.-- Geol. Rdsch., Vol. 82, 1: 67-83, 13 Fig.; Berlin (Springer).
- BORNEMANN, O. (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrergebnissen.-- BfS-Schriften, **4/91**: 67 S., 13 Abb., 5 Tab., 24 Anl.; Salzgitter.
- BORNEMANN, O., BÄUERLE, G., BEHLAU, J. & MINGERZAHN, G. (2001): Endlagerprojekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie) -1. Geologischer Ergebnisbericht EB1.-- BGR, unveröffentl. Ber., **0120767**: 111 S., 22 Abb., 5 Tab., 6 Anh., 22 Anl.; Hannover.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., KELLER, S., MINGERZAHN, G. & SCHRAMM, M. (2004): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Abschlussbericht zum AP G 412110000.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 222 S., 29 Abb., 6 Tab., 4 Anl., 1 Anh.; Hannover.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J. & MINGERZAHN, G. (2002a): Endlagerprojekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle. 2. Geologischer Fachbericht (Geologische Schnitte zur untertägigen Erkundung).-- BGR, unveröffentl. Ber.: 19 S., 32 Anl.; Hannover.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., MINGERZAHN, G. & SCHRAMM, M. (2002b): Projekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Schächte Gorleben 1 und 2 (Hutgestein und Salinar). Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 159 S., 17 Abb., 12 Tab., 28 Anl., 16 Anh., 4 Taf.; Hannover.
- BORNEMANN, O. & FISCHBECK, R. (1988a): Salzspiegelbohrung GoHy 3080. Schichtenverzeichnis ab Oberfläche des Salzstocks (Stand: Oktober 1985).-- BGR, unveröffentl. Ber., **103658**: 13 S., 3 Tab.; Hannover.
- BORNEMANN, O. & FISCHBECK, R. (1988b): Salzspiegelbohrung GoHy 3154. Schichtenverzeichnis ab Oberfläche des Salzstocks (Stand: Oktober 1985).-- BGR, unveröffentl. Ber., **103669**: 14 S., 3 Tab.; Hannover.

- BORNEMANN, O., FISCHBECK, R. & BÄUERLE, G. (2000): Investigation of deformation textures of salt rock from various Zechstein units and their relationship to the formation of the salt diapirs in NW Germany. (In: GEERTMANN, R. M. (Hrsg.): SALT 2000).-- Proc. 8th World Salt Symposium, Vol. 1: 89-94, 5 Fig., 1 Tab.; Amsterdam (Elsevier) - ISBN 0 444 50065 0.
- BRÜCKNER-RÖHLING, S., ESPIG, M., FISCHER, M., FLEIG, S., FORSBACH, H., KOCKEL, F., KRULL, P., STIEWE, H. & WIRTH, H. (2002): Standsicherheitsnachweise Nachbetriebsphase: Seismische Gefährdung -Teil 1: Strukturgeologie.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 253 S., 39 Abb., 9 Tab., 34 Anl., 36 Anl. (n.f.d.Dienstgebrauch); Hannover.
- BURGHARDT, G.-A., LINK, H., SCHARF, V. & STOSS, K. (1982): Temperaturbedingte Reißbildungen beim Abteufen von Gefrierschächten im Salzgebirge.-- Kali und Steinsalz, Bd. 8 (1982), H. 9: 294-315, 15 B., 1 Tab.; Essen.
- CRAMER, B. (2005): Erdölgeologische 3D-Modellierung des Salzstocks Gorleben.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 57 S., 19 Abb., 5 Tab., Anl. A; Hannover.
- DE BOER, H. v. (1971): Gefügeregelung in Salzstöcken und Hüllgesteinen.-- Kali und Steinsalz, 5: 403-425, 16 Abb.; Essen.
- FISCHBECK, R. & BORNEMANN, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen.-- Geol. Jb., A 142: 233-256, 5 Abb., 9 Tab., 1 Taf.; Hannover.
- FISCHBECK, R. & MINGERZAHN, G. (1997): Geochemische, mineralogische und petrographische Untersuchungen an Salzgesteinen und Kluffüllungen aus Schacht 2, Gorleben ab Teufe 349,0 m (Fundament) bis Teufe 843,2 m (vorläufige Endteufe). 5. Zwischenbericht zum Arbeitspaket 9G 411210.-- BGR, unveröffentl. Ber., 116787: 64 S., 20 Abb., 18 Tab., 2 Anl.; Hannover.
- FRISCHBUTTER, A. (2001): Recent vertical movements (map 4). (In: GARETSKY, R. G. et al. (Hrsg.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346).-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 27-31, 1 Tab.; Kleinmachnow.

- GERLING, P., FABER, E. & WEHNER, H. (2002): Projekt. Gorleben. Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie). Interpretation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen (einschließlich der Daten aus der obertägigen Erkundung und der Schächte).-- BGR, unveröffentl. Ber.: 84 S., 31 Abb., 5 Tab., 2 Anl.; Hannover.
- GIES, H., GRESNER, H., HERBERT, H.-J., JOCKWER, N., MITTELSTÄDT, R., MÖNIG, J. & NADLER, F. (1994): Stoffbestand und Petrophysik des Steinsalzes im HAW-Feld (Asse, 800-m-Sohle).-- GSF, Inst. f. Tief Lagerung, GSF-Bericht **16/94**: 186 S.; Neuhberg.
- GLUSCHKO, V. V., DIKENSTEIN, K. I., SCHMIDT, K. & KOLDBECKER, K. (1976): Zur tektonischen Rayonierung des Nordteils der DDR nach dem Alter des gefalteten Untergrunds.-- Jb. Geol., 7, **8**: 9-16; Berlin.
- GRADSTEIN, F., OGG, J. & SMITH, A. (2004): A Geologic Time Scale 2004.-- Cambridge University Press, 1. Aufl.: 589 S., 1 Beil.; Cambridge/U.K.
- GRÜNTAL, G. & STROMEYER, D. (2001): Direction of recent maximal stress and epicenter map of tectonic earthquakes (maps 5 and 6). (In: GARETSKY, R. G. et al. (Hrsg.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346).-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, **1**: 33-37; Kleinmachnow.
- HERRMANN, A. G., SIEBRASSE, G. & KÖNNECKE, K. (1978): Computerprogramme zur Berechnung von Mineral- und Gesteinsumbildungen bei der Einwirkung von Lösungen auf Kali- und Steinsalzlagerstätten (Lösungsmetamorphose).-- Kali und Steinsalz, **7**: 288-299; Essen.
- JARITZ, W. (1994): Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Analogon für das Langzeitverhalten eines Barrierensystems.-- Z. dt. geol. Ges., **145/1**: 192-206, 3 Abb., 1 Taf.; Hannover.
- KAPUSTIN, I. N. (1971): Die Rolle des tektonischen Faktors bei der Bildung der Salzkuppelstrukturen.-- Z. angew. Geol., 17, **11**: 454-459; Berlin.

- 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.
- KELLER, S. (2006): Ermittlung und Analyse von Szenarien für Endlagerstandorte mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen (Deutschland). - Exemplarische Beschreibung eines Standortmodells und die Wirkung von Fernfeld-FEPs -- BGR, unveröffentl. Ber.: i. Vorb.; Hannover.
- KLINGE, H., BOEHME, J., GRISSEMANN, C., HOUBEN, G., LUDWIG, R. R., SCHELKES, K. & SCHILDKNECHT, F. (2004): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung, Teil II: Deckgebirge Hydrogeologie. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G3411800000.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 295 S., 95 Abb., 18 Tab., 12 Anh.; Hannover.
- KLÖCKER, R. (2000): Petrologische, sedimentologische und mikrofazielle Untersuchungen des Pegmatitanhydrits (Zechstein 4) in NW- und Mitteldeutschland.-- Univ. Bochum, Dipl.-Arbeit: 69 S., 40 Abb., 8 Anl.; Bochum.
- KÖTHE, A., ZIRNGAST, M. & ZWIRNER, R. (2003): Projekt Gorleben, Standortbeschreibung, Teil I: Deckgebirge Geologie. Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G3411900000.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 255 S., 43 Abb., 20 Tab.; Hannover.
- LEXIKON DER GEOWISSENSCHAFTEN. A-Edi (2000).-- Spektrum Akad. Verl. Heidelberg, Bd. 1; Berlin - ISBN 3-8274-0299-9.
- LUDWIG, A. O. (2001): Vertical movements since the beginning of Rupelian stage (map 1). (In: GARETSKY, R. G. et al. (Hrsg.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346).-- Brandenburgische Geowiss. Beitr., 8, 1: 5-12, 4 Fig.; Kleinmachnow.
- MINGERZAHN, G. (1987): Klastische Sedimente im subrodierten Kaliflöz Staßfurt (Zechstein 2) des Salzstocks Gorleben.-- Techn. Univ. Braunschweig, Dipl.-Arbeit: 120 S., 61 Abb., 9 Tab.; Braunschweig.
- NLFB (2004): Das Quartär in Niedersachsen und benachbarten Gebieten - Gliederung, geologische Prozesse, Ablagerungen und Landschaftsformen.-- Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB), [www.nlfb.de](http://www.nlfb.de): 1 S.; Hannover.

- NOWAK, T., WEBER, J. R. & BORNEMANN, O. (2002): Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 71 S., 44 Abb., 11 Tab.; Hannover.
- POPP, T., FISCHER, M. & KERN, H. (2002): Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) im Steinsalz.-- Meyniana, **54**: 131-154, 8 Abb., 2 Tab., 2 Taf.; Kiel.
- SANDER, W. & HERBERT, H.-J. (2000): Wassergehaltsbestimmung am Steinsalz (Erkundungssohle). Zwischenbericht für den Zeitraum 01.01.1998 - 31.12.1999. PSP Element 9G 412210-00.-- Ges. f. Anl.- u. Reaktorsicherheit mbH (GRS): 10 S., 6 Tab.; Braunschweig.
- SANDER, W. & HERBERT, H.-J. (2001): Wassergehaltsbestimmung am Steinsalz (Erkundungssohle). Abschlußbericht für den Zeitraum 01.01.1998 - 31.12.2000. PSP Element 9G 412210-00.-- Ges. f. Anl.- u. Reaktorsicherheit mbH (GRS), Entwurf eines mit BfS abgestimmten Ber.: 53 S., 7 Tab.; Braunschweig.
- SCHRAMM, M. (2005): Lösungen im Salzstock Gorleben. Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: i. Vorb., 5 Tab., 10 Anl., 20 Anh.; Hannover.
- SZEDER, T. & SIROCKO, F. (2005): Evidence for active tilting of the NW-German Basin from correlations between fluvial landscape and geological subground.-- Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.), **94**, 1: 66-93, 21 Fig., 4 Tab.; Berlin.
- VON BORSTEL, L. E. (1992): Lösungen in marinen Zechsteinevaporiten Deutschlands.-- Tech. Univ. Clausthal, Diss.: 321 S., 32 Abb., 27 Tab., 7 Anl., 24 Taf.; Clausthal-Zellerfeld.
- VON BORSTEL, L. E. (1993): Lösungen in marinen Evaporiten.-- BfS-Schriften, **10/93**: 315 S., 72 Abb., 74 Tab.; Salzgitter - ISSN 0937-4469.
- WEISS, H. M. (1980): Möglichkeiten der Entstehung sowie Art, Umfang, tektonische Stellung und nachträgliches Verhalten von Rissen und Klüften im Salzgebirge. Literaturstudie.-- Univ. Heidelberg, Inst. f. Sedimentforschung, GSF-Bericht **T 200**: 96 S.; Heidelberg - ISSN 07211694.
- ZIRNGAST, M. (1991): Die Entwicklungsgeschichte des Salzstocks Gorleben - Ergebnisse einer strukturgeologischen Bearbeitung.-- Geol. Jb., **A 132**: 3-31, 17 Abb., 2 Tab., 1 Taf.; Hannover.

ZIRNGAST, M., ZWIRNER, R., BORNEMANN, O., FLEIG, S., HOFFMANN, N., KÖTHE, A., KRULL, P.  
& WEISS, W. (2003): Projekt Gorleben. Schichtenfolge und Strukturbau des  
Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht.-- BGR, unveröffentl. Ber.: 570 S.,  
42 Abb., 32 Tab., 195 Anl., 1 Anh.; Hannover.

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Teufen der Schichtglieder der Leine-Folge in Schacht 1 (aus: BORNEMANN et al. 2002b: Tab. 4).	41
Tab. 2: Teufen der Schichtglieder der Leine-Folge in Schacht 2 (aus: BORNEMANN et al. 2002b: Tab. 10).	42
Tab. 3: Schema zur Klassifikation von Salzlösungen in marinen Evaporiten (HERRMANN et al. 1978).	47
Tab. 4: Beispiele von Lösungszutritten, Kondensaten und Gasen im Salzstock Gorleben.	50
Tab. 5: Mittelwerte von Dichte, Haupt-, Neben- und Spurenkomponenten von Lösungen im Erkundungsbergwerk, in Tiefbohrungen und in Einschlüssen (I) sowie Schächten (II) nach SCHRAMM (2005).	52

---

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Abgrenzung des Modellgebietes am Beispiel des Standortes Gorleben.	7
Abb. 2: Lage und Alter der Salinarstrukturen im Modellgebiet (aus: ZIRNGAST et al. 2003).	14
Abb. 3: Subsalinares Sockelstörungsmuster (aus: ZIRNGAST et al. 2003).	16
Abb. 4: Gebiete mit bedeutenden Senkungs- und Hebungstendenzen seit der Rupel-Zeit (ca. 32 Mill. J.) in Zentral- und Osteuropa (aus: LUDWIG 2001).	20
Abb. 5: Vereinfachter Schnitt durch den Salzstock Gorleben (aus: BORNEMANN et al. 2004: Abb. 3.3.2_2).	36
Abb. 6: Geologischer Vertikalschnitt durch die Schächte Gorleben 1 und 2 (aus: BORNEMANN et al. 2002a).	39
Abb. 7: Aquifergliederung im Deck- und Nebengebirge des Salzstocks Gorleben (aus: KLINGE et al. 2004).	62
Abb. 8: Schema des Salzwassertransports aus der Gorlebener Rinne (aus: KLINGE et al. 2004).	66