

Gutachten zur "Eignungshöffigkeit" des Salzstockes Gorleben als Endlager für radioaktive Abfälle

**Hydrogeologische und hydraulische Verhältnisse im Bereich des
Salzstockes Gorleben als Grundlage für die Beurteilung der
Eignungshöffigkeit des Standortes für die sichere Endlagerung
radioaktiver Abfälle**

***** Abschlußbericht *****

Erstellt im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums

Hannover, August 1993

Bearbeitung:

Dr. Ilse Albrecht *)

Dr. Detlef Appel **)

Dr. Walter Habler ***)

Dipl.-Geol. Jürgen Kreusch *)

Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann *)

Dr. Tobias Schwennicke *)

*) Gruppe Ökologie - Gesellschaft für ökologische
Forschung und Beratung mbH
Kleine Düwelstraße 21
30 171 Hannover
Tel.: 0511/85 30 55

**) PanGeo - geowissenschaftliches Büro
Schleiermacherstr. 20
30 625 Hannover
Tel.: 0511/ 55 76 66

***) Dr. Habler & Partner
Jacobistr. 25
30 163 Hannover 1
Tel.: 0511/ 39 27 21

Inhaltsverzeichnis	Seite
0. Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen	1
1. Vorgang und Aufgabenstellung	5
2. Unterlagen	5
3. Grundlagen zur Beurteilung der Eignungshöflichkeit des Standortes Gorleben	6
3.1 Rahmenbedingungen der Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland	6
3.1.1 Die Endlagerkonzeption	6
3.1.1.1 Grundzüge der Entsorgungspolitik	6
3.1.1.2 Wesentliche Merkmale der Endlagerkonzeption	9
3.1.2 Das geplante Endlager Gorleben	11
3.1.2.1 Auslegungsmerkmale des geplanten Endlagers	11
3.1.2.2 Abfallarten und Abfallmengen	12
3.1.3 Standortauswahl Gorleben	20
3.2 Vorgehensweise bei der Beurteilung von Endlagerstandorten	23
3.2.1 Allgemeine Schutzziele und generelle Anforderungen an Endlager	23
3.2.2 Grundsätze für das Vorgehen beim Nachweis der Langzeitsicherheit	25
3.2.3 Vorgehensweise beim Eignungsnachweis für Endlagerstandorte in der Bundesrepublik	27
3.2.3.1 Vorgehensweise bei der Standortvorauswahl	27
3.2.3.2 Vorgehensweise beim Nachweis der Langzeitsicherheit	28
3.2.4 Grundlagen für die Beurteilung der "Eignungshöflichkeit" des Standortes Gorleben	31

3.2.4.1 Definition des Begriffes "Eignungshöflichkeit"	32
3.2.4.2 Ansätze zur Beurteilung der "Eignungshöflichkeit" des Standortes Gorleben anhand von Untersuchungsbefunden	35
3.2.4.2.1 Grundlagen der Beurteilung	35
3.2.4.2.2 Kriterien und Bewertungsmerkmale	38
4. Hydrogeologische und hydraulische Verhältnisse am Standort Gorleben	44
4.1 Aufbau und Lagebeziehung hydrogeologischer Einheiten	44
4.1.1 Charakterisierung der Hutzone und der Schichtfolge des Neben- und Deckgebirges des Salzstocks Gorleben	44
4.1.1.1 Zechstein: Hutzone	44
4.1.1.2 Buntsandstein	48
4.1.1.3 Muschelkalk	49
4.1.1.4 Keuper	49
4.1.1.5 Lias	50
4.1.1.6 Dogger	50
4.1.1.7 Malm und Wealden (Berrias)	51
4.1.1.8 Valangin bis Alb	51
4.1.1.9 Cenoman bis Maastricht	52
4.1.1.10 Paläozän	52
4.1.1.11 Eozän	53
4.1.1.12 Oligozän	54
4.1.1.13 Miozän	55
4.1.1.14 Prälster-Zeit (Ältestpleistozän)	56
4.1.1.15 Elster-Eiszeit	57
4.1.1.16 Holstein-Warmzeit	59
4.1.1.17 Saale-Eiszeit	60
4.1.1.18 Eem-Warmzeit	61
4.1.1.19 Weichsel-Eiszeit	62
4.1.1.20 Holozän	63
4.1.2 Aufbau und Lagerungsverhältnisse der Schichtfolge des Neben- und Deckgebirges	64
4.1.3 Hydrogeologischer Aufbau des Neben- und Deckgebirges	67
4.2 Randbedingungen der Grundwasserbewegung	72

4.2.1 Das hydraulische System im Bereich des Teilsalzstockes Gorleben	72
4.2.1.1 Grundwassermengenbilanz	72
4.2.1.2 Die hydraulischen Verhältnisse in den Porenaquiferen des Deck- und Nebengebirges	73
4.2.1.3 Das Hutgestein als Aquifer	77
4.2.1.4 Grundwasserzutritte bis unter den Salzspiegel	78
4.2.2 Ermittlung der hydraulischen Systemeigenschaften	80
4.2.2.1 Pumpversuche	81
4.2.2.2 Direkte Durchlässigkeitsmessungen	84
4.2.2.3 Direkte Strömungsmessungen	84
4.2.2.4 Porositätsbestimmungen	85
4.2.2.5 Hydraulisch relevante physikalische Grundwassereigenschaften	86
4.3 Richtung und Geschwindigkeit des Grundwasserabstromes	88
4.3.1 Grundwassergleichenpläne	88
4.3.2 Numerische Modellierung der Grundwasserbewegung in den Deckschichten über dem Teilsalzstock Gorleben	89
4.3.2.1 Der 3d-Modellraum	89
4.3.2.2 Diskretisierung	90
4.3.2.3 Eingabeparameter	90
4.3.2.4 Ergebnisse der Modellierung	93
4.3.2.5 Vergleich der Modellergebnisse mit Messungen in der Natur	96
4.3.3 Modellierung der tiefen Grundwasserbewegung	98
4.4 Physikalische und chemische Eigenschaften des Grundwassers - Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben	108
4.4.1 Grundwassermeßstellennetz	108
4.4.2 Untersuchungsprogramm und Untersuchungsumfang	110
4.4.3 Chemische Beschaffenheit des Grundwassers	116

4.4.4 Isotopenalter	125
4.5 Bedeutung der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge für den Radionuklidtransport	128
5. Bewertung der hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse am Standort Gorleben	132
6. Quellen	142

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Seite

Abb. 4.-1:	Hutgestein des Teilsalzstockes Gorleben: Auftreten von elstereiszeitlichen Hutgesteinsbrekzien	47
Abb. 4.-2:	Übersichtskarte über postsaxonische Strukturen im Oberbau im Bereich des Blattes Salzwedel	75
Abb. 4.-3:	Geologisches Profil der BGR durch den oberen Teil des Teilsalzstockes Gorleben und sein Deckgebirge	79
Abb. 4.-4:	Modellierte horizontale Grundwassergeschwindigkeiten in Rechenebene 5 (-100 m zu NN) unter Berücksichtigung des Hutgesteins	94
Abb. 4.-5:	Berechnete Fließwege und Fließzeiten für zwei ausgewählte Startpunkte	102
Abb. 4.-6:	Modellalter des Grundwassers im Rinnenbereich und Fließzeiten bis zum Erreichen der Biosphäre von Aufpunkten an der Aquiferbasis ohne und mit Berücksichtigung des Hutgesteins	103
Abb. 4.-7:	Modellierte Grundwasserströmungswege und -laufzeiten nach einem Verfahren der zufälligen Wege	104
Abb. 4.-8:	Modellierte Grundwasserströmungswege und -laufzeiten nach einem Verfahren der zufälligen Wege	105
Abb. 4.-9:	Probennahme und Feldanalysen im Rahmen hydrochemischer Routine- und Sonderprogramme	112
Abb. 4.-10:	Basisfläche der hochohmigen Grundwasserleiter nach Bohrlochmessungen	117
Abb. 4.-11:	Versalzungszonen im Raum Gorleben	118
Abb. 4.-12:	Schematische Übersicht über wesentliche Reaktionen und stabile Mineralphasen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Konzentrationsbereichen des Chlorids	122
Abb. 4.-13:	Abhängigkeit zwischen Dichte und Entnahmetiefe der Grundwässer aus dem Bereich des Teilsalzstockes Gorleben	123

Abb. 4.-14:	Abhängigkeit zwischen Dichte und Leitfähigkeit der Grundwässer aus dem Bereich des Teilsalzstockes Gorleben	124
Abb. 4.-15:	¹⁴ C-Gehalte in Abhängigkeit von der Filtertiefe	127
Abb. 4.-16:	Zusammenfassende Darstellung von Untersuchungsergebnissen im Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben	131

TABELLENVERZEICHNIS

		Seite
Tab. 3.-1:	Abfallmengengerüst für ein Jahr sowie für 50 Jahre Betriebszeit des Modellendlagers Gorleben im Falle des integrierten Entsorgungskonzepts	17
Tab. 3.-2:	Abfallmengengerüst für ein Jahr sowie für 50 Jahre Betriebszeit des Modellendlagers Gorleben im Falle der Direkten Endlagerung	18
Tab. 3.-3:	Eingelagertes Radionuklidinventar in das Modellendlager Gorleben bei 50 Jahren Betriebszeit im Falle der Wiederaufarbeitung aller bestrahlten Brennelemente	19
Tab. 3.-4:	Abfallmengengerüst (Tonnen pro Jahr) für unterschiedliche Mengenverhältnisse Wiederaufarbeitung zu Direkter Endlagerung	20
Tab. 4.-1:	Horizontale Filtergeschwindigkeiten im Rinnenbereich und hydraulischer Einfluß des Hutgesteins auf das modellierte Gesamtsystem	106
Tab. 4.-2:	Berechnete Filtergeschwindigkeiten mit Berücksichtigung des Hutgesteins	106
Tab. 4.-3:	Vergleich beobachteter und berechneter Filtergeschwindigkeiten und Fließrichtungen	107
Tab. 4.-4:	Grundwassermeßstellen, gegliedert nach stratigraphischen Einheiten	109
Tab. 4.-5:	Grundwassermeßstellen, gegliedert nach Tiefenstufen	109

0. Zusammenfassung der Ergebnisse und Empfehlungen

Die Ergebnisse der Begutachtung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Das geplante Endlager Gorleben ist wesentlicher Bestandteil der bundesdeutschen Entsorgungs- und Endlagerkonzeption. Sowohl zu den Auslegungsmerkmalen des geplanten Endlagers als auch zu dem tatsächlich für das Endlager vorgesehene Inventar (Aktivität, Abfallarten, Abfallmengen) liegen bisher nur grobe und in Zukunft sicherlich noch zu verändernde Angaben vor. Unklar ist insbesondere, in welchem Ausmaß abgebrannte Brennelemente direkt endgelagert werden sollen. Die geplante Einlagerung stark wärmeentwickelnder Abfälle führt in jedem Fall zu besonderen Anforderungen an die geologischen Barriereteile Salzstock sowie Deck- und Nebengebirge.
- b) Die Benennung des Standortes Gorleben ist nicht auf der Grundlage eines nachvollziehbaren und vor allem aus geowissenschaftlicher Sicht akzeptierbaren Auswahlverfahrens geschehen. Offensichtlich haben bei der Auswahl des Standortes andere als sicherheitsrelevante geowissenschaftliche Gründe eine dominierende Rolle gespielt.
- c) In der Bundesrepublik Deutschland existieren bis heute keine allgemein akzeptierten Kriterien zur (Vor-)Auswahl von Endlagerstandorten und für die Bewertung von Untersuchungsbefunden, deren Anwendung die fachlich unstreitige Beurteilung sicherheitsrelevanter Sachverhalte erzwänge. Die von der Reaktor-Sicherheitskommission erarbeiteten "Sicherheitskriterien für die Endlagerung..." bieten keine angemessene Grundlage für die Auswahl von Endlagerstandorten. Auch hinsichtlich der in ihnen festgeschriebenen Vorgehensweise zum Nachweis der Langzeitsicherheit weisen sie schwerwiegende Mängel auf. Insbesondere erlauben die "Sicherheitskriterien" es, die sogenannte "Eignungshöflichkeit" des Standortes Gorleben unabhängig von den konkreten Standortbefunden und ohne klare Definition des Begriffes "eignungshöflich" aufrecht zu erhalten.

Eine angemessene Definition des Begriffes "eignungshöflich" wird in diesem Bericht gegeben. Danach sind nur solche Standorte eignungshöflich (besser: potentiell geeignet), die nachweislich bestimmte, bereits vor Beginn der Standortsuche formulierte Mindestanforderungen erfüllen. Die in Zusammenhang mit der Festlegung auf den Standort Gorleben genannten vier Kriterien stellen wegen ihrer Unverbindlichkeit keine ausreichende Grundlage dar, um dem Standort eine potentielle Eignung zuzuschreiben. Entsprechendes gilt für die Entscheidung über die untertägige Erkundung aufgrund der Erkundungsergebnisse von übertage und erst recht für die Standortbeurteilung aus heutiger Sicht.

- d) Das **Deckgebirge** des Teilsalzstocks¹ Gorleben ist sehr inhomogen und kompliziert aufgebaut. Die Lagerungsverhältnisse der Quartärserien sind nicht endgültig geklärt. Die einzelnen tertiären und quartären Grundwasserleiter stehen untereinander und mit dem Hutgestein in vielfältigem hydraulischen Kontakt. Ein halokinetischer Ringwall aus Tertiärsedimenten hemmt verbreitet in tieferen Grundwasserstockwerken die Grundwasserbewegung über den Teilsalzstock hinweg. Dennoch ist es in der Vergangenheit wiederholt zu flächenhafter Subrosion gekommen. Speziell im Bereich des Durchbruchs der Gorlebener Rinne durch den Ringwall ist eine ungehinderte Grundwasserbewegung über den Teilsalzstock hinweg möglich. In der Gorlebener Rinne lagern grundwasserführende Sedimente großflächig unmittelbar dem Hutgestein und stellenweise auch dem Salzgestein auf. Hier wurde vorausseilende Subrosion nachgewiesen. Das Hutgestein ist als Aquifer anzusehen und hat keine hydrogeologische Barrierewirkung. Es steht mit anderen Grundwasserleitern des Neben- und Deckgebirges in hydraulischem Kontakt. Auch die tonige Tertiärbedeckung in bestimmten Bereichen des Salzstockdaches konnte hydraulische Kontakte zum Salzgestein nicht verhindern. Ein prälsterzeitlich angelegtes Subrosionsbecken über dem südwestlichen Bereich des Teilsalzstockes belegt dies.
- e) Die Kenntnisse über den Aufbau des mesozoischen **Nebengebirges** des Salzstocks Gorleben-Rambow sind lückenhaft. Die hydrogeologische Bedeutung verschiedener Grundwasserleiter ist unklar. Unter dem Salzstocküberhang an der Südostseite des Teilsalzstocks Gorleben wurde Hutgesteinsbildung nachgewiesen. Speziell im Bereich des Überhanges ist mit dem Ausstreichen des besonders subrosionsgefährdeten Kaliflözes Staßfurt und des potentiell durchlässigen Hauptanhydrits zu rechnen. Eine hydrologische Gefährdung des Endlagers durch Wasserzutritt von der Seite ist daher nicht völlig auszuschließen.
- f) Die verfügbaren Untersuchungen über das Grundwasser am Standort Gorleben liefern ausreichende Meßergebnisse zur Beurteilung der oberflächennahen Grundwasserbewegung. Für das tiefere und tiefe Grundwasser in der Hutgesteinszone und im Nebengebirge ist das Datenmaterial in den verfügbaren Unterlagen sehr lückenhaft; entsprechend unsicher sind die Ergebnisse der Grundwassermodellierung in diesen Bereichen. Die lateral und vertikal stark heterogene Sedimentverteilung über dem Teilsalzstock Gorleben kann in den Simulationsmodellen, wie sie in den verfügbaren Untersuchungsberichten dargestellt werden, nicht detailliert genug nachgebildet werden, so daß lokale Aufstiegspfade von tieferem Grundwasser (ggf. mit kürzeren Laufzeiten) nicht erkennbar sind. Hydrochemische Untersuchungen sowie das Vorkommen isolierter Versalzungszonen deuten jedoch auf vertikale Wegsamkeiten für Grundwasser hin. Die Modellierung der tiefen Grundwasserbewegung im Nebengestein und der Ferntransport

¹ Im folgenden wird anstelle des Begriffs "Salzstock" Gorleben der Begriff "Teilsalzstock" Gorleben benutzt, da dieser die tatsächlichen Verhältnisse am Standort genauer beschreibt. Der Teilsalzstock Gorleben gehört zu der Salzstruktur Gorleben-Rambow, die aus den miteinander verbundenen Teilsalzstöcken Gorleben und Rambow besteht.

von Grundwasser in Richtung des Salzstockes Gorleben-Rambow sind unvollständig und wenig belastbar.

- g) Die bisher modellierten Grundwasserlaufzeiten im Deckgebirge liegen je nach Modellierung, Startpunkt und Vorflutgebiet zwischen ca. 1.000 und maximal 17.000 Jahren. Diese Grundwasserlaufzeiten liegen deutlich unterhalb der notwendigen Isolationszeiten für längerlebige Radionuklide. Aus dem Teilsalzstock Gorleben ins Deckgebirge freigesetzte Radionuklide mit relativ großer Halbwertszeit und/oder geringer Sorption werden deshalb in Zeiträumen von einigen tausend bis wenigen zehntausend Jahren die Biosphäre (oberflächennahes Grundwasser) erreichen. Es ist nicht zu erwarten, daß mit verfeinerten Modellierungen (z.B. Einsatz von Programmen mit Berücksichtigung variabler Grundwasserdichten) so lange Laufzeiten errechnet werden, daß der erforderliche Isolationszeitraum deutlich überschritten wird.
- h) Da verbindliche Bewertungskriterien für Untersuchungsbefunde bis heute fehlen, werden beispielhaft Kriterien (d.h. Standortanforderungen) zu folgenden Sachverhalten formuliert, mit denen das Deck- und Nebengebirge des Teilsalzstockes Gorleben, die einen unverzichtbaren Bestandteil der geologischen Barriere des geplanten Endlagers darstellen, bewertet werden können:

- * Geologischer und hydrogeologischer Aufbau des Deck- und Nebengebirges,
- * Hydrogeologische Verhältnisse im Grenzbereich Salzstock/Neben- bzw. Deckgebirge,
- * Subrosion,
- * Grundwasserbewegung und -geschwindigkeit in Deck- und Nebengebirge,
- * Grundwasserlaufzeiten durch das Deckgebirge.

Bei Anwendung der Kriterien auf die (hydro-)geologischen und hydraulischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge ergibt sich eindeutig, daß alle vorliegenden Befunde zu sicherheitsrelevanten Sachverhalten mit "sehr ungünstig" bewertet werden müssen. Da die Beurteilungskriterien aus der notwendigen Doppelfunktion des Barriereteils "Neben- und Deckgebirge" abgeleitet werden (einerseits Sicherung des Barriereteils Salzstock gegen Ablaugung, andererseits Verhinderung bzw. Verzögerung des Radionuklidtransportes in die Biosphäre), ist aus diesem Ergebnis die Schlußfolgerung zu ziehen, daß der Standort Gorleben bereits nach den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnisse weder eine potentielle Eignung noch eine wie auch immer gemeinte "Eignungshöflichkeit" besitzt. Diese Bewertung gilt - obwohl sie nur aus den Befunden zu Deck- und Nebengebirge abgeleitet wird - zwingend für den "Gesamtstandort" (d.h. die gesamte aus Salzstock und Deck- bzw. Nebengebirge bestehende geologische Barriere), da die ungünstigen Eigenschaften eines Teils der geologischen Barriere nicht durch mögliche günstige Eigenschaften des anderen Teils ausgeglichen werden können.

Zusammenfassend bleibt als Ergebnis festzuhalten: Die (hydro-)geologischen und hydraulischen Verhältnisse im Neben- und Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben und die daraus resultierenden Bedingungen für die Grundwasserbewegung und den Radionuklidtransport sind bereits nach heutigem Kenntnisstand als sehr ungünstig zu bewerten. Insbesondere ist das Deckgebirge nicht in der Lage, aus dem Teilsalzstock austretende Radionuklide mit relativ großer Halbwertszeit und/oder geringer Sorption von der Biosphäre fernzuhalten. Vielmehr werden entsprechende Radionuklide die Biosphäre innerhalb relativ kurzer Zeit (einige tausend bis wenige zehntausend Jahre) erreichen. Der Standort Gorleben ist deswegen hinsichtlich der Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle weder "eignungshöflich" noch potentiell geeignet.

Empfehlungen:

- * Wegen fehlender potentieller Eignung (bzw. "Eignungshöflichkeit") sollte der Standort Gorleben als Endlager für radioaktiver Abfälle aufgegeben werden. Da der Kenntnisstand zu entscheidenden sicherheitsrelevanten Merkmalen des geologischen Barriere- teils Deck- und Nebengebirge bereits heute ausreicht, werden auch weitere Untersuchungen bzw. Untersuchungsbefunde zu keiner grundsätzlich anderen Bewertung führen. Somit erübrigt sich auch die untertägige Erkundung des Teilsalzstocks Gorleben, da selbst mögliche positive Untersuchungsbefunde zur Teilbarriere Salzstock die gegebenen negativen Untersuchungsbefunde der Teilbarriere Deck- und Nebengebirge nicht kompensieren können.
- * Wegen der unbestrittenen Notwendigkeit eines langzeitsicheren Endlagers für radioaktive Abfälle wird empfohlen, ein neues Suchverfahren für Endlagerstandorte zu entwickeln und durchzuführen. Dieses Suchverfahren hat sich an den grundlegenden methodischen und geowissenschaftlich begründeten Anforderungen zu orientieren. Insbesondere sind vorab Kriterien zur Beurteilung von Untersuchungsbefunden festzulegen. Dabei sollte der Begriff "eignungshöflich" durch den klar definierten Begriff "potentiell geeignet" ersetzt werden.

1. Vorgang und Aufgabenstellung

Mit Vertrag vom 03.08.1992 sind die Gruppe Ökologie GmbH (Hannover) und das geowissenschaftliche Büro PanGeo (Hannover) vom Niedersächsischen Umweltministerium beauftragt worden, im Rahmen der "Begutachtung der Eignungshöflichkeit des Salzstockes Gorleben als Endlager für radioaktive Abfälle (Barrierebewertung und Langzeitsicherheit)" die Bedeutung der hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge des Salzstockes Gorleben für die Beurteilung der "Eignungshöflichkeit" des Standortes im Hinblick auf die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle zu untersuchen.

Inhaltlicher Schwerpunkt des vorliegenden Abschlußberichtes ist entsprechend der Aufgabenstellung die Darstellung und Bewertung der geologischen, hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse im Neben- und Deckgebirge des Salzstockes Gorleben. Dabei werden auch die Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung und ihre Bedeutung für den Radionuklidtransport berücksichtigt. Um überhaupt eine Bewertung der hydrogeologischen und hydraulischen Standortbefunde vornehmen zu können, werden Bewertungskriterien entwickelt und angewendet. Damit können auf geowissenschaftlicher Grundlage Aussagen zur "Eignungshöflichkeit" des Endlagerstandortes abgeleitet werden.

Neben der Darstellung und Bewertung bisheriger Untersuchungsbefunde wird geprüft, inwieweit die verfügbaren Unterlagen belastbare Aussagen zu den (hydro-)geologischen und hydraulischen Verhältnissen zulassen und wo Kenntnislücken bestehen. Des weiteren werden die Rahmenbedingungen der Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland dargestellt, wobei insbesondere auf die Standortauswahl Gorleben und die bisherige Bewertungsdiskussion eingegangen wird.

2. Unterlagen

Der Abschlußbericht beruht auf der Auswertung allgemein zugänglicher Fachinformationen und der bisher beim niedersächsischen Umweltministerium vorliegenden "Unterlagen zur Standorterkundung" (s. Kap. 6.). Außerdem sind Informationen aus Fachgesprächen eingeflossen, die in Zusammenhang mit der Begutachtung im niedersächsischen Umweltministerium stattgefunden haben (22.05.1991, 25.08.1992, 05.03.1993).

3. Grundlagen zur Beurteilung der Eignungshöflichkeit des Standortes Gorleben

3.1 Rahmenbedingungen der Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland

3.1.1 Die Endlagerkonzeption

3.1.1.1 Grundzüge der Entsorgungspolitik

Die in Deutschland verfolgte Endlagerkonzeption ist eingebettet in die Entsorgungspolitik. Rechtliche Grundlage für die Entsorgung ist § 9 a des Atomgesetzes (AtG), wonach derjenige, beim dem radioaktive Reststoffe anfallen, dafür zu sorgen hat, daß diese entweder schadlos verwertet werden oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden.

Den Kernpunkt der deutschen Entsorgungspolitik stellt das integrierte Entsorgungskonzept der Bundesregierung dar. Es wurde durch das vierte Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes 1976 insbesondere mit der Einführung des Wiederverwertungsgebotes in § 9 a AtG in seiner derzeitigen Fassung legislativ verankert (HOHLEFELDER 1987). Konkretisiert wurde dies durch den Beschluß der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke vom 28.09.1979, in dem die zügige Errichtung einer Wiederaufarbeitungsanlage für abgebrannten Kernstoff angestrebt wurde.

Die wesentlichen Teilaspekte des integrierten Entsorgungskonzepts sind:

- * Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente (externe Zwischenlager, Kompaktlagerung in Kernkraftwerken);
- * Wiederaufarbeitung der in Leichtwasserreaktoren anfallenden abgebrannten Brennelemente mit Einsatz der bei der Wiederaufarbeitung zurückgewonnenen Kernbrennstoffe in Reaktoren (MOX-Brennelemente);
- * Konditionierung, Zwischenlagerung und Endlagerung der verbleibenden radioaktiven Abfälle.

Weiterhin ist die direkte Endlagerung vorgesehen für Brennelemente, die nach § 9 a AtG aus technischen Gründen nicht wiederaufgearbeitet werden können oder für die eine Wiederaufarbeitung wirtschaftlich nicht vertretbar ist (v.a. Brennelemente des Hochtemperaturreaktors THTR-300 und des AVR - Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor). Als zusätzliche Option ist nach einer Entscheidung der Bundesregierung vom 23.01.1985 die direkte Endlagerung abgebrannter Brennelemente aus Hochtemperaturreaktoren und Leichtwasserreaktoren bis zur Einsatzreife weiterzuentwickeln (BUNDESREGIERUNG 1985). Ein wesentlicher Baustein dabei ist die für einen Durchsatz von 35 t Brennstoff pro Jahr konzipierte Pilotkonditionierungsan-

lage (PKA), die am Standort Gorleben errichtet wird. Gleichzeitig wurde mit dieser Entscheidung vom Januar 1985 die Priorität des integrierten Entsorgungskonzepts mit Wiederaufarbeitung bekräftigt.

Für die Endlagerung sind nach BUNDESREGIERUNG (1988) folgende Endlagerstandorte und Forschungsarbeiten von Bedeutung:

*** geplantes Endlager Gorleben:**

Im geplanten Endlager Gorleben sollen alle Arten radioaktiver Abfälle eingelagert werden, insbesondere wärmeentwickelnde Abfälle (s. 3.1.2). Ursprünglich ist man von einer Betriebszeit des Endlagers von rund 50 Jahren ausgegangen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand soll die Betriebszeit des Endlagers Gorleben rund 70 Jahre betragen (BFS 1990).

*** geplantes Endlager Konrad:**

Einlagerung von festen bzw. verfestigten Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung.

*** Versuchsendlager Asse:**

Im Rahmen der sogenannten Versuchsendlagerung wurden zwischen 1967 und 1978 rund 124.000 Behälter schwachaktive Abfälle und ca. 1.300 Behälter mittelaktive Abfälle nicht rückholbar eingelagert. In der Asse werden schwerpunktmäßig F&E-Arbeiten zum Nachweis der Genehmigungsfähigkeit eines Endlagers im Salz (d.h. Gorleben) durchgeführt. Nach BUNDESREGIERUNG (1988: S. 17) wird in Abhängigkeit vom Fortgang des Genehmigungsverfahrens Schacht Konrad und der Bewertung des Standortuntersuchungsprogramms Asse entschieden, ob ggf. auch in die Asse weitere radioaktive Abfälle eingelagert werden sollen. Hierfür kämen nur Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in Frage.

Zusätzlich steht seit der Wiedervereinigung 1990 das **Endlager Morsleben** zur Verfügung. In dem Endlager der ehemaligen DDR wurde 1981 der Einlagerungsbetrieb aufgenommen, und am 22.04.1986 wurde die Dauerbetriebsgenehmigung erteilt. Bis 31.12.1989 wurden eingelagert: 5.500 m³ feste radioaktive Abfälle, 8.000 m³ flüssige radioaktive Abfälle und 5.800 Stück umschlossene Strahlenquellen (ARBEITSKREIS 1991). Nach der Wiedervereinigung wurde eine bis zum 20.06.2000 befristete Einlagerungsgenehmigung ausgesprochen.

Weitere **Forschungsarbeiten** im internationalen Rahmen betreffen die Endlagerung in Festgesteinen (z.B. Zusammenarbeit zwischen GSF, BGR und NAGRA im schweizer Felslabor Grimsel, Forschungsarbeiten im Rahmen von EG-Projekten) sowie die Versenkung von radioaktiven Abfällen im Meer. Für die Bundesregierung steht die Versenkung radioaktiver Abfälle im Meer zwar nicht zur Diskussion, jedoch wurde aus forschungspolitischen Gründen an entsprechenden internationalen Untersuchungen mitgearbeitet. Lediglich 1967 wurden 180 Tonnen bundesdeutscher konditionierter Abfälle im Atlantik versenkt (BMFT 1983).

Neben den Endlagerstandorten und den sonstigen Forschungsarbeiten zur Endlagerung muß folgende grundsätzliche Endlagerungsalternative berücksichtigt werden (s. auch 3.1.2.2):

a) Integriertes Entsorgungskonzept:

Die bis heute mit Priorität verfolgte Endlagerung radioaktiver Abfälle nach Wiederaufarbeitung der abgebrannten Brennelemente;

b) Direkte Endlagerung:

Endlagerung abgebrannter Brennelemente ohne Wiederaufarbeitung. Diese Option soll bis zur Einsatzreife weiterentwickelt werden.

Mit der vorgesehenen Novellierung des AtG wird der gesetzliche Rahmen voraussichtlich dahingehend geändert, daß die direkte Endlagerung als gleichwertiger Entsorgungsweg neben dem des integrierten Entsorgungskonzepts anerkannt wird (SCHEFFLER & TEPEL 1992).

Vor diesem Hintergrund sind auch die Ergebnisse des Systemvergleichs zwischen direkter Endlagerung und integriertem Entsorgungskonzept von Interesse: In der 1981 bis 1984 erarbeiteten Systemstudie "Andere Entsorgungstechnik" wurde festgestellt (KFK 1990), daß

- * beide Entsorgungswege im Bereich der Endlagerung einen vergleichbaren Entwicklungsstand aufweisen (mit Notwendigkeit von Entwicklungsarbeit hinsichtlich des Handtierens schwerer und großer Einlagerungsgebäude bei der direkten Endlagerung sowie hinsichtlich der Einlagerung verglaster Abfälle in 300 m tiefen Bohrlöchern);
- * hinsichtlich der radiologischen Auswirkungen die direkte Endlagerung bei Berücksichtigung aller Stationen des Brennstoffkreislaufs leichte Vorteile aufweist (dabei sind der Sicherheitsstandard der damals für Deutschland geplanten Wiederaufarbeitungsanlage sowie die Langzeitsicherheit bei der Endlagerung mitberücksichtigt worden);
- * hinsichtlich der Kernmaterialüberwachung bei der direkten Endlagerung noch offene Fragen bestehen, für die jedoch Lösungen gefunden werden dürften;
- * die direkte Endlagerung auf absehbare Zeit kostengünstiger ist als die Endlagerung nach Wiederaufarbeitung.

Im Rahmen des vom BMFT geförderten F&E-Programms Direkte Endlagerung wird auch ein **Endlager-Mischkonzept** untersucht. Dabei werden mehrere Endlagervarianten untersucht, bei denen in unterschiedlichen Mengenverhältnissen Wiederaufarbeitungsabfälle und abgebrannte Brennelemente in einem Salzstock eingelagert werden sollen (KFK 1989). Für die ver-

schiedenen untersuchten Varianten werden dabei unter anderen Kriterien auch die Aspekte "Ausnutzung des Salzstocks" und "Langzeitsicherheit" bewertet.

3.1.1.2 Wesentliche Merkmale der Endlagerkonzeption

Die Endlagerkonzeption der Bundesrepublik Deutschland ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- * Endlagerung aller radioaktiven Abfälle im tiefen Untergrund,
- * Frühzeitige Konzentration auf das Wirtsgestein Salz,
- * Einlagerung in bergmännisch hergestellten Hohlräumen (Bergwerk).

Hinzu tritt die bis heute noch gültige Bevorzugung des integrierten Entsorgungskonzepts. Hier sind allerdings - nicht zuletzt durch die Aufgabe der in Wackersdorf geplanten deutschen Wiederaufarbeitungsanlage im Jahre 1989 - für die Zukunft noch Änderungen in Richtung auf eine Gleichberechtigung der direkten Endlagerung wahrscheinlich (s. 3.1.1.1). Für die Wiederaufarbeitung bestehen mit dem Ausland (Frankreich, Großbritannien) Verträge. Ab Mitte der neunziger Jahre ist die Rückführung der dabei anfallenden radioaktiven Abfälle in die Bundesrepublik vorgesehen.

Im folgenden werden die Entwicklungen und Begründungen für die einzelnen Merkmale kurz herausgearbeitet.

Endlagerung im tiefen Untergrund

Das Endlagerkonzept in Deutschland sieht vor, alle Arten radioaktiver Abfälle grundsätzlich in tiefliegenden geologischen Formationen endzulagern. Dies bedeutet, daß insbesondere auch sogenannte schwachradioaktive Abfälle, die in vielen anderen Ländern (z.B. USA, Frankreich) oberflächennah vergraben werden, im tiefen Untergrund endgelagert werden sollen.

Diese Entscheidung, die bereits zu Beginn der sechziger Jahre gefallen ist, beruht im wesentlichen auf der Berücksichtigung der geologischen und klimatischen Verhältnisse in Deutschland, der hohen Bevölkerungsdichte sowie des vorhandenen technischen und wissenschaftlichen Potentials (VIEHL 1981a).

Nachdem in den USA bereits Mitte der fünfziger Jahre die Möglichkeiten der Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen untersucht worden sind (NAS 1957), wurden zu

Beginn der sechziger Jahre auch in Deutschland Überlegungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle angestellt. Unter Berücksichtigung der internationalen Erfahrungen (i.w. USA) wurde die Bundesanstalt für Bodenforschung (BfB, heute Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR) 1962 vom damaligen Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung (BMwF) ersucht, "Fragen der Möglichkeiten der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund" für das Gebiet der Bundesrepublik zu klären (KÜHN 1980). In diesem Ersuchen ist bereits die Entscheidung für die Endlagerung im tiefen Untergrund enthalten. Der Bericht der BfB hatte zum Ergebnis, daß künstliche Hohlräume in Salzgesteinen die günstigsten Voraussetzungen für die Endlagerung radioaktiver Substanzen bieten (MARTINI 1963). Bereits zwei Jahre später wurde das Salzbergwerk Asse erworben und vier Jahre später mit der (Versuchs-)Einlagerung von Abfällen dort begonnen.

Frühzeitige Konzentration auf Salz

In einem Memorandum der Deutschen Atomkommission vom 09.12.1957 wurde bereits die Notwendigkeit von Entwicklungsarbeiten zur Beseitigung der radioaktiven Rückstände gesehen (SCHMIDT-KÜSTER 1982). Konkrete Schritte wurden dann im Rahmen des 2. Atomprogramms (1963 - 1967) formuliert (DAK 1963). Darin wurden als vordringliche Aufgaben Planung, Vorbereitung und Ausführung eines Endlagers in einer Salzstruktur angestrebt. Der Erwerb des Salzbergwerks Asse 1965 war dann der folgerichtige Schritt zur Realisierung der Ziele.

Entscheidend für die frühzeitige Festlegung auf das Einlagerungsmedium Salz waren nach KÜHN (1980, 1987) neben dem Aufgreifen der damaligen Überlegungen in den USA vor allem die Ergebnisse des Gutachtens von MARTINI (1963). Darin wird Salz als Einlagerungsmedium eine besondere Stellung zugesprochen, da es weder nennenswerte Poren noch Klüfte aufweist und für Wasser und Gase praktisch undurchlässig ist. Zusätzlich wird die Plastizität von Salz unter Belastung als Vorteil hervorgehoben. Neben diesen Eigenschaften von Salzgestein, die bis in die jüngste Zeit für die Begründung der Option Salz immer wieder angeführt werden, hat nach KÜHN (1987) vor allem auch die geologische Situation in der norddeutschen Tiefebene, unter der rund 200 Salzstöcke vorkommen, die Empfehlung für Salz beeinflusst.

Damit war in der ersten Hälfte der sechziger Jahre die Festlegung auf die Option "Salz als Einlagerungsgestein" durchgesetzt, die - nach dem Erwerb der Asse - letztendlich 1977 in der Benennung des Teilsalzstocks von Gorleben als zentralem Endlagerstandort für alle Arten radioaktiver Abfälle mündete (s. 3.1.3). Andere Einlagerungsmedien bzw. auch Beseitigungsmethoden für radioaktive Abfälle wurden danach in Deutschland nicht mehr ernsthaft betrachtet. Lediglich im internationalen Rahmen wurde und wird an Projekten teilgenommen, bei denen auch andere Einlagerungsmedien untersucht werden (z.B. Felslabor Grimsel, Programme der EG für die Bewirtschaftung und Lagerung radioaktiver Abfälle). Der Mitte der siebziger Jahre erfolgte Zugriff auf das Eisenerzbergwerk Konrad stellt keine Abkehr von der Option Salz dar, sondern ist lediglich Folge der Zugriffsmöglichkeit auf das relativ trockene Eisenerzbergwerk.

Bergwerkskonzept

Ein weiteres Merkmal des deutschen Endlagerkonzepts ist die Absicht, alle Arten radioaktiver Abfälle in fester bzw. verfestigter Form in bergmännisch erstellten Hohlräumen (Bergwerke) endzulagern. In den siebziger bis in die achziger Jahre hinein waren für bestimmte Abfälle jedoch auch andere als Bergwerkskonzepte vorgesehen. Für das bei der Wiederaufarbeitung anfallende Tritium war zum Beispiel als eine Option das Verpressen in tiefliegende Porenaquifere vorgesehen. Mit der Benennung von Wackersorf als Standort der Wiederaufarbeitung wurde die Verpressung von Tritium in Bayern untersucht (RÖTHEMEYER 1987). Des weiteren wurde über viele Jahre hinweg im Rahmen von F&E-Programmen in der Asse untersucht, inwieweit schwach- und mittelaktive Abwässer aus der Wiederaufarbeitung behälterlos in eine zuvor erstellte Kaverne zusammen mit einem hydraulischen Bindemittel eingebracht werden können (KÜHN 1976: S. 360). Mit der Aufgabe der Wiederaufarbeitung in Deutschland (Verzicht auf Wackersdorf 1989) sind diese vom Bergwerkskonzept abweichenden Vorhaben hinfällig geworden.

3.1.2 Das geplante Endlager Gorleben

3.1.2.1 Auslegungsmerkmale des geplanten Endlagers

Solange noch keine ausreichenden standortspezifischen Daten über die Internstruktur des Teilsalzstocks vorliegen, mit deren Hilfe eine genaue Planung des Endlagerbergwerks möglich ist, wird mit einem standortunabhängigen Konzept für das Endlagerbergwerk gearbeitet. Grundlage dabei ist das integrierte Entsorgungskonzept (s. 3.1.1.1).

Nach VIEHL (1981b) ist die Dimensionierung des Bergwerks auf die Abfallarten und -mengen ausgerichtet, die aus einer Wiederaufarbeitung mit einem Durchsatz von 1.400 t Uran/a (plus zugehörige Abfälle aus anderen Quellen) stammen.

Durch die neueren Entwicklungen (Aufgabe der deutschen Wiederaufarbeitung, direkte Endlagerung zunehmend interessant, verbesserte Konditionierungsverfahren) sind die Randbedingungen für die möglicherweise einzulagernden Abfälle in den vergangenen Jahren bis heute in steter Entwicklung begriffen (s. 3.1.2.2). Um ausreichend flexibel zu bleiben, ist deshalb eine modulartige Bauweise des Endlagerbergwerks vorgesehen, so daß Anlagenteile, die für bestimmte Abfallströme erforderlich sind, auch später errichtet werden können (WOSNIK 1991). Ob dann allerdings noch die bisherige Absicht, das Endlager im Rückbau von den Feldesgrenzen zu den Schächte hin zu verfüllen (WOSNIK 1991, S. 133), eingehalten werden kann, ist fraglich.

Von Bedeutung für die Endlagersicherheit sind folgende Auslegungsmerkmale und Sicherheitsabstände für das Endlagerbergwerk Gorleben (WOSNIK 1991):

- * Abstand Grubengebäude von Anhydrit und Carnallit:
50 m für Strecken und Strecke-Kammern, 75 m für Faßgebinde-Bohrlöcher sowie 100 m für Kokillen-Bohrlöcher und Einlagerungsstrecken. Ausnahmen stellen die möglicherweise notwendigen Durchörterungen dieser Gesteine durch Strecken dar.
- * Sicherheitsfeste gegen Salzstockflanke: 200 m,
- * Sicherheitsabstand wärmeentwickelnder Einlagerungsfelder von den Schächten: 300 m,
- * Sicherheitsabstand zum Deckgebirge: etwa 300 m (VIEHL 1981).

Die Sicherheitsabstände und -festen sind nach WOSNIK (1991) im Verlauf der weiteren Planungen und Untersuchungen zu prüfen und den tatsächlich gegebenen Notwendigkeiten anzupassen.

Die Betriebszeit des geplanten Endlagers soll nach gegenwärtigem Kenntnisstand rund 70 Jahre betragen (BFS 1990)

3.1.2.2 Abfallarten und Abfallmengen

Die in das Endlager einzulagernden Abfallarten und -mengen hängen entscheidend vom gewählten Weg der sogenannten Entsorgung ab. Der 1979 von den Regierungschefs von Bund und Ländern favorisierte Weg der möglichst vollständigen Wiederaufarbeitung bestrahlter Leichtwasserreaktor-Brennelemente (BULÄN 1979) ist seitdem, zumindest was den Anteil am Gesamtaufkommen bestrahlter Brennelemente betrifft, immer fragwürdiger geworden. Nach der Aufgabe der nationalen Wiederaufarbeitung wird zur Zeit in der politischen Diskussion (durchaus auch von Energieversorgungsunternehmen) auch die völlige Einstellung der Wiederaufarbeitung für die Zukunft erwogen. Dies würde auf die Entsorgung von Brennelementen bezogen zu einer starken Verringerung der einzulagernden Gebindezahlen und möglicherweise auch zu einer Reduzierung des benötigten Salzstockvolumens führen.

Im geplanten Endlager Gorleben sollen alle Arten fester und verfestigter radioaktiver Abfälle eingelagert werden. Dies wurde zuletzt auf der Jahrestagung Kerntechnik von verschiedener Seite noch einmal ausdrücklich betont (JTK 1993). Entsprechend der zu berücksichtigenden Kriterien für eine Endlagerplanung werden die Abfälle in die Kategorien "wärmeentwickelnd" und "vernachlässigbar wärmeentwickelnd" unterteilt:

* **Wärmeentwickelnde Abfälle**

- Aus **Kernkraftwerken** stammende bestrahlte Brennelemente aus Leichtwasser- und Hochtemperaturreaktoren für die direkte Endlagerung sowie aktivierte metallische Komponenten.
- Aus der **Wiederaufarbeitung** von bestrahlten Leichtwasserreaktor-Brennelementen stammende verglaste Spaltproduktkonzentrate und Feedklärschlämme sowie zementierte Hülsen und Strukturteile von Brennelementen aus La Hague und verglaste Spaltproduktkonzentrate sowie zementierte Feedklärschlämme, Hülsen und Strukturteile aus Sellafield. Diese Abfälle müssen ab Mitte der neunziger Jahre aus Frankreich und Großbritannien zurückgenommen werden. Ähnliche Abfälle in geringerem Umfang sind auch in der inzwischen stillgelegten Wiederaufarbeitungsanlage des Kernforschungszentrums Karlsruhe angefallen und müssen endgelagert werden.

* **Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung:**

- Aus dem Betrieb von **Kernkraftwerken** anfallende verpreßte und/oder zementierte radioaktive Abfälle.
- Aus der **Wiederaufarbeitung** von bestrahlten Leichtwasserreaktor-Brennelementen bituminierte Fällschlämme aus La Hague, kompaktierte und/oder zementierte technologische Abfälle aus La Hague und Sellafield.
- Aus dem Betrieb anderer **Anlagen des sogenannten Kernbrennstoffkreislaufs** (Urananreicherung, Brennelementherstellung, Konditionierung u.ä.) anfallende Abfälle.
- Bei der **Stilllegung von kerntechnischen Anlagen** anfallende Abfälle.
- Bei der **Anwendung von Radioisotopen** in Industrie, Medizin und Forschung anfallende Abfälle.

Es handelt sich hierbei im wesentlichen um die Abfallarten, die nach derzeitiger Planung auch für das Endlager Konrad vorgesehen sind.

Abfallmengen:

Ein Abfallmengengerüst für die Einlagerung in ein Endlager läßt sich bis zum jetzigen Zeitpunkt nur durch grobe Schätzungen erstellen, da neben der Frage des Entsorgungsweges auch die Konditionierung der radioaktiven Abfälle, also Behandlung und Verpackung, nicht ab-

schließlich feststeht. In der Literatur existieren nur wenige Abschätzungen für ein nach Abfallarten aufgeschlüsseltes Mengengerüst eines Endlagers für wärmeentwickelnde und vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und diese beziehen sich auf Planungsgrundlagen von vor 1985.

Ein erstes auf das geplante Endlager Gorleben bezogenes Abfallmengengerüst für die Entsorgung ausschließlich durch Wiederaufarbeitung bzw. ausschließlich durch direkte Endlagerung wurde im Rahmen der "Systemstudie Andere Entsorgungstechniken" 1984 erstellt.

Tab. 3.-1 zeigt nach DBE (1984a) das Abfallmengengerüst jeweils für ein Jahr sowie für die gesamte Betriebszeit des Modellendlagers Gorleben im Falle des integrierten Entsorgungskonzepts. Die Gesamtzahl der einzulagernden Gebinde beträgt 1,52 Millionen. Zugrunde gelegt ist eine Modellwiederaufarbeitungsanlage mit einem Jahresdurchsatz von 700 t Schwermetall aus Kernkraftwerken mit einer elektrischen Gesamtleistung von 26 Gigawatt (GW) sowie sonstige Abfälle aus Kernenergieindustrie, Forschung und Landessammelstellen. Zusätzlich wurden die Abfälle aus dem HTR berücksichtigt. Vorausgesetzt wird eine Betriebszeit des Endlagers von 50 Jahren.

Tab. 3.-2 zeigt ein von DBE (1984b) vorgelegtes entsprechendes Mengengerüst für die direkte Endlagerung. Insgesamt sind hier 1,37 Millionen Gebinde einzulagern. Die Randbedingungen entsprechen denen des integrierten Entsorgungskonzepts. Allerdings ist anstelle der Wiederaufarbeitungsanlage eine Konditionierungsanlage mit einem Jahresdurchsatz von 700 t Schwermetall berücksichtigt.

Aus heutiger Sicht sind einige der grundsätzlichen Randbedingungen zur Ermittlung des Mengengerüsts zu revidieren. Die installierte elektrische Gesamtleistung in der Bundesrepublik beträgt knapp 24 GW. Es fallen keine Abfälle aus einem Schnellen Brüter an und die Zahlen der Brennelementkugeln und Betriebsabfälle aus einem HTR sind durch die inzwischen erfolgte vorzeitige Stilllegung stark reduziert. Außerdem wird der Abbrand der Brennelemente in der Bundesrepublik von früher 33 auf ca. 50 GWd/t Schwermetall erhöht. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf das Mengengerüst, sondern auch auf das Radionuklidinventar des Endlagers am Ende der Betriebszeit. In der "Systemstudie Andere Entsorgungstechniken" wurden für die Sicherheitsanalysen auch Inventare ermittelt, jedoch nicht veröffentlicht.

Ein weiteres Abfallmengengerüst für den Entsorgungsweg über die Wiederaufarbeitung wurde im Rahmen des "Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung" 1985 erarbeitet (PSE 1985c). Allerdings wurde darauf verzichtet, das Abfallmengengerüst im Bericht darzustellen. Dafür ist aber das Radionuklidinventar des Modellendlagers tabellarisch aufgeführt. Diese Tabelle ist als Tab. 3.-3 hier wiedergegeben. Für die Abfallmengen wird in PSE (1985c) eine Gesamtgebindezahl von 1.825.000 angegeben, von denen 3% hochaktive Abfälle sind. Die Ermittlung der Gebindezahlen und des Inventars geschieht auf Grundlage folgender Annahmen: Aufkommen an Abfällen aus der Wiederaufarbeitung von Brennelementen entsprechend einer erzeugten elektrischen Energie von 2.500 GWh über eine Zeitdauer von 50 Jahren sowie 50% der in die-

sem Zeitraum anfallenden sonstigen Abfälle aus Kernkraftwerken, Forschungszentren, Landessammelstellen und Industrie. Diese Randbedingungen sind weniger detailliert als bei DBE (1984a). Sie überschätzen nach heutigem Stand jedoch ebenfalls die Mengen anfallender Brennelemente und berücksichtigen nicht die inzwischen erfolgten Abbranderhöhungen.

In der "Systemanalyse Mischkonzept" werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Einlagerungstechniken Abfallmengengerüste für verschiedene Verhältnisse der parallel genutzten Entsorgungswege Wiederaufarbeitung und direkte Endlagerung erstellt (DBE 1989). Da das Ziel dieser Studie der Nachweis der Realisierbarkeit der Direkten Endlagerung bestrahlter Brennelemente war, wurden hier nur die wärmeentwickelnden Abfälle berücksichtigt. Als allgemeine Randbedingungen wurden der jährliche Anfall von 700 t bestrahlter Leichtwasser- und 1 Mill. Hochtemperaturreaktor-Brennelemente sowie eine Betriebszeit des Endlagers von 50 Jahren angenommen. Die Angaben für die Szenarien unterscheiden sich im Verhältnis zwischen wiederaufgearbeiteten und direkt eingelagerten Brennelementen sowie den Abklingzeiten vor der Endlagerung. Das in DBE (1989) als Referenz definierte und die beiden nach heutigem Stand wahrscheinlichsten Szenarien sind in Tab. 3.-4 wiedergegeben. Die Gesamtzahl der ermittelten einzulagernden Gebinde beträgt bei gemischter Einlagerungstechnik (Bohrloch- und Streckeneinlagerung) für ein Verhältnis 500 t Wiederaufarbeitung zu 200 t Direkte Endlagerung 128.300 Gebinde und für ein Verhältnis von 200 t Wiederaufarbeitung zu 500 t Direkte Endlagerung 84.450 Gebinde. Im Vergleich dazu ergeben sich bei reiner Streckeneinlagerung und einem Verhältnis von 350 t Wiederaufarbeitung zu 350 t Direkte Endlagerung 12.850 Gebinde. Die Menge der anfallenden Brennelemente wird auch hier überschätzt.

Die in den drei Studien (DBE 1984a, 1984b; PSE 1985; DBE 1989) genannten Zahlen für die einzulagernden Gebinde lassen sich nicht direkt vergleichen, da sie auf einer jeweils unterschiedlichen Einteilung der Abfälle beruhen und sich auch die Konditionierungstechniken zum Teil unterscheiden. Klar erkennbar ist jedoch, daß der Entsorgungsweg direkte Endlagerung zu geringeren Gebindezahlen führt. Alle hier genannten Ausgangszahlen für anfallende Brennelemente und damit die Randbedingungen für die Abfallmengengerüste sind als konservativ anzusehen. Ob jedoch die Konditionierungstechniken in der beabsichtigten Form voll umgesetzt werden können, muß sich noch erweisen.

Nach heutigem Kenntnisstand wird davon ausgegangen, daß die bei einer elektrischen Energieerzeugung von 2.500 Gigawattjahren (GWA) innerhalb von 50 Jahren anfallenden radioaktiven Abfälle (dies entspricht den Randbedingungen in PSE 1985c) in Gorleben endgelagert werden können (TITTEL & WARNECKE 1991). Jedoch erst nach der untätigen Erkundung von Gorleben sollen endgültige Aussagen darüber möglich sein. Insgesamt wird für Gorleben ein notwendiges Endlagervolumen von 2.000.000 m³ für kalte Abfälle und 830.000 m³ für wärmeentwickelnde Abfälle (ARBEITSKREIS 1991) angenommen.

Die prinzipielle Ausgangssituation für die Langzeitsicherheit bezüglich der in den endgelagerten Abfällen enthaltenen Radionuklide ist im wesentlichen vom Entsorgungsweg und von den Einlagerungskonzepten unabhängig. Die eingelagerten Nuklidarten sind dieselben, das Nu-

klidinventar unterscheidet sich, gemessen am Gesamtinventar pro Nuklidart, für die meisten hierfür relevanten Sorten durch die in Abluft- und Abwasserstrom übergehenden "Verluste" bei der Wiederaufarbeitung nur geringfügig. Um etwa den Faktor 100 verringert sich lediglich das eingelagerte Plutonium-Inventar bei direkter Endlagerung (CLOSS 1990). Hier ist allerdings die schwerere Löslichkeit von Plutonium als Oxid, wie es in Brennelementen vorliegt, zu berücksichtigen. Die Löslichkeit und Beweglichkeit der einzelnen Nuklidsorten ist auch bei den meisten anderen für die Langzeitsicherheit relevanten Nuklide bei den Abfällen aus der Wiederaufarbeitung größer.

Der Wärmeeintrag in das Endlager ist für die beiden Entsorgungswege unterschiedlich. Bei Abfällen aus dem Entsorgungsweg Wiederaufarbeitung ist durch die hohe Konzentrierung der Spaltprodukte in den Glaskokillen der lokale Wärmeeintrag (Bereich der Bohrlöcher) ins Endlager bzw. den Salzstock größer als bei Einlagerung abgebrannter Brennelemente in Pollux-Behältern. Der Gesamtwärmeeintrag ist bei der direkten Endlagerung jedoch größer als bei Endlagerung nach Wiederaufarbeitung. Weiterhin nimmt der Wärmeeintrag bei der direkten Endlagerung im Verlauf der Nachbetriebsphase des Endlagers langsamer ab als bei Endlagerung nach Wiederaufarbeitung. Grund hierfür ist das bereits erwähnte und um den Faktor 100 höhere Plutonium-Inventar bei der Direkten Endlagerung. Der Unterschied im Gesamtwärmeeintrag für die Entsorgungswege verringert sich, wenn auch MOX-Brennelemente wiederaufgearbeitet werden.

Der Wärmeeintrag in das Endlager bzw. den Salzstock ist von großer Bedeutung für sicherheitsrelevante Vorgänge. So führt der Wärmeeintrag zur "Ausdehnung" des Salzstocks während der "Aufheizphase" mit anschließender Kontraktion des Salzstocks während der "Abkühlphase". Die damit verbundenen Spannungsumlagerungen können zur Aktivierung von Wegsamkeiten für Lösungen, z.B. über Hauptanhydrit, führen. Andererseits führt der Wärmeeintrag zu erhöhten Konvergenzraten, so daß es zu einem schnelleren Einschluß der Abfälle durch das Salzgebirge kommt. Ausdehnung und Kontraktion des Salzstocks einerseits sowie beschleunigte Konvergenz andererseits sind Vorgänge mit entgegengesetzter Bedeutung für die Langzeitsicherheit: Einerseits wird die Gefahr von Lösungszutritten ins Endlager erhöht, andererseits jedoch der Einschluß der Abfälle im Salzgebirge gefördert.

Gebindeform und Her- Einlagerungs- kunft technick des Endlager- gutes	Glaskokille 180 l 1)	Faß 1) 400 l	Faß 400 l	VBA 200 l	Faß 400 l	Faß 200 l
	BT-Kokille	BT-Faß	AT	ST	VT	VT
Wiederaufarbeitungs- anlage 700 jato	655	1250	800	-	1255	-
Kernkraftwerke Landessammelstellen, Industrie, Groß- forschungseinrichtg.	-	-	2954	3658	13 322	6541
Jährliches Ein- lagerungsmengen- gerüst	655	1250	3754	3658	14 577	6541
Einlagerungs- mengengerüst für 50 Betriebsjahre	32 750	62 500	187 700	182 900	728 250	327 050

1) Wärmeentwickelnd

BT = Einlagerung in Bohrlochtechnik
 AT = Einlagerung in Absenktechnik
 ST = Einlagerung in Stapeltechnik
 VT = Einlagerung in Versturztechnik

Tab. 3.-1: Abfallmengengerüst für ein Jahr sowie für 50 Jahre Betriebszeit des Modellendlagers Gorleben im Falle des integrierten Entsorgungskonzepts (Quelle: DBE 1984a)

Her- kunft	Gebindeform und Ein- lagerungs- technik	ELG für BE	Guß- behäl- ter 100-500 l	VBA 400 l	VBA 200 l	Faß 400 l	Faß 200 l
Konditionierungs- anlage AE ¹⁾	A	437	-	70	-	450	-
Kernkraftwerke ²⁾	K	-	440	2.510	1.500	13.150	720
Großforschungs- einrichtungen ²⁾	F	-	5	-	2.060	-	3.720
Industrie ²⁾	I	-	-	-	100	170	215
Landessammel- stellen ²⁾	L	-	-	-	-	-	1.695
Unterschiedliche Anlagen ²⁾	U	-	-	-	-	5	190
Jährliches Einlagerungs- mengengerüst		437	445	2.580	3.660	13.775	6.540
Einlagerungs- mengengerüst für 50 Betriebsjahre		21.850	22.250	129.000	183.000	688.750	327.000
(Stand 12/83)							
¹⁾ Quelle: Nukem/DWK							
²⁾ Quelle: PTB							

Tab. 3.-2: Abfallmengengerüst für ein Jahr sowie für 50 Jahre Betriebszeit des Modell-
endlagers Gorleben im Falle der Direkten Endlagerung (Quelle: DBE 1984b)

Radionu- klid	Inventar in	
	Bq	kg
C - 14	2.186 E+15	1.326 E+1
Ni - 59	6.336 E+16	2.259 E+4
Ni - 63	8.460 E+18	3.704 E+3
Se - 79	1.143 E+15	4.435 E+2
Rb - 87	6.533 E+10	2.017 E+4
Sr - 90	9.275 E+19	1.837 E+4
Zr - 93	5.930 E+15	6.378 E+4
Mo - 93	2.729 E+14	6.713 E+0
Nb - 94	5.156 E+15	7.436 E+2
Tc - 99	4.095 E+16	6.529 E+4
Pd - 107	3.577 E+14	1.879 E+4
Sn - 126	1.843 E+15	.756 E+3
J - 129	1.027 E+14	1.572 E+4
Cs - 135	1.022 E+15	2.399 E+4
Cs - 137	1.424 E+20	4.423 E+4
Sm - 147	1.280 E+10	1.522 E+4
Sm - 151	1.019 E+18	1.046 E+3
Th-Reihe:		
Cm - 248	4.200 E+10	2.670 E-1
Pu - 244	2.347 E+11	3.576 E+2
Cm - 244	6.319 E+18	2.110 E+3
Pu - 240	6.487 E+16	7.694 E+3
U - 236	9.826 E+12	4.104 E+3
Th - 232	3.491 E+11	8.603 E+4
U - 232	1.584 E+12	2.000 E-3
Np-Reihe:		
Cm - 245	6.144 E+15	9.671 E+2
Pu - 241	4.309 E+18	1.131 E+3
Am - 241	4.908 E+18	3.865 E+4
Np - 237	9.969 E+14	3.821 E+4
U - 233	1.865 E+11	5.207 E-1
Th - 229	2.349 E+11	2.984 E-2
U-Reihe:		
Cm - 246	2.266 E+15	1.993 E+2
Pu - 242	1.325 E+14	9.377 E+2
Am - 242	4.919 E+16	1.368 E+2
U - 238	1.245 E+13	1.000 E+6
Pu - 238	1.863 E+17	2.941 E+2
U - 234	3.774 E+13	1.632 E+2
Th - 230	4.297 E+11	5.753 E-1
Ra - 226	4.651 E+10	1.271 E-3
Am-Reihe:		
Cm - 247	1.050 E+10	3.059 E+0
Am - 243	1.123 E+17	1.522 E+4
Pu - 239	1.502 E+16	6.528 E+3
U - 235	9.838 E+11	1.230 E+4
Pa - 231	7.035 E+10	4.025 E-2

Tab. 3.-3: Eingelagertes Radionuklidinventar in das Modellendlager Gorleben bei 50 Jahren Betriebszeit im Falle der Wiederaufarbeitung aller bestrahlten Brennelemente (Quelle: PSE 1985c)

Nr.	Mengen- verh. IE/DE	Kühl- zeit HAW/ BE	Bela- dung POL- LUX	Einla- gers.- konzept	Abfall- -art	-mengen/Jahr			
						K	F	P	VA
3	500/200	40	8 BE	GBS-A	HAW	433	-	-	-
		30			LWR-BE	-	-	47	-
		10			HTR-BE	-	556	-	-
		7			MAW	-	1.530	-	-
18	350/350	40	8 BE	SL3 *	HAW	-	-	55	-
		30			LWR-BE	-	-	82	-
		10			HTR-BE	-	-	120	-
		7			MAW	-	-	-	-
19	200/500	40	8 BE	GBS-A	HAW	173	-	-	-
		30			LWR-BE	-	-	117	-
		10			HTR-BE	-	556	-	-
		7			MAW	-	843	-	-

Tab. 3.-4: Abfallmengengerüst (Tonnen pro Jahr) für unterschiedliche Mengenverhältnisse Wiederaufarbeitung (IE) / Direkte Endlagerung (DE) und Abklingzeiten (K=Kokille, P=Pollux, F=Faß, VA=verlorene Abschirmung) (Quelle: DBE 1989)

3.1.3 Standortauswahl Gorleben

Im Februar 1977 wurde der Teilsalzstock Gorleben von der niedersächsischen Landesregierung als Endlagerstandort benannt. Diese Entscheidung wurde im Juli 1977 von der Bundesregierung akzeptiert, und im gleichen Monat beantragte die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) bei der niedersächsischen Landesregierung die Einleitung des Planfeststellungsverfahrens für das Endlager.

Das Endlager Gorleben sollte ursprünglich wesentlicher Bestandteil des Nuklearen Entsorgungszentrums sein (bestehend v.a. aus Wiederaufarbeitungsanlage, Zwischenlager, Abfallbehandlung, Brennelementherstellung).

Die Suche nach einem Endlagerstandort hat allerdings bereits einige Jahre vor der Benennung von Gorleben begonnen. So wurden zwischen 1973 und 1975 von der KEWA (Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungs-Gesellschaft) im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) eine Standortsuche durchgeführt. Dabei wurden 24 in Niedersachsen gelegene Standorte (Salzstöcke) überprüft (SCHMIDT-KÜSTER 1982), von denen die drei Salzstöcke Lutterloh, Lichtenholz und Wahn zur näheren Untersuchung vorgeschlagen wurden.

Die 1976 aufgenommenen Untersuchungsarbeiten an den drei Standorten wurden bereits im selben Jahr (August) wieder gestoppt. Im November 1976 schließlich bat die niedersächsische Landesregierung die Bundesregierung, die Untersuchungen an den drei Standorten solange auszusetzen, bis die Landesregierung von sich aus einen Standort benannt habe. Benannt wurde dann der Teilsalzstock Gorleben.

Die tatsächlichen Gründe für die Aufgabe der vorausgewählten drei Standorte sind im einzelnen nicht bekannt. Offensichtlich haben jedoch Akzeptanzprobleme dabei eine wesentliche Rolle gespielt. So wurde nach Aussage des damaligen Ministerpräsidenten ALBRECHT (1983) hinsichtlich zu erwartender Auseinandersetzungen die Diskussion an nur einem Standort der Diskussion an drei Standorten vorgezogen.

Die Auswahl von Gorleben durch die niedersächsische Landesregierung ist nach UMWELT (1979, S. 38) auf Grundlage folgender vier geologischer Kriterien erfolgt:

1. Der Salzstock sollte durch frühere Bohrungen oder bergmännische Aktivitäten möglichst unberührt sein, um unkontrollierte Eingriffe in das System Salzstock zu vermeiden.
2. Der Salzstock sollte eine für die Aufnahme radioaktiver Abfälle ausreichende Größe besitzen, die außerdem das Vorkommen mächtiger reiner Steinsalzpartien wahrscheinlich erscheinen läßt. Große Partien reinen Steinsalzes werden als Voraussetzung für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle angesehen.
3. Die Salzstockoberfläche sollte nicht mehr als 400 m unter Gelände liegen und nicht zu hoch in die oberflächennahen Grundwasserhorizonte reichen.
4. Die engere Standortregion sollte keine nutzbaren Lagerstätten (einschließlich Grundwasserreserven) enthalten.

Der Teilsalzstock Gorleben soll diese vier Kriterien erfüllen (JARITZ 1981, S. 17). Hätte es gewichtige geologische Gründe gegen die Eignungshöflichkeit gegeben, dann hätte sich die Bundesregierung nach JARITZ (1981) zwangsläufig anders entscheiden müssen.

Unabhängig davon, ob der Teilsalzstock Gorleben zum Zeitpunkt seiner Benennung tatsächlich diese vier Kriterien erfüllt hat, ist allein aus methodischen Gründen mit der Erfüllung dieser Kriterien allein seine Benennung noch nicht hinreichend zu begründen. So ist insbesondere nicht ausgeschlossen, daß auch andere Salzstöcke in Norddeutschland diese Kriterien erfüllen. Gorleben hätte nur dann zwangsläufig als Standort benannt werden müssen, wenn er

a) als einziger Salzstock diese Kriterien erfüllt

oder

b) als einer von mehreren Salzstöcken diese Kriterien erfüllt und gleichzeitig durch Erfüllung sonstiger Anforderungen bzw. Kriterien vor anderen Salzstöcken ausgezeichnet ist.

Die Zweifel daran, ob die vier Auswahlkriterien vom Teilsalzstock Gorleben tatsächlich erfüllt werden, sind im Verlauf der seit April 1977 laufenden Standortuntersuchungen gewachsen. So müssen nach DUPHORN (1988) auf Grund der inzwischen erarbeiteten Untersuchungsbefunde drei der vier Kriterien als nicht erfüllt angesehen werden. Lediglich das Kriterium 1. (unverritzter Salzstock) soll rein formal erfüllt sein, und zwar dergestalt, daß der Salzstock tatsächlich bis zu seiner Untersuchung von Menschenhand unverritz war. De facto soll das Kriterium jedoch nicht erfüllt sein, da durch selektive Subrosion mit Einspülung elstereiszeitlicher Schmelzwassersande der Salzstock durch natürliche Einwirkung als verritzt angesehen werden muß. Folgt man der Argumentation von DUPHORN (1988), dann hätte der Teilsalzstock Gorleben spätestens nach der Untersuchung des Deckgebirges aufgegeben werden müssen.

Ebenfalls keine zwingende Begründung für die Auswahl des Teilsalzstocks Gorleben ist die Tatsache, daß er bei dem früheren Auswahlverfahren (1973 - 1975, s.o.) ebenfalls alle geologischen Bedingungen erfüllt haben soll, die bei der Auswahl der drei Standorte Lutterloh, Lichtenhorst und Wahn eine Rolle gespielt haben (JARITZ 1981). Offensichtlich ist Gorleben bei dem früheren Auswahlverfahren wegen seiner grenznahen Lage zur ehemaligen DDR nicht berücksichtigt worden (RANDL 1981). Entscheidend für die Wertung ist, daß geowissenschaftliche Gesichtspunkte bei der ersten Standortsuche nur eine relativ geringe Rolle gespielt haben sollen (KEWA 1975: S. 12). Bei der ersten Standortauswahl waren Kriterien wie Bevölkerungsverteilung, Bevölkerungsstruktur, Flächennutzung u.ä. von größerer Bedeutung als geologische Kriterien (KEWA 1975). Dennoch muß festgestellt werden, daß der damals eingeschlagene Ansatz der vergleichenden Untersuchung bzw. Bewertung dreier Standorte von der Methodik her in die richtige Richtung weist (s. 3.2.2). Für den Standort Gorleben ist darüber hinaus von Anfang an klar gewesen, daß wegen seiner grenznahen Lage die aus geowissen-

schaftlicher Sicht erforderlichen Untersuchungen auf dem Gebiet der ehemaligen DDR nicht durchgeführt werden konnten.

Insgesamt bleiben in Zusammenhang mit der Benennung von Gorleben einige Unklarheiten hinsichtlich der letztendlichen Auswahlgründe bestehen. Obwohl alle Entscheidungsgründe und -prozesse mittels der verfügbaren Informationen nicht in jedem Detail geklärt werden können, ist doch klar zu erkennen, daß die geowissenschaftliche Begründung für die Auswahl des Teilsalzstocks Gorleben nicht zwingend zur Benennung dieses Teilsalzstocks hätte führen müssen.

Demnach müssen bei der Benennung von Gorleben auch andere als geowissenschaftliche Gründe - und damit Gründe mit fehlender oder geringer Sicherheitsrelevanz - eine Rolle gespielt haben. Dazu gehören offensichtlich die vom damaligen Ministerpräsident ALBRECHT (1983) angeführten strukturpolitischen Aspekte (Landkreis Lüchow-Dannenberg als extrem strukturschwaches Zonenrandgebiet) sowie Akzeptanzgründe.

Ein nachvollziehbares und aus geowissenschaftlicher Sicht akzeptierbares Auswahlverfahren (s. 3.2.2) hat der Benennung von Gorleben somit nicht zu Grunde gelegen. Nicht zuletzt deshalb wird die fachliche Diskussion um die Eignung des Standortes seit dem Zeitpunkt seiner Benennung - und später verstärkt durch die Untersuchungsergebnisse - kontrovers geführt. Das Fehlen eines geowissenschaftlichen Beurteilungsrahmens zur Bewertung von Standortbefunden sowie die Einführung der in den Sicherheitskriterien der RSK (1983) als einzige Methode zum Führen des Eignungsnachweises festgeschriebenen Methode Sicherheitsanalyse haben wesentlich dazu beigetragen. Gleichzeitig wird dadurch die Aufrechterhaltung der "Eignungshöflichkeit" unabhängig von den konkreten Untersuchungsbefunden durch die Endlagergremien (v.a. Bundesregierung, BFS, BGR, RSK) ermöglicht (s. 3.2.4).

3.2 Vorgehensweise bei der Beurteilung von Endlagerstandorten

3.2.1 Allgemeine Schutzziele und generelle Anforderungen an Endlager

Endlagerung ist die endgültige Ablagerung radioaktiver Abfälle in einem wartungsfreien und nicht überwachungsbedürftigen Endlager in der Erdkruste ohne Möglichkeit der Abfallrückholung. Sie dient vor allem dem Schutz der Biosphäre vor der Wirkung ionisierender Strahlung, bis diese auf ein ungefährliches Ausmaß abgeklungen ist. Die Einhaltung dieses allgemeinen Schutzziels wird mit Hilfe eines Systems technischer und natürlicher Barrieren (Abfallform, Abfallbehälter, Versatz usw., geologische Barriere) angestrebt. Die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Barrieren und des Gesamtsystems ist im Rahmen des atomrechtlichen Genehmigungsverfahrens nachzuweisen.

Die Wirksamkeit der geologischen Barriere (das Wirtsgestein und die es umgebenden Gesteinskörper) entscheidet über die Langzeitsicherheit. Bei Salzstöcken läßt sie sich grob in zwei Barrierenteile gliedern, den Salzstock selbst und sein Deck- und Nebengebirge. Die Eignung beider Barrierenteile wird von den jeweils unterschiedlichen gesteins- und standortspezifischen Eigenschaften bestimmt. Da die Gesteine beider Barriereteile auf unterschiedliche Weise zur Funktion der geologischen Barriere beitragen, ist ein Ausgleich ungünstiger Eigenschaften des einen Barriereteils durch günstigere Eigenschaften des anderen nicht möglich.

Genauso wenig können die natürlichen Nachteile eines Standortes insgesamt durch technische Maßnahmen vollständig ausgeglichen werden. Wenn die Langzeitsicherheit für einen vorgesehenen Endlagerstandort im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens nicht nachgewiesen werden kann, **muß** der Standort daher aufgegeben werden.

Nach den Regelungen des Atomgesetzes steht beim Nachweis der Langzeitsicherheit für ein Endlager zwar der Mensch als Schutzgut im Vordergrund, doch sind bei der Prüfung der möglichen Auswirkungen eines Endlagers auf die Umwelt auch andere Schutzgüter zu berücksichtigen. Dazu gehören vor allem diejenigen belebten und unbelebten Bestandteile der Umwelt, die in den für den Schutz der Umwelt maßgeblichen Gesetzen und Vorschriften ausdrücklich als schützenswert bezeichnet werden. Das sind neben dem Atomgesetz selbst vor allem das Wasserhaushaltsgesetz, das Abfallgesetz, das Naturschutzgesetz und das Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung. Diese Gesetze enthalten außer Vorgaben zur Gefahrenvermeidung auch die generelle Forderung nach Umsetzung des Vorsorgeprinzips, das sich im Atomgesetz als Minimierungsgebot, im Wasserhaushaltsgesetz als Besorgnisgrundsatz und im Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung als generelle Forderung nach Umweltvorsorge niederschlägt.

Die Ausdehnung der Schutzziele von Endlagern für radioaktive Abfälle auf andere Schutzgüter als den Menschen bedeutet zugleich, daß beim Eignungsnachweis nicht nur die mit der Freisetzung von Radionukliden verbundenen Auswirkungen radioaktiver Strahlung zu betrachten sind, sondern die Auswirkungen aller aus einem Endlager freisetzbaren Substanzen sowie mögliche sonstige Auswirkungen auf das jeweilige Schutzgut. Die Bewertung dieser Auswirkungen setzt die Verfügbarkeit geeigneter Bewertungssysteme (Bewertungsmaßstab und daran zu messende Beurteilungsgröße) voraus.

Von überragender Bedeutung im Rahmen des Nachweises der Langzeitsicherheit für Endlager ist das Grundwasser: Einerseits stellt Grundwasser langfristig das wichtigste Transportmedium für aus dem Abfall freigesetzte Stoffe in die Biosphäre dar. In Oberflächennähe wird es vom Menschen in vielfältiger Weise genutzt und bildet eine wesentliche Lebensgrundlage für Tiere und Pflanzen. Andererseits ist Grundwasser (wie auch Oberflächenwasser) ein eigenes Schutzgut, das - und zwar unabhängig von der Frage seiner möglichen oder tatsächlichen Nutzung - dem Schutz des Besorgnisgrundsatzes nach § 34,2 Wasserhaushaltsgesetz unterliegt. Dessen Umsetzung führt unvermeidlich zur Forderung nach Immissionsneutralität von Endlagern (HAHN 1987, APPEL 1992, s. 3.2.3.2).

3.2.2 Grundsätze für das Vorgehen beim Nachweis der Langzeitsicherheit

Wegen der langen zu betrachtenden Zeiträume und mangels Rückholbarkeit der Abfälle kann weder die Richtigkeit eines Eignungsnachweises für einen Standort bestätigt noch eine falsche Entscheidung korrigiert werden. Daher geht es beim Nachweisverfahren auch nicht um die tatsächliche Eignung des betrachteten Standortes, sondern um die Frage, ob der Nachweis in der vorgelegten Form von der Fachwelt und der interessierten Öffentlichkeit, vor allem aber den Verfahrensbeteiligten, akzeptiert werden kann. Im Vordergrund steht demnach die Prüfung von Angemessenheit und Schlüssigkeit des Verfahrens, mit dem der Nachweis der Langzeitsicherheit geführt wird. Nur dann, wenn diese Prüfung positiv endet, können das Ergebnis des Nachweisverfahren und ein positiver Planfeststellungsbeschluß für einen bestimmten Standort auf breite Akzeptanz stoßen.

Es liegt auf der Hand, daß die beim Nachweis der Langzeitsicherheit für ein Endlager einzufordernden und zu prüfenden maßgeblichen Standorteigenschaften bereits bei der Standort-suche berücksichtigt werden müssen. Dem steht entgegen, daß zu diesem Zeitpunkt keine Detailuntersuchungen an allen in Frage kommenden Standorten durchgeführt worden sind und auch nicht durchgeführt werden können. Die gesuchten Eigenschaften müssen daher in Kriterien umgesetzt werden, deren Erfüllung anhand bereits vorliegender Informationen oder durch Übersichtsuntersuchungen überprüft werden können.

Direkte Eignungsaussagen für ein potentielltes Endlager können allerdings aus solchen leicht erhebaren Standorteigenschaften nicht abgeleitet werden. Ein möglichst gut geeigneter und damit konsensfähiger Standort läßt sich vielmehr nur durch den Vergleich mehrerer Standorte mit positiven Eignungsmerkmalen identifizieren. Damit würde auch den Anforderungen des Minimierungsgebotes des Atomgesetzes Rechnung getragen und das generelle Gebot der Umweltvorsorge anderer Gesetze befolgt. Nur ein in diesem Sinne vorausgewählter Standort kann bis zum Beweis seiner Eignung oder Nichteignung durch gezielte Untersuchungen als "eignungshöflich" bzw. "potentiell geeignet" gelten (s. 3.2.4.1).

Die Erfüllung dieser methodisch unerläßlichen Ansprüche setzt die Anwendung eines in sich geschlossenen Verfahrens für Standort-suche und Eignungsnachweis mit folgenden aufeinander aufbauenden Arbeitsschritten voraus:

- Identifizierung eines geeigneten **Endlagermediums** (oder mehrerer geeigneter Endlager-medien) unter Berücksichtigung der endlagerungsrelevanten Eigenschaften der endzulagernden Abfälle (z.B. wärmeproduzierend oder nicht) und endlagerungsrelevanten Eigenschaften der im Suchgebiet vorhandenen Gesteine. Bei der Wahl des Endlagermediums ist auch zu berücksichtigen, ob die Endlagerung in einem Bergwerk oder in Tiefbohrlöchern erfolgen soll.
- Formulierung und Anwendung eines **Anforderungsprofils** an den gesuchten Standort, abzuleiten aus Art und Menge der endzulagernden Abfälle und dem sich daraus ergebenden

erforderlichen Isolationszeitraum unter Berücksichtigung der Gesteinseigenschaften des/der in Frage kommenden Endlagermediums/Endlagermedien.

- **Ausweisung von Suchräumen** mit potentiell geeigneten Gesteinskörpern auf Grundlage verfügbarer Daten oder von Übersichtsuntersuchungen.
- **Einengende Vorauswahl** auf mehrere potentiell geeignete Standorte durch Anwendung von Ausschlußkriterien und Ausweisung von Negativflächen, d.h. Flächen bzw. Gesteinskörpern, die für die Endlagerung nicht in Frage kommen. Nur Standorte, die im Rahmen eines solchen systematischen Verfahrens identifiziert worden sind, gelten als **potentiell** geeignet.
- Erhebung wichtiger eignungsbestimmender Standorteigenschaften der vorausgewählten Standorte (durch gezielte Untersuchungen) und **vergleichende Bewertung** der Standorte anhand von Eignungs- und Ausschlußkriterien zur Identifizierung des besten bzw. der besten der vorausgewählten potentiell geeigneten Standorte.
- Eignungsuntersuchung und Nachweis der **tatsächlichen Eignung**, insbesondere Nachweis der Langzeitsicherheit, für den/die verbleibenden (potentiell besten) Standort(e). Das Beurteilungsverfahren muß den gesamten Zeitraum abdecken, für den die einzulagernden radioaktiven Abfälle eine Gefahr für die Schutzgüter darstellen.

Angesichts der Kosten für ein detailliertes Untersuchungsprogramm ist es sinnvoll, nach bestimmten Erkundungsschritten (z.B. der übertägigen Erkundung) Zwischenbewertungen zur Bestätigung der "potentiellen Eignung" vorzunehmen. Dafür sind ebenfalls geeignete Kriterien erforderlich.

- **Planfeststellungsverfahren** für den nachweislich geeigneten bzw. am besten geeigneten Standort.

Durch dieses schrittweise Vorgehen bei Standortsuche und -beurteilung werden Transparenz des Verfahrens und Nachvollziehbarkeit der Standortentscheidung erheblich erhöht. Es wird bei der Ausweisung oberflächennaher Deponien für Siedlungs- und Sonderabfälle seit vielen Jahren praktiziert und hat sich dort im Sinne sachgerechter Entscheidungen und Konsensfindung bewährt.

Im Vorfeld der Ausweisung des Endlagerstandortes Gorleben hat es Ansätze zur einengenden Vorauswahl und zur vergleichenden Bewertung von Standorten anhand von Kriterien gegeben. Die Ergebnisse sind jedoch nicht umgesetzt bzw. aus opportunistischen politischen Gründen nicht berücksichtigt worden (s. 3.1.3 u. 3.2.3.1). Im Rahmen der Standortuntersuchung für den Eignungsnachweis hat es vor der Entscheidung über das Schachtabteufen eine Zwischenbewertung (BMFT 1984) gegeben.

3.2.3 Vorgehensweise beim Eignungsnachweis für Endlagerstandorte in der Bundesrepublik

In der Bundesrepublik Deutschland ist die Vorgehensweise beim Eignungsnachweis für Endlagerstandorte durch die "Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk" der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK 1983) verbindlich geregelt. Dabei handelt es sich allerdings weniger um Kriterien für die Standortvorauswahl und zur Beurteilung bestimmter Standortmerkmale in dem in 3.2.2 dargestellten Sinne oder gar um ein in sich schlüssiges Bewertungsverfahren als vielmehr um Vorgaben zur Vorgehensweise beim Eignungsnachweis mit sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad.

3.2.3.1 Vorgehensweise bei der Standortvorauswahl

Unter Standortvorauswahl können die in 3.2.2 genannten Arbeitsschritte "einengende Vorauswahl" und "vergleichende Bewertung" eines systematischen Nachweisverfahrens zusammengefaßt werden, die der Ausweisung von potentiell geeigneten bzw. "eignungshöffigen" Standorten dienen. Zu diesem wichtigen Verfahrensabschnitt findet sich in den "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) unter der Überschrift "Standortauswahl" eine zwar richtige, jedoch nur sehr allgemeine Vorgabe: Die Wahl des Standortes sei "nicht nur für die Errichtung und den Betrieb des Endlagers von Bedeutung, sondern vor allem für die Langzeitsicherheit" (RSK 1983: Ziffer 3.1). Zum Vorgehen bei der Standortauswahl wird lapidar mitgeteilt (RSK 1983: Ziffer 4.): "Der Standort ist so auszuwählen, daß die Einhaltung der Schutzziele (...) gewährleistet werden kann."

Die sich anschließenden Standortanforderungen stellen teilweise lediglich modifizierte Wiederholungen der Schutzziele dar oder beziehen sich auf die Auswahl des Endlagermediums und nur ausnahmsweise direkt auf Standortsuche und -beurteilung. Beispielsweise wird gefordert (RSK 1983: Ziffer 4.):

- daß die Endlagerformation aus Gesteinen bestehen muß, die eine Erstellung und Nutzung untertägiger Hohlräume ermöglichen,
- die Erhaltung wirtschaftlich bedeutender Rohstofflagerstätten einschließlich Grundwasservorkommen zu berücksichtigen,
- mögliche Mineralreaktionen als Folge der Abfalleinlagerung zu berücksichtigen,
- geologische Formationen zu bevorzugen, die auf Beanspruchung visko-plastisch reagieren bzw. an Bruchflächen keine Wegsamkeiten für unzulässig große Flüssigkeitsmengen entstehen lassen,
- daß sich der Standort durch geringe tektonische Aktivität auszeichnen soll,
- daß Wegsamkeiten für radionuklidbelastetes Grundwasser nur so gering sein dürfen, daß die Schutzfunktionen des Barrieren-Systems erhalten bleiben und

- daß nach der Stilllegung des Endlagers Wasser oder Salzlösungen nicht in unzulässigem Umfang in die Biosphäre gelangen dürfen.

Diese teils selbstverständlichen, teils unverbindlichen, teils trivialen Formulierungen sind Ausdruck mangelnder methodischer und fachlich-geowissenschaftlicher Kompetenz der RSK in Endlagerfragen. Sie bieten nämlich weder konkrete Hilfe bei der Suche nach einem geeigneten Endlagerstandort noch enthalten sie aussagekräftige Anhaltspunkte dafür, welche konkreten Eigenschaften ein potentiell geeigneter bzw. "eignungshöflicher" Endlagerstandort aufweisen darf oder muß. Die "Sicherheitskriterien" bilden also keine geeignete Grundlage für eine angemessene Standortauswahl. Eher ist der Versuch der RSK zu erkennen, die bereits in den sechziger Jahren getroffene Entscheidung für Steinsalz als Endlagermedium (s. 3.1.1.2) und die 1977 erfolgte Festlegung auf Gorleben als Endlagerstandort (s. 3.1.3.) verbindlich festzuschreiben.

Bei der Veröffentlichung der "Sicherheitskriterien" durch die RSK (1983) lagen bereits Untersuchungsbefunde vom Standort Gorleben vor. Über deren Bedeutung für die Langzeitsicherheit war auch im Rahmen des sogenannten Bürgerdialogs der Bundesregierung auf öffentlichen Veranstaltungen in den Jahren 1981 und 1982 kontrovers diskutiert worden (BMFT 1981 u. 1983). Mangels von der RSK, geschweige denn allgemein akzeptierter Kriterien schlagen sich jedoch die Standortbefunde, z.B. der flächenhafte Kontakt zwischen grundwasserführendem Deckgebirge und Salzgestein bzw. Hutgestein des Teilsalzstocks (s. 4.1.1.1), in der Bewertung durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und die Bundesregierung nicht nieder.

Die vordergründige Ausformulierung der "Sicherheitskriterien" (s.o.) erlaubt es den offiziellen Endlagergremien nach ihrer eigenen Logik bis heute sogar, die beschworene "Eignungshöflichkeit" des Standortes ohne klare Definition dieses Begriffes und ohne Argumente aufrecht zu erhalten.

3.2.3.2 Vorgehensweise beim Nachweis der Langzeitsicherheit

Im Hinblick auf den Nachweis der Langzeitsicherheit für einen Endlagerstandort enthalten die "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) Hinweise bzw. Vorgaben für die im Zuge der Standorterkundung zu leistenden Erkundungsarbeiten und für die Nachweismethodik. Die übertägige und untertägige Standorterkundung werden als eigenständige Arbeitsschritte gefordert, allerdings ohne daß der Umgang mit den jeweils erzielten Befunden geregelt würde. Besonders gravierend wirkt sich dieser Mangel auf die Beurteilung der Ergebnisse der übertägigen Erkundung aus. Sinnvollerweise ist nämlich vor Beginn der teuren untertägigen Erkundung zu prüfen (s. 3.2.2), ob die bis dahin erarbeiteten Standortkenntnisse die im Zuge der Vorauswahl festgestellte potentielle Eignung bestätigen oder nicht. Bekanntlich ist für den Standort Gorleben ein

solcher Bewertungsschritt tatsächlich durchgeführt worden, allerdings ohne Nennung konkreter Untersuchungsergebnisse, die für die untertägige Erkundung sprechen (BMFT 1984).

Im Hinblick auf das methodische Vorgehen beim abschließenden Nachweis der Langzeitsicherheit haben die folgenden konkreten Vorgaben in den "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) besonders weitreichende Konsequenzen gehabt:

- Der Eignungsnachweis soll in Form standortspezifischer Sicherheitsanalysen durch Nachbildung der Teilsysteme des Endlagers und von Ereignisabläufen nach naturwissenschaftlichen Methoden auf Basis **ausreichend konservativer Annahmen** erfolgen.
- Beurteilungsmaßstäbe (auch) für die Langzeitsicherheit von Endlagern sind die in der **Strahlenschutzverordnung** festgelegten **Grenzwerte**. Daran sind als Beurteilungsgrößen für die Leistungsfähigkeit der geologischen Barriere die im Zuge der Sicherheitsanalyse berechneten **potentiellen Individualdosen** zu messen.

Mit diesen Vorgaben sind der damals im Rahmen des Projektes Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE) in der Bundesrepublik Deutschland beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern erreichte Diskussionsstand und die gerade entwickelten praktischen Ansätze (PSE 1985) festgeschrieben worden. Dabei waren Daten vom Standort Gorleben benutzt worden.

Die für die Langzeitsicherheit maßgebliche geologische Barriere wird also anhand eines im Hinblick auf den Menschen wirkungsbezogenen Maßstabs beurteilt. Alle anderen Schutzgüter bleiben unberücksichtigt oder werden unter dem Schutzgut Mensch subsumiert - eine Einschränkung, die den Schutzbedürfnissen wichtiger Umweltbestandteile und den Anforderungen der Umweltvorsorge nicht gerecht wird (s. 3.2.1).

Formal gilt das Endlager im Hinblick auf das atomrechtliche Schutzziel (s. 3.2.1) dann als geeignet, wenn die im Rahmen der Sicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase berechneten Individualdosen durch aus einem Endlager freigesetzte Radionuklide die entsprechenden Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung nicht übersteigen. Kernstück dieser Sicherheitsanalyse ist daher die mathematische Simulation des Radionuklidtransportes mit dem Grundwasser aus dem Endlager in die Biosphäre. Sie führt zur Berechnung der Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser, aus denen unter bestimmten Annahmen zur direkten und indirekten Nutzung des Wassers die resultierende Strahlenbelastung in Form potentieller Individualdosen berechnet wird.

Für die Prüfung, ob auch die Schutzziele gegenüber anderen Schutzgütern eingehalten werden, enthalten die "Sicherheitskriterien" (RSK 1983) keinerlei Hinweise. Das gilt auch hinsichtlich der Forderung nach Immissionsneutralität eines Endlagers zum Schutz des Grundwassers (s. 3.2.1). Hier ist die geogene (natürliche) Grundkonzentration eines freisetzbaren Stoffes im jeweils betrachteten Umweltmedium, z.B. Grundwasser, als einzig möglicher schutzgutimma-

nenter Bewertungsmaßstab einzusetzen (BDG 1990, APPEL 1992). An ihm ist die aus der Freisetzung resultierende Stoffkonzentration als Bewertungsgröße zu messen.

Die in den "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) festgeschriebenen konservativ-deterministischen Ansätze für die standortspezifischen Sicherheitsanalysen waren von Anfang an umstritten (z.B. KREUSCH 1983, KREUSCH & HIRSCH 1984, ALBRECHT et al. 1989). Das gilt insbesondere für die Nachweisbarkeit der Konservativität bestimmter Annahmen zur Überbrückung von Informationslücken. Wegen dieser methodischen Probleme werden deterministische Ansätze im internationalen Rahmen zunehmend durch probabilistische Berechnungen mit nachfolgenden Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen ersetzt (STORK 1992).

Der **Zeitraum für den Sicherheitsnachweis** war bei PSE (1985c) und in den Sicherheitskriterien der RSK (1983) nicht begrenzt worden. Insbesondere Probleme beim Eignungsnachweis für das geplante Endlager Konrad haben dann zu einer Modifizierung des Zeitrahmens und des Bewertungssystems geführt. Sie gehen im wesentlichen auf Überlegungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS¹) zurück (PTB 1986, EHRLICH et al. 1986) und bilden die Grundlage für einen entsprechenden Vorschlag von Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission von 1988 (RSK/SSK 1988). Danach sollen Individualdosen nur für Zeiträume bis zu 10.000 Jahren berechnet werden. Außerdem sollen sie nicht mehr an den Grenzwerten der Strahlenschutzverordnung als Maßstab gemessen werden, sondern an der Schwankungsbreite der natürlichen Strahlung. Für längere Zeiträume soll eine sogenannte nuklidspezifische Bewertung der geologischen Barriere durchgeführt werden.

Hauptgrund für diese bislang nicht verbindliche, in der vorgesehenen Form methodisch ohnehin nicht akzeptierbare (ALBRECHT et al. 1989, APPEL 1992) Abstufung ist die abnehmende Aussagekraft von Prognosen zu den Randbedingungen des Radionuklidtransportes, insbesondere zur langfristigen Entwicklung des Klimas. Richtig ist, daß die Aussagekraft von Prognosen natürlicher Prozesse mit zunehmender Länge des Prognosezeitraums und der Zahl der Einflußfaktoren grundsätzlich abnimmt. Früher oder später gehen praktisch alle Prognosen in mehr oder weniger genaue Schätzungen über - ein Sachverhalt, der im übrigen bereits bei der Formulierung der "Sicherheitskriterien" durch die RSK feststand. Die Tatsache, daß er in den Sicherheitskriterien keinen Niederschlag gefunden hat, bestätigt nur deren konzeptionelle Mängel. Die genannten Probleme bestehen aber ohnehin - auch für Klimaprognosen - bereits für deutlich kürzere Zeiträume (ALBRECHT et al. 1989). Die von RSK/SSK (1988) angestrebte Begrenzung des Betrachtungszeitraums ist also willkürlich gewählt.

Diese unvermeidlichen Prognoseprobleme dürfen nicht dazu führen, daß die unerläßlichen und begründeten Anforderungen an die Langzeitsicherheit von Endlagern reduziert werden oder auf eine Bewertung sogar verzichtet wird, weil kein geeignetes Bewertungsinstrumentarium zur Verfügung steht. Der Zeitraum für den Nachweis der Langzeitsicherheit muß unbedingt mit dem erforderlichen Isolationszeitraum identisch sein; das ist derjenige Zeitraum, für den die radioaktiven Abfälle eines Endlagers überhaupt eine Gefahr für die Biosphäre (und

¹ Früher: Abteilung SE der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB).

andere Schutzgüter) darstellen können. Nachweisverfahren, die aus methodischen Gründen nicht den gesamten Zeitraum abdecken können, sind ungeeignet.

Die schwerwiegenden Mängel der in den "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) festgeschriebenen Vorgehensweise zum Nachweis der Langzeitsicherheit sind bereits während der Diskussionen über die Ergebnisse von PSE deutlich geworden (BMFT 1983). Während des Planfeststellungsverfahrens Konrad, dem ersten verbindlichen Eignungsnachweis für ein Endlager der Bundesrepublik, haben sie sich bestätigt und vertieft. Es ist daher damit zu rechnen, daß in Zukunft Modifizierungen des Verfahrens erfolgen werden - zumal sich die Verfahren zum Nachweis der Langzeitsicherheit in fortwährender Entwicklung befinden.

3.2.4 Grundlagen zur Beurteilung der "Eignungshöflichkeit" des Standortes Gorleben

Nach Vorlage der ersten zuverlässigen Befunde vom Standort Gorleben im Rahmen der Erkundung von übertage aus sind von verschiedenen Autoren Einwände gegen dessen Eignung und seine weitere Untersuchung vorgetragen worden (u.a. APPEL 1981 u. 1983, APPEL & KREUSCH 1984, APPEL et al. 1985, BLECK-NEUHAUS 1983, DUPHORN 1981, 1983, 1984a u. 1988, KREUSCH 1983, MAUTHE 1981 u. 1983). Sie bestätigten bzw. modifizierten die Kritik, die bereits vor Beginn der Untersuchungen an der Standortwahl Gorleben geübt worden war (u.a. GRIMMEL 1979, MAUTHE 1979).

Demgegenüber haben der Antragsteller für das ausstehende atomrechtliche Genehmigungsverfahren Gorleben (PTB bzw. BFS) bzw. die für ihn tätigen Gutachter und die Bundesregierung immer wieder die "Eignungshöflichkeit" des Standortes Gorleben betont (BMFT 1984) und rechtfertigen damit die untertägige Erkundung des Teilsalzstockes Gorleben (PTB 1983, BFS 1990). Eigenschaften, aus denen sich die im Vergleich mit anderen Standorten besondere Eignungshöflichkeit Gorlebens ableiten ließe, sind bisher allerdings nicht benannt worden. Antragsteller und Bundesregierung entziehen sich sogar der Bewertung konkreter Befunde und fordern stattdessen die Vorbereitung der in den "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) festgeschriebenen (umfassenden) Sicherheitsanalyse. Untersuchungsergebnisse, die dem späteren Nachweis der Standorteignung durch diese Sicherheitsanalyse entgegenstünden, lägen nicht vor.

Diese - in Hinblick auf die aus den Untersuchungsergebnissen zu ziehenden Konsequenzen - gegensätzliche Bewertung derselben Befunde geht im wesentlichen auf folgende Umstände zurück:

- In der Bundesrepublik Deutschland existieren keine allgemein akzeptierten Kriterien für Standortvorauswahl und Bewertung von Untersuchungsbefunden (s. 3.2.3.1), deren Anwendung die fachlich unstrittige Beurteilung sicherheitsrelevanter Sachverhalte erzwingt.

- Es gibt keine allgemein akzeptierte Definition der Begriffe "Eignungshöflichkeit" und "eignungshöflich".

Listen von Beurteilungskriterien, die in den verschiedenen Phasen eines Verfahrens für Standortauswahl und Eignungsnachweis anzuwenden wären, können an dieser Stelle nicht vorgelegt werden. Allerdings liefert die fachlich-methodische Umsetzung des Vorsorgegedankens (s. 3.2.1) sowohl Hinweise auf die Definition des Begriffes "Eignungshöflichkeit" (s. 3.2.4.1) als auch belastbare Ansätze für den Umgang mit Untersuchungsbefunden im Rahmen der Standortbeurteilung (s. 3.2.4.2).

3.2.4.1 Definition des Begriffes "Eignungshöflichkeit"

Die Bewertung von bei der Standorterkundung erarbeiteten Befunden im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines geplanten Endlagers kann grundsätzlich auf zweifache Weise erfolgen:

- Zum einen kann die Einhaltung bestimmter materieller Anforderungen an einen Standort mit Hilfe von Kriterien geprüft werden, in denen sich die Erwartungen an einen geeigneten Standort bzw. den Gesteinskörper, in dem das Endlager eingerichtet werden soll, niederschlagen. Diese Erwartungen ergeben sich aus dem Anforderungsprofil an einen Standort (s. 3.2.2) und - über Analogieschlüsse - aus den grundsätzlichen Erkenntnissen und Erfahrungen, die über die eignungsrelevanten Eigenschaften bestimmter Gesteine vorliegen.
- Andererseits können Untersuchungsbefunde in schutzzielbezogene Sicherheitsbetrachtungen einfließen, z.B. in die Modellrechnungen zur Radionuklid Ausbreitung im Rahmen der Sicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase (s. 3.2.3.2). Solche Betrachtungen erfordern umfangreiche standortspezifische Kenntnisse und führen zu "immateriellen" Eignungsaussagen, die im Zuge der Standortvorauswahl oder -bewertung nicht mehr anhand einzelner Untersuchungsbefunde beurteilbar sind.

Welches Bewertungsinstrumentarium für die verbleibenden Arbeitsschritte auch gewählt wird, in jedem Fall ist der Stellenwert, den die Beurteilung von Untersuchungsbefunden und/oder die Ergebnisse von Modellrechnungen zur Stoffausbreitung im Rahmen der Nachweisführung haben, vorab festzulegen. Er beeinflusst nämlich die Verbindlichkeit von Kriterien oder der Ergebnisse von Sicherheitsanalysen und damit zugleich maßgeblich den Informationsbedarf, dessen Deckung Voraussetzung für die jeweilige Vorgehensweise ist.

Die Anwendung von Kriterien ist grundsätzlich in allen Phasen der Standortsuche und

-beurteilung (s. 3.2.2) möglich. Auf die Wahl des Endlagermediums, die selbstverständlich ebenfalls die Eignung und damit auch die "Eignungshöflichkeit" eines Standortes berührt, wird im folgenden jedoch nicht eingegangen. Es wird vielmehr vereinfachend unterstellt, daß die sich aus Art und Menge der einzulagernden Abfälle ergebenden Anforderungen an das Gestein erfüllt sind und daß die Gesteinseigenschaften die Errichtung eines Bergwerkes erlauben.

Bei den Arbeitsschritten "einengende Vorauswahl" und "vergleichende Standortbewertung" ist die Anwendung von Kriterien unumgänglich. Ihr Vorteil liegt darin, daß sie trotz geringer Datendichte eindeutige Handlungsanweisungen zum Umgang mit bestimmten Informationen beinhalten. Für jeden Beurteilungsschritt können nämlich unter Berücksichtigung von Art und Umfang der verfügbaren bzw. gezielt zu erhebenden Informationen Standortanforderungen formuliert und in Kriterien umgesetzt werden. Wegen des sich im Laufe des Verfahrens verbessernden Informationsstandes nimmt deren Detaillierungsgrad bzw. Verlässlichkeit von Bewertungsschritt zu Bewertungsschritt zu.

Je nach Zielsetzung und Formulierung im einzelnen können Kriterien zum Vergleich bestimmter Eigenschaften verschiedener Standorte herangezogen werden, oder - soweit sie sich auf unerläßliche Mindestanforderungen an Standorte beziehen - zum Ausschluß von Standorten aus dem Auswahlverfahren führen, und zwar unabhängig davon, für welchen Bewertungsschritt im Nachweisverfahren (s. 3.2.2) die entscheidenden Befunde erhoben werden. Beispielsweise kann die Ausdehnung des für die Einlagerung in Frage kommenden Gesteinskörpers sowohl in ein Kriterium umgesetzt werden, dessen Einhaltung oder Nichteinhaltung über den Verbleib eines Standortes im Verfahren entscheidet (Ausschlußkriterium), als auch in ein Kriterium zum Vergleich verschiedener Standorte untereinander.

Die Erkenntnisse und Erfahrungen über die Eigenschaften von Gesteinskörpern, auf die sich die Ableitung von Bewertungskriterien stützt, belegen zugleich, daß anhand einfach erhebbarer äußerer Standortmerkmale in der Regel nur vorläufige Eignungsaussagen getroffen werden können. Entsprechend dem Konservativitätsprinzip unterliegt daher jede positive Einschätzung einer Standorteigenschaft auf Grund von Kriterien dem Vorbehalt der Bestätigung durch spätere Untersuchungen. Erst dadurch wird aus einem **potentiell geeigneten** ein **tatsächlich geeigneter** Standort.

Für die Nachbildung aller Teilsysteme des Endlagers und aller für Betrieb und Langzeitsicherheit wichtigen Ereignisabläufe im Rahmen einer abschließenden Sicherheitsanalyse sind dagegen so detaillierte Informationen erforderlich, daß sie erst in der Schlußphase der Standorterkundung vorliegen können. Möglicherweise werden dafür sogar Erfahrungen mit der Einlagerung und Ergebnisse der Beobachtung der Auswirkungen der Abfalleinlagerung auf das Wirtsgestein benötigt. Eine **abschließende** Sicherheitsanalyse unter Berücksichtigung aller Standortdaten kann also zwangsläufig erst nach der untertägigen Erkundung erfolgen. Nur in diesem Sinne ist daher im Fall Gorleben die oben geschilderte Position des Antragstellers nachvollziehbar.

Die Tatsache, daß eine alle Sicherheitsaspekte berücksichtigende abschließende Sicherheitsanalyse zwangsläufig erst am Ende eines Nachweisverfahrens stehen kann, bedeutet jedoch nicht, daß eine Befundbewertung vorher nicht erforderlich wäre. Im Gegenteil: Bei der Standortvorauswahl und solange der Informationsbedarf für die abschließende Beurteilung der Langzeitsicherheit eines (systematisch) vorausgewählten Standortes noch nicht gedeckt ist, müssen alle Untersuchungsbefunde fortwährend, insbesondere aber im Zuge der vorzusehenden Bewertungsschritte, an den vorab formulierten Erwartungen an einen potentiell geeigneten Standort gemessen werden.

BfS und Bundesregierung vertreten mit ihrem Verzicht auf die Befundbewertung durch Anwendung geeigneter Kriterien unausgesprochen letztlich die methodisch unzulässige Position, daß jeder Standort bis zum abschließenden Beweis des Gegenteils durch eine umfassende Sicherheitsanalyse als "eignungshöffig" gelten darf. Eine solche Einschätzung steht in krassem Widerspruch zu den Zielen eines methodisch angemessenen und zielgerichtet durchgeführten Nachweisprogrammes. Beim Nachweis der Langzeitsicherheit geht es ja gerade nicht darum festzustellen, ob ein beliebiger Standort den mit einer umfassenden Sicherheitsanalyse zu prüfenden Anforderungen an die Langzeitsicherheit (gerade noch) genügt. Die Umsetzung von Minimierungsgebot bzw. Vorsorgegeprinzip sowie der aktuelle wissenschaftliche Stand bei Standortauswahl und Eignungsnachweis zwingen vielmehr dazu, nur solche Standorte in ein Nachweisverfahren einzubeziehen bzw. darin zu belassen, die nachweislich bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. Das setzt voraus, daß sie im Rahmen der Standortvorauswahl anhand geeigneter Kriterien als **potentiell geeignet** erkannt worden sind.

Aus diesen Ausführungen ergibt sich zwangsläufig auch die methodisch und sicherheitsmäßig allein akzeptierbare Definition für die Begriffe "eignungshöffig" oder - besser - "potentiell geeignet" (bzw. die entsprechenden Substantive):

Potentiell geeignet bzw. "**eignungshöffig**" sind nur solche Standorte, die nachweislich bestimmte, bereits vor Beginn der Standortsuche anhand eines Anforderungsprofils formulierte Mindestanforderungen erfüllen. Da die Standortsuche im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eines geplanten Endlagers erfolgt, sind nur diesbezüglich aussagekräftige Mindestanforderungen von Bedeutung. Standorte, die ohne angemessenes Auswahlverfahren benannt worden sind oder solche Mindestanforderungen nicht erfüllen, sind **ungeeignet**.

Die Kennzeichnung eines vorausgewählten Endlagerstandortes als "eignungshöffig" darf also nicht bloß auf einer vagen Hoffnung beruhen, sondern bedarf der zusätzlichen Begründung dafür, daß berechtigte Aussicht auf einen positiven Eignungsnachweis besteht.

Diese Definition steht grundsätzlich auch in Einklang mit der ursprünglichen Verwendung des Begriffes "höffig", der von den für die Endlagerung zuständigen bundesdeutschen Institutionen unter Verlust seiner ursprünglichen Bedeutung aus der Lagerstättenkunde entlehnt worden ist:

Als "höffig" werden dort nur solche Bereiche der Erdkruste bezeichnet, für die auf Grundlage bestimmter Erkenntnisse die begründete Aussicht auf das Vorhandensein eines förderungswürdigen Rohstoffvorkommens besteht.

Zur Vermeidung von Mißverständnissen sollten die Begriffe "eignungshöffig" und "Eignungshöffigkeit" im Rahmen eines sachgemäß durchgeführten Verfahrens für Standortauswahl und Nachweis der Langzeitsicherheit nicht verwendet werden. Diese Regelung muß zumindest solange gelten, wie BfS und Bundesregierung bei der von ihnen bevorzugten methodisch unangemessenen Vorgehensweise bei der Standortsuche für Endlager und der willkürlichen Vergabe der Bezeichnung "eignungshöffig" für willkürlich festgelegte Standorte bleiben.

3.2.4.2 Ansätze zur Beurteilung der "Eignungshöffigkeit" des Standortes Gorleben anhand von Untersuchungsbefunden

3.2.4.2.1 Grundlagen der Beurteilung

Die im Zusammenhang mit der Festlegung auf den Standort Gorleben von den zuständigen Institutionen genannten Kriterien stellen wegen ihrer Unverbindlichkeit keine ausreichende Grundlage dar, um dem Standort die potentielle Eignung gemäß der in 3.2.4.1 gegebenen Definition zuzuschreiben (s. auch 3.1.3). Entsprechendes gilt für die Entscheidung über die untertägige Erkundung auf Grund der Erkundungsergebnisse von übertage und erst recht für die Standortbeurteilung aus heutiger Sicht. Bei diesen beiden Beurteilungsschritten müßten Kriterien zur Anwendung kommen, deren Differenzierungsgrad dem gewachsenen Informationsstand entspricht.

Von den verantwortlichen Institutionen sind aber bis heute weder geeignete Kriterien vorgelegt noch sonstige Vorgaben zum wertenden Umgang mit Untersuchungsbefunden gemacht worden. Insbesondere fehlen Aussagen dazu, welche Erkundungsbefunde überhaupt zur Aufgabe des Standortes Gorleben hätten führen können. Die Verantwortlichen entziehen sich einer Wertung konkreter Befunde unter Verweis auf die in den "Sicherheitskriterien" der RSK (1983) geforderte abschließende Sicherheitsanalyse (s. dazu 3.2.3.1). Vor dem Hintergrund der Erläuterung des Begriffes "potentielle Eignung" in 3.2.4.1 liefern das Minimierungsgebot des Atomgesetzes und der Vorsorgegedanke anderer Gesetze (s. 3.2.1) jedoch klare Hinweise auf den angemessenen Umgang mit Standortbefunden auch dann, wenn Bewertungskriterien nicht verbindlich festgelegt worden sind. Sie ergeben sich aus dem Anforderungsprofil an den gesuchten Standort (s. 3.2.2) bzw. - wo ein solches Profil nicht formuliert worden ist - aus der Erwartungshaltung gegenüber einem "möglichst gut" bzw. "relativ gut" geeigneten Standort. Sie sind in geeignete Anforderungen bzw. Beurteilungskriterien umzusetzen.

Für die Formulierung von Anforderungen, die zur vergleichenden Bewertung herangezogen werden sollen, gelten (u.a.) folgende Grundsätze:

- Die geforderte Standorteigenschaft muß für die Standorteignung erheblich sein.
- Die Erfüllung der Anforderung muß im Rahmen der auf den jeweiligen Bewertungsschritt abgestimmten Phase der Standorterkundung überprüfbar sein.
- Die Anforderung darf nicht unerfüllbar sein.

Es liegt auf der Hand, daß für die Prüfung, wieweit insbesondere die letztgenannte Bedingung erfüllt ist, entsprechende Kenntnisse über die sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Salzstöcken im allgemeinen vorliegen müssen. Das ist bis heute bei der Mehrzahl der Salzstöcke wegen des vor allem auf die Salzgewinnung ausgerichteten Interesses keineswegs der Fall.

Da es keine etablierten Kriterien zur vergleichenden Bewertung verschiedener Salzstockstandorte gibt und außerdem von zu wenigen Standorten vergleichbar umfangreiche Datenbanken wie für Gorleben existieren, ist ein Vergleich der Befunde vom Standort Gorleben mit denen von anderen Salzstöcken nicht möglich. Allerdings findet ja die gegenwärtige Diskussion um die "Eignungshöflichkeit" des Standortes Gorleben auch nicht im Zuge der vergleichenden Bewertung mehrerer Standorte statt, sondern im Rahmen einer Zwischenbewertung während der Erkundung für den Eignungsnachweis (s. 3.2.3.2).

An dieser Stelle kann zwar weder die differenzierte Ausformulierung von Kriterien erfolgen noch kann auf die methodischen Probleme bei der Zusammenführung verschiedener Beurteilungskriterien im Rahmen der vergleichenden Bewertung von Standorten eingegangen werden. Die Vorgehensweise bei der Formulierung von Standortanforderungen wird jedoch im folgenden beispielhaft an den hydrogeologischen Verhältnissen im Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben erläutert:

Das Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben stellt neben dem Salzstock selbst einen wichtigen Bestandteil der geologischen Barriere des geplanten Endlagers dar. Im Rahmen des Multibarrierenprinzips wird von beiden Teilen eine möglichst hohe Funktionstüchtigkeit erwartet (s. 3.2.1). Das gilt nicht nur aus grundsätzlichen Erwägungen (Minimierungsgebot), sondern auch deshalb, weil Unzulänglichkeiten eines Teils der geologischen Barriere nicht durch günstige Eigenschaften des anderen Teils ausgeglichen werden können. Bei einem nicht ausschließbaren Versagen der Barriere Salzstock (vgl. PAGIS 1988, S. 177 ff) liegt die Sicherheitslast allein bei Neben- und Deckgebirge. Allein deshalb kann ein Standort, an dem die Barriere Neben- und Deckgebirge keine hohe Funktionstüchtigkeit aufweist, insgesamt nicht geeignet sein.

Grundlage der Beurteilung sind Anforderungen, die in Form von Kriterien aus der Erwartungshaltung an die wichtigen sicherheitsrelevanten Merkmale des Deckgebirges und des Nebengebirges des Salzstocks Gorleben vorab festgelegt werden. Die vom Standort Gorleben vorlie-

genden Untersuchungsbefunde werden an diesen Kriterien mit Hilfe vorformulierter Bewertungsmerkmale einer von drei Bewertungsgruppen (günstig, ungünstig, sehr ungünstig) zugeordnet. Kriterien und Bewertungsmerkmale sind ungeprüft weder auf andere Standorte mit Salzgestein noch auf andere Wirtsgesteine übertragbar.

Der Formulierung der Anforderungen und der Bewertungsmerkmale liegen folgende Überlegungen zugrunde:

Bei der Endlagerung in Steinsalz besteht die geologische Barriere aus zwei Barriereteilen mit sehr unterschiedlichen Gesteinsmerkmalen, dem Salzgesteinskörper des Salzstocks im engeren Sinne und dem umgebenden bzw. überlagernden Neben- und Deckgebirge. Die Barriereteile Neben- und Deckgebirge haben eine Doppelfunktion:

- Sicherung der Integrität des Barriereteils Salzstock im engeren Sinne durch Schutz gegen Ablaugung und das Eindringen von Grundwasser in potentiell wasserleitende Gesteine des Salzstockes,
- Schutz der Biosphäre vor der Wirkung radioaktiver Strahlung durch Verhinderung bzw. Verzögerung des Radionuklidtransportes vom Salzspiegel in das oberflächennahe Grundwasser.

Beide Funktionen hängen maßgeblich von der Geschwindigkeit des Stofftransportes mit dem Grundwasser und den betroffenen Stoffmengen ab: Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers und zunehmendem Wasserumsatz nehmen das Ausmaß des advektiven Radionuklidtransportes vom Salzspiegel bzw. Salzstockrand in die Biosphäre und - bei entsprechender Konfiguration des Grenzbereiches Deckgebirge bzw. Nebengebirge / Salzstock - das Ausmaß der Salzauflösung am Salzspiegel zu. Sicherheitsrelevant sind also diejenigen Eigenschaften des Neben- und Deckgebirges, die das Ausmaß des advektiven Stofftransportes maßgeblich beeinflussen. Dabei ist die Tatsache zu berücksichtigen, daß sich in den Abfällen auch gut wasserlösliche und langlebige Radionuklide befinden, die zudem nur wenig sorbiert werden.

Von den das potentielle Ausmaß advektiven Radionuklidtransportes und von Subrosion beeinflussenden Prozessen und Standortbedingungen können nur wenige aus konkreten, mit einfachen Verfahren erhebbaren Standorteigenschaften direkt abgeleitet werden, und zwar in folgendem Sinne:

- Ungünstig hohe Grundwassergeschwindigkeit und ungünstig hoher Wasserdurchsatz äußern sich in der Existenz entsprechender hydraulischer Potentiale und der Existenz grober bzw. klüftiger Gesteine mit hoher Wasserdurchlässigkeit (Grundwasserleiter).

- Ungünstig geringe Transportweite äußert sich in geringem Abstand zwischen dem potentiellen Eintrittsort von Radionukliden in das Deckgebirge und dem Eintrittsort in das oberflächennahe Grundwasser.
- Ungünstig geringe Sorptionsleistung der durchströmten Gesteine äußert sich in geringem Tonanteil.

Diffusion und Dispersion werden nicht berücksichtigt, da die vorliegenden Daten nicht die erforderliche Aussagekraft besitzen.

Wegen des bereits fortgeschrittenen Erkundungsstandes können neben den konkreten Standorteigenschaften auch Ergebnisse von Grundwasser- und Gesteinsuntersuchungen und hydraulische Informationen in die Beurteilung einbezogen werden. Außerdem liefern die Beobachtung bzw. Rekonstruktion auffälliger Phänomene, wie z.B. der Subrosion, indirekte Hinweise auf die tatsächliche oder potentielle Geschwindigkeit des advektiven Stofftransportes und daraus möglicherweise resultierende Folgen.

3.2.4.2.2 Kriterien und Bewertungsmerkmale

Kriterium 1: Geologischer und hydrogeologischer Aufbau von Deck- und Nebengebirge

Die Zusammensetzung der am Aufbau von Deck- und Nebengebirge beteiligten Gesteine sowie die Lagebeziehungen der Gesteine zueinander müssen den Radionuklidtransport in die Biosphäre verhindern oder doch nachhaltig verzögern.

Aus dem geologischen und hydrogeologischen Aufbau von Neben- und Deckgebirge können wesentliche Angaben über die **Transportmöglichkeiten** für Radionuklide in Deck- und Nebengebirge abgeleitet werden, etwa die Existenz wasserleitender Gesteine zwischen dem Eintrittsort von Radionukliden in das Deckgebirge bzw. Nebengebirge und der Biosphäre. Die mutmaßlichen Befunde stammen üblicherweise aus Bohrungen und betreffen - anders als bei vielen anderen Untersuchungen - zeitlich weitgehend unveränderbare Eigenschaften des Deck- und Nebengebirges. Die Plausibilität der Bewertung solcher Standortbefunde wird durch Homogenität von Neben- und Deckgebirge erleichtert.

Neben- und Deckgebirge sind getrennt zu bewerten. Die Bewertungsmerkmale für Neben- und Deckgebirge sind identisch:

Kriterium 1.1: Geologischer und hydrogeologischer Aufbau des Nebengebirges

Kriterium 1.2: Geologischer und hydrogeologischer Aufbau des Deckgebirges

Bewertungsmerkmale

Günstig:

Das Neben- bzw. Deckgebirge ist weitgehend homogen aufgebaut. Es besteht ausschließlich oder überwiegend aus Gesteinen mit geringer Wasserdurchlässigkeit und hoher Rückhalteleistung. Potentiell wasserleitende Gesteine haben geringe Ausdehnung und sind hydraulisch voneinander isoliert. Die Lagerungsverhältnisse sind einfach und zuverlässig zu rekonstruieren.

Ungünstig:

Das Neben- bzw. Deckgebirge besteht aus Gesteinen mit unterschiedlicher Wasserdurchlässigkeit (und hoher Rückhalteleistung). Vorhandene Grundwasserstockwerke sind weitgehend hydraulisch voneinander getrennt. Die Lagerungsverhältnisse sind überwiegend einfach und weitgehend zuverlässig zu rekonstruieren.

Sehr ungünstig:

Das Neben- bzw. Deckgebirge oder ausgedehnte Zonen des Deckgebirges bestehen überwiegend aus Gesteinen mit hoher Wasserdurchlässigkeit (und geringer Rückhalteleistung).

Oder: Das Neben- bzw. Deckgebirge besteht aus Gesteinen mit unterschiedlicher Wasserdurchlässigkeit (und unterschiedlicher Rückhalteleistung). Die Lagerungsverhältnisse sind kompliziert und nicht zuverlässig zu rekonstruieren. Vorhandene Grundwasserstockwerke sind nicht nachhaltig durch Gesteine mit geringer Wasserdurchlässigkeit und hoher Rückhalteleistung voneinander getrennt.

Kriterium 2: Hydrogeologische Verhältnisse im Grenzbereich Salzstock / Neben- bzw. Deckgebirge

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Grenzbereich Salzstock / Neben- bzw. Deckgebirge müssen so beschaffen sein, daß der Übertritt von Radionukliden aus dem Salzstock in das Deckgebirge bzw. das Nebengebirge und der Zutritt von Grundwasser in wasserleitende bzw. stark wasserlösliche Gesteine des Salzstocks verhindert, mindestens nachhaltig behindert werden.

Kriterium 2.1: Hydrogeologische Verhältnisse im Bereich Salzstock / Neben- bzw. Deckgebirge

Mit diesem Kriterium werden die hydrogeologischen Verhältnisse am mutmaßlichen Ort des Radionuklideintritts in das Neben- bzw. Deckgebirge beurteilt. Es werden damit die Möglichkeiten für den Übertritt von Radionukliden aus dem Salzstock in wasserleitende bzw. wasserlösliche Gesteine des Salzstocks geprüft. Unter Gipshut werden im folgenden auch die Residualbildungen am seitlichen Salzstockrand verstanden.

Bewertungsmerkmale**Günstig:**

Der Gipshut hat keinen Kontakt mit grundwasserleitenden Gesteinen. Der Gipshut weist geringe Wasserdurchlässigkeit auf.

Ungünstig:

Der Gipshut weist örtlich deutliche Wasserdurchlässigkeit auf. Es bestehen nachweislich nur lokal begrenzte Kontakte zwischen wasserleitenden Gesteinen des Neben- bzw. Deckgebirges und Gipshut. Potentiell wasserleitende oder subrosionsanfällige Gesteine des Salzstocks kommen in diesen Zonen im Salzspiegelbereich nicht vor.

Sehr ungünstig:

Der Gipshut weist deutliche Wasserdurchlässigkeit auf oder fehlt örtlich. Es bestehen Kontaktzonen zwischen Gipshut bzw. Gesteinen des Salzstocks und wasserleitenden Gesteinen des Neben- bzw. Deckgebirges. In diesen Zonen erreichen potentiell wasserleitende oder subrosionsanfällige Gesteine des Salzstocks den Salzspiegel.

Kriterium 2.2: Subrosion

Mit diesem Kriterium wird geprüft, ob die für den Übertritt von Radionukliden aus dem Salzstock in das Deckgebirge und die Beeinträchtigung der Barriere Salzstock bestehenden Möglichkeiten tatsächlich wirksam sind bzw. in der Vergangenheit wirksam gewesen sind.

Durch Subrosion wird einerseits der Abstand zwischen Endlager und wasserleitenden Gesteinen des Deckgebirges verringert, und zwar besonders stark dort, wo Kalisalze in Kontakt mit dem Grundwasser treten. Andererseits verändert sich durch Subrosion fortwährend die Konfiguration der Gesteine im Salzspiegelbereich. Dadurch können hydraulische Kontakte zwischen grundwasserführenden Gesteinen des Deckgebirges, dem Gipshut und potentiell wasserleitenden und wasserlöslichen Gesteinen des Salzstockes entstehen oder wiederbelebt werden.

Bewertungsmerkmale

Günstig:

Subrosion findet gegenwärtig nicht statt und ist für das gesamte Quartär nicht nachzuweisen. Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Salzspiegelbereich lassen nicht erwarten, daß künftig Subrosion stattfinden wird.

Ungünstig:

Subrosion findet gegenwärtig nicht statt, hat jedoch während einzelner Zeitabschnitte des Quartär stattgefunden. Das Ausmaß und die standortspezifischen Ursachen der Subrosion sind so gut bekannt, daß eine künftige Wiederbelebung ausgeschlossen werden kann. Die hydrogeologischen Verhältnisse im Salzspiegelbereich lassen nicht erwarten, daß Subrosion zu einer Gefährdung des Endlagers führen kann.

Sehr ungünstig:

Subrosion findet gegenwärtig (wahrscheinlich) statt. Nachweislich hat in der Vergangenheit flächenhaft Subrosion stattgefunden. Wo gut wasserlösliche (und potentiell wasserleitende) Gesteine des Salzstocks den Salzspiegel erreichen, ist es in der Vergangenheit zu vorauseilender Subrosion gekommen. Auch für Zukunft kann Subrosion nicht ausgeschlossen werden.

Kriterium 3: Grundwasserbewegung in Deckgebirge und Nebengebirge

Die potentielle und die tatsächliche Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers in Deck- und Nebengebirge müssen möglichst gering sein.

Mit diesem Kriterium wird geprüft, ob die unter Kriterium 1 geprüften Möglichkeiten des Radionuklidtransportes, die sich aus dem Aufbau von Neben- und Deckgebirge ergeben, gegenwärtig tatsächlich wirksam sind bzw. in der jüngsten Vergangenheit wirksam gewesen sind.

Kriterium 3.1: Grundwasserbewegung und GrundwassergeschwindigkeitBewertungsmerkmale

Günstig:

Grundwasserbewegung findet in tiefen Zonen des Neben- bzw. Deckgebirges nachweislich nicht oder praktisch nicht statt. Es existieren auch keine für die Grundwasserbewegung in großer Tiefe und den Aufstieg tiefen Grundwassers in Nähe des Salzstocks ausreichenden Druckverhältnisse. Versalzung und Dichte nehmen generell mit der Tiefe rasch und kontinuierlich zu. Salzwasseraufstiegszonen sind in der Umgebung des Salzstocks nicht vorhanden. Das Alter des tiefen Grundwassers ist so groß, daß es mit C₁₄-Untersuchungen nicht mehr bestimmt werden kann. Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten liegen unter einigen Zentime-

tern pro Jahr. Die Grundwassergenese ist bekannt; Ablaugungswasser tritt im Deckgebirge nicht auf.

Ungünstig:

Auf Grund der Potentialverteilung ist mit Wasserbewegung in den tiefen Grundwasserleitern zu rechnen. Direkte Messungen der Strömungsgeschwindigkeit des tiefen Grundwassers belegen, daß sich das tiefe Grundwasser tatsächlich mit geringer Geschwindigkeit bewegt. Das tiefe Grundwasser ist hochgradig versalzt. Aufstiegszonen tiefen Grundwassers sind aus der Umgebung des Salzstocks bekannt. Im Deckgebirge treten Ablaugungswässer auf. Das Grundwasseralter ist hoch; es nimmt mit der Tiefe unregelmäßig (von Grundwasserstockwerk zu Grundwasserstockwerk) zu. Die Grundwassergenese ist bekannt und belegt, daß es sich um sehr altes Grundwasser handelt.

Sehr ungünstig:

Auf Grund der Potentialverteilung ist mit Wasserbewegung in den tiefen Grundwasserleitern zu rechnen. Hinweise oder Messungen lassen tatsächlich auf erhebliche Strömungsgeschwindigkeit auch des tiefen Grundwassers schließen oder belegen sie. Auch das tiefe Grundwasser ist relativ jung. Die Zone nicht versalzten oberflächennahen Grundwassers reicht - zumindest örtlich - bis in große Tiefe. Das tiefe Grundwasser ist zwar versalzt, doch treten hydrochemische Unregelmäßigkeiten auf. Aufstiegszonen versalzten tiefen Grundwassers sind aus der engeren Umgebung des Salzstocks bekannt. Die Grundwassergenese ist bekannt; in höheren Abschnitten des Deckgebirges treten Ablaugungswässer auf.

Kriterium 3.2: Grundwasserlaufzeit durch das Deckgebirge

Aus dem hydrogeologischen Aufbau des Deckgebirges, den hydraulischen Verhältnissen und dem Abstand zwischen Salzspiegel und oberflächennahem Grundwasser lassen sich Rückschlüsse auf die Länge des Weges und die Grundwasserlaufzeit vom Salzgesteinskörper des Salzstocks durch das Deckgebirge in die Biosphäre ziehen. Unabhängig von der Frage ihrer Zuverlässigkeit können vorliegende Ergebnisse von Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung in die Beurteilung einfließen, wenn sie prinzipiell plausibel sind. Ihre Aussagekraft darf jedoch nicht überschätzt werden.

Da Advektion den wesentlichen Transportmechanismus für Radionuklide aus einem Endlager darstellt, ist die Grundwasserlaufzeit zugleich ein Maß für die Transportzeit gut wasserlöslicher und wenig sorbierbarer Radionuklide.

Bewertungsmerkmale

Günstig:

Das tiefe Grundwasser kommt erst in sehr großer Entfernung vom Salzstock in Oberflächen-nähe. Der Transportweg ist sehr lang. Die berechneten oder sonstwie ableitbaren Grundwas-serlaufzeiten liegen um mindestens eine Größenordnung über dem erforderlichen Isolations-zeitraum.

Ungünstig:

Der Transportweg ist relativ lang. Die berechneten oder sonstwie ableitbaren Laufzeiten liegen in der Größenordnung des erforderlichen Isolationszeitraums.

Sehr ungünstig:

Der Transportweg ist relativ kurz. Die Laufzeiten liegen unter dem erforderlichen Isolationszeit-raum.

4. Hydrogeologische und hydraulische Verhältnisse am Standort Gorleben

4.1 Aufbau und Lagebeziehung hydrogeologischer Einheiten

Bei der Betrachtung des Aufbaus des Deck- und Nebengebirges und der Lagebeziehung seiner hydrogeologischen Einheiten kann es nicht lediglich um die Schichten im Hangenden des Salzstocks (das Deckgebirge im engeren Sinne) gehen. Vielmehr ist das gesamte Neben- und Deckgebirge des Salzstocks Gorleben-Rambow einzubeziehen. In den den Gutachtern zugänglichen Unterlagen (z.B. BGR 1990a) wird jedoch das seitliche Nebengebirge der Randsenken des Teilsalzstocks Gorleben - die gesamte Postzechstein-Schichtfolge bis zur Basis Tertiär - so gut wie nicht behandelt. Detaillierte Untersuchungen fehlen, die spärliche Beschreibung der mesozoischen Schichten stützt sich weitgehend auf Literaturangaben (BGR 1990a: 147). In älteren Arbeiten (z.B. PTB 1983) fehlen selbst diese kurzen Beschreibungen. Offensichtlich wird davon ausgegangen, daß eine hydrologische Gefährdung des Teilsalzstocks Gorleben bzw. eine eventuellen Freisetzung von Radionukliden nur im Bereich des Deckgebirges möglich ist. Eine Erläuterung der Gründe, die zu einer Beschränkung auf Untersuchungen in der tertiären und quartären Schichtenfolge im Hangenden des Salzstocks führte, wird nicht gegeben. Methodisch ist eine solche Verfahrensweise nicht zulässig und unverständlich, da ohne eingehende Untersuchungen eine seitliche hydrologische Gefährdung des Teilsalzstockes Gorleben nicht von vornherein ausgeschlossen werden kann. Vielmehr gibt es Anzeichen dafür, daß zirkulierende Grundwässer auch in tieferen Schichten der Randsenken vorhanden sind (s. 4.1.3. u. 4.3.3). Im folgenden wird daher zuerst die gesamte Schichtfolge des Neben- und Deckgebirges kurz charakterisiert. Potentielle wasserleitende Einheiten werden benannt.

Einen weiteren, prinzipiellen Mangel stellt das Fehlen belastbarer Aussagen über die geologischen Verhältnisse im Bereich des nördlichen Teils des Salzstockes Gorleben-Rambow, d.h. im Gebiet nördlich der Elbe, dar. Auch die BGR ist, zumindest nach der deutschen Wiedervereinigung, dieser Meinung und schlägt Untersuchungen auch im Bereich des Teilsalzstocks Rambow vor (BGR 1990d).

4.1.1 Charakterisierung der Hutzone und der Schichtfolge des Neben- und Deckgebirges des Salzstocks Gorleben-Rambow

4.1.1.1 Zechstein: Hutzone

Hutsalze und Hutgestein bilden die Hutzone. Hutsalze stellen eine Zwischenstufe der Umwandlung vom unveränderten Salzgestein zum Hutgestein dar. Das Hutgestein bildet zwar von seiner Entstehung her einen Teil des Salzstocks, aus hydrogeologischer Sicht ist es jedoch eher dem Neben- und Deckgebirge zuzuordnen.

Hutsalze treten vorwiegend im Bereich des Ausbeißens des leicht löslichen Kaliflözes Staßfurt gegen den Salzspiegel auf. Während sie über Steinsalz eine Mächtigkeit im cm-Bereich haben können, reicht die bekannte Teufe der Umwandlung in der Zone des Ausbeißens des Kaliflözes in der Gorlebener Rinne bis 170 m unter das Niveau des Salzspiegels bzw. 445 m unter GOK (BFS 1991: Bohrung 1305). Deckgebirgsmaterial wurde in dieser Zone vorausseilender Subrosion durch subrodierendes Grundwasser in das umgewandelte Kaliflöz eingespült (BGR 1990a: Abb. 21). Insgesamt wurde vorausseilende Subrosion des Kaliflözes Staßfurt in mehreren Bohrungen festgestellt (BGR 1990a: Tab. 8). Da die bisherige Zahl an tiefen Bohrungen in den Salzstock hinein nur sehr gering ist und diese eher zufälligen Nadelstichen gleichen (die bekannte Ausbißlänge des Kaliflözes am Salzspiegel kann mit ca. 20 km veranschlagt werden, siehe Anl. 34 in BGR 1990a), darf nicht ohne weiteres angenommen werden, daß mit 170 m bereits die maximale Umwandlungsteufe erbohrt wurde. In jedem Fall stellen ausstreichende Kalisalzlagen und ausstreichender klüftiger Anhydrit potentiell Zonen bevorzugter (selektiver) Subrosion dar. Weiterhin spielen Klüfte und Störungen als Wasserwegsamkeiten eine Rolle. Die Einwirkungstiefe unter den Salzspiegel beträgt hier nach Bohrerergebnissen (BGR 1990a: S. 85 u. Tab. 8: Bohrungen GoHy 1141, 3080, 3130) mindestens 32 m (GoHy 1141). Die vorausseilende Subrosion im Kaliflöz Staßfurt - deren Ausmaß zudem nur punktuell bekannt ist - ist für die Sicherheit eines Endlagers von hoher Relevanz, da sie eine entscheidende Schwächung der Barriere Salzstock darstellt. In BFS (1992) wird der "Sicherheitsabstand" zum Salzspiegel, d.h. die Schwebe über dem geplanten Endlager, mit etwa 650 m angegeben. Dieser Wert allein ist jedoch nicht relevant. In der Zone der stärksten Schwächung der Barriere Salzstock, im Bereich des abgelaugten Kaliflözes Staßfurt, beträgt der Abstand bis zur geplanten Einlagerungssohle lediglich etwa 400 m.

Das Hutgestein des Teilsalzstocks Gorleben ist in 49 durchgehend gekernten Bohrprofilen detailliert untersucht worden (BGR 1990a). Diese Bohrungen konzentrieren sich - von wenigen Ausnahmen abgesehen - auf den Zentralteil des Teilsalzstocks (BGR 1990a: Anl. 27). Die maximal erbohrte Hutgesteinsmächtigkeit einschließlich einer Gipsbrekzie beträgt in der Bohrung 1151 exakt 111 m. Dagegen fehlt an einigen Punkten der Salzstockoberfläche in der Gorlebener Rinne das Hutgestein. Auffällig ist die geringe Hutgesteinsmächtigkeit im südwestlichen Teil des Salzstocks im Vergleich mit der hohen Mächtigkeit im Zentralteil. Offensichtlich konnte im Zentralteil bereits prälsterzeitlich besonders viel Salzgestein abgelaugt werden (erkennbar an hohen Gipshutmächtigkeiten im Hangenden der elsterzeitlichen Brekzie), wobei heute dieser Bereich insgesamt nicht näher als der südwestliche Teil an die Erdoberfläche heranreicht. Die Oberfläche des Hutgesteins weist ein extremes, die des Salzspiegels ein schwächeres Relief auf. Die Tiefenlage der Hutgesteinsoberfläche schwankt etwa zwischen 200 m unter NN im südwestlichen Teil des Teilsalzstocks (GoHy 140) sowie großen Arealen des Zentral- und NE-Teils, lokal nur 100 m unter NN im Zentralteil und schließlich bis 300 m unter NN in der Gorlebener Rinne (GoHy 484). Das starke Relief im Bereich der Rinne beruht zumeist auf Aufragungen des Hauptanhydrits (BGR 1990a: S. 170, Anl. 31, 34), was auf selektive Subrosion hinweist. Allerdings erfolgte die Darstellung der einzelnen Bohrprofile in den Anlagen 26 und 27 in BGR (1990a) mit voneinander abweichenden Signaturen, es werden in den Legenden nicht alle verwendeten Signaturen und Kürzel erläutert und es werden in der Anlage 26 offensichtlich einige Bohrungen falsch beziffert.

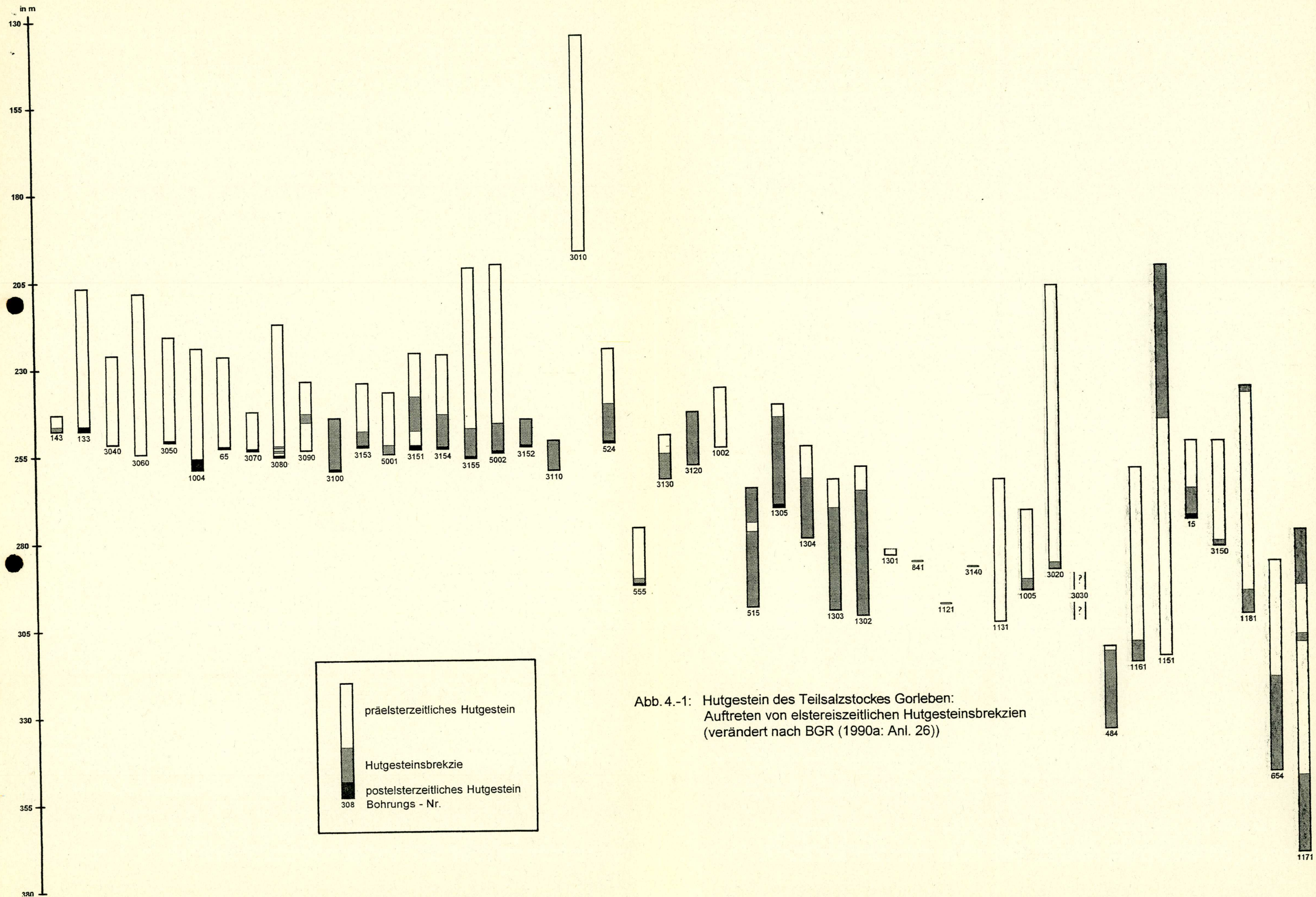
Das eigentliche Hutgestein setzt sich aus Gips in unterschiedlicher Ausbildung zusammen. Eine Besonderheit stellt die Hutgesteinsbrekzie dar. Sie kommt nach BGR (1990a) an der Basis des Hutgesteins in der Umgebung der Gorlebener Rinne vor und ist durch seitliche Einpressung elsterzeitlichen Materials entstanden. Die maximale seitliche Einpresstiefe beträgt mindestens einige 100 m, die maximale Mächtigkeit über 40 m (BGR 1990a: Anl. 27). Die Bohrung 143 könnte auf weitaus höhere Einpressweiten von der Gorlebener Rinne aus hindeuten. Unter Umständen waren aber auch lokal weitere Wegsamkeiten aus dem Hangenden vorhanden, über die örtlich Einpressungen möglich waren. Insgesamt ist das Hutgestein inhomogen aufgebaut und von Karsthohlräumen und Klüften durchsetzt, wie Spülungsverluste beim Abteufen von Bohrungen und Pumpversuche zeigten (s. 4.2.1.3).

Brekzien kommen jedoch nicht nur an der Basis des Hutgesteins vor: Weitere Brekzien sind in höheren Partien des Gipshutes lokal vorhanden (BGR 1990a: Anl. 26: Bohrungen 3090, 3151). Insgesamt ist davon auszugehen, daß in unterschiedlichen Niveaus der Gorlebener Rinne seitliche Einpressungen mit entsprechender Brekzienbildung erfolgten: Zum einen schwankt die Teufe des Salzspiegels (BGR 1990a: Anl. 34), zum anderen wurden wiederholt innerhalb einer Bohrung mehrere Brekzien erbohrt (Abb. 4.-1). In BGR (1990a) wird dies jedoch nicht weiter diskutiert, die vorhandenen Abbildungen in BGR (1990a) stellen den komplizierten Aufbau des Gipshutes nur bruchstückhaft und vereinfacht dar. Insgesamt ist von großen Kenntnislücken auszugehen. Für eine Spezialdarstellung der hydrologisch besonders bedeutsamen Hutgesteinsbrekzien in Form einer Verbreitungskarte reichen daher die vorhandenen Daten nicht aus.

Die Hutgesteinsbrekzien stellen vergleichsweise gute Grundwasserleiter dar (vgl. BGR 1990a: S. 319, zur Begriffsdefinition siehe 4.2.1.2), die außerhalb der Gorlebener Rinne gelegene Bereiche zumindest potentiell hydrologisch an die eigentliche Rinne anbinden. Jedoch nicht nur die Brekzien, sondern das Hutgestein insgesamt ist als Aquifer anzusehen (s. 4.2.1.3). Durch die elsterzeitlichen Einpressungen ist zumindest lokal mit einer Zerrüttung des Hutgesteins mit entsprechender Kluftbildung zu rechnen. Als Hinweis darauf können die unsystematisch aufgetretenen Spülungsverluste beim Abteufen einiger Salzspiegelbohrungen gewertet werden (BGR 1990a: Anl. 27).

Hutgesteinsbildung wurde auch unter dem Salzstocküberhang an der SE-Flanke des Teilsalzstocks Gorleben in der Bohrung Go 1005 nachgewiesen. Die Existenz von Hutgestein weist stets auf rezente oder ältere Ablaugung am Salzstock hin. In BGR (1990a) wird diese Hutgesteinsbildung zwar erwähnt, jedoch nicht näher diskutiert.

Besonders subrosionsgefährdet bzw. wasserwegsam sind Kalisalze und klüftige Anhydritlagen. Gerade im Bereich des Salzstocküberhangs ist mit einem wiederholten Ausstreichen dieser Gesteine an der Salzstockflanke zu rechnen (vgl. BGR 1990a: Anl. 35, 36, BFS 1990: Abb. 6). Das Nebengebirge bilden hier Gesteine der Unter- und Oberkreide, die wasserwegsam sind (s. 4.1.1.7 bis 4.1.1.9). In der Nähe der SE-Salzstockflanke wurden beim Abteufen der



Bohrung Go 1005 beim Durchteufen des Hauptanhydrits in einer Teufe von etwa 1.400 - 1.500 m Lösungen angetroffen (BGR 1990a: S. 71 u. Anl. 8). Somit handelt es sich hier, neben dem Salzstockdach, um einen weiteren kritischen Bereich des Salzstocks hinsichtlich der selektiven Subrosion (s. 4.1.3). Nach Untersuchungen von HERRMANN (1990) bestehen zumindestens gegenwärtig keine nachweisbaren Wegsamkeiten zwischen dem Nebengestein und den in den Tiefbohrungen (auch Tiefbohrung Go 1005) angetroffenen Lösungen.

4.1.1.2 Buntsandstein

Die Mächtigkeit des Unteren und Mittleren Buntsandstein beträgt insgesamt 600 bis 700 m (BGR 1990a). Der Untere Buntsandstein besteht vorwiegend aus Tonstein mit Schluff- und Feinsandsteineinlagerungen (BFS 1990, BGR 1990a). Ob Rogenstein, wie in Südwestmecklenburg (WIENHOLZ 1965), ebenfalls vorkommt, bleibt unklar. Über die Mächtigkeit werden widersprüchliche Angaben gemacht: Nach BGR (1990a) beträgt sie ca. 350 m, nach BFS (1990) jedoch nur 120 m. Die Erdgasbohrung Gorleben Z 1 von 1957 durchteufte auch den Buntsandstein (BGR 1990a: Abb. 18, Tab. 4). Inwieweit die Informationen aus dieser Bohrung in der Beschreibung des mesozoischen Nebengebirges in BFS (1990) und BGR (1990a) berücksichtigt wurden, bleibt unklar.

Der Mittlere Buntsandstein (Volpriehausen-, Detfurth-, Hardeggen-, Solling-Folge) setzt sich aus Tonstein, Schluffstein und Sandstein zusammen. Weiterhin sind Dolomitbänke eingeschaltet (BGR 1990a). Mächtige Sandsteineinschaltungen sind die Basissandsteine der Detfurth- und Solling-Folge (vgl. RÖHLING 1991, BGR 1990a). Es ist unbekannt, inwieweit diese Sandsteine als Grundwasserleiter von Bedeutung sind, da lediglich in der Bohrung Go 1004 ca. 30 m des obersten Teils der Sollingfolge (Tonstein mit Sandstein- und Dolomitbänken in gestörter Lagerung) erbohrt wurden. Es finden sich auch in BGR (1984a) keine Angaben, da dort der Buntsandstein als älteste mesozoische Schichteinheit nicht berücksichtigt wird.

Die Schichten des oberen Buntsandstein (Röt) sind normalerweise ca. 400 m mächtig (BGR 1990a). Sie dünnen jedoch an den Flanken des Salzstocks meist aus, insbesondere an den Flanken des mittleren Bereichs des Teilsalzstocks Gorleben fehlen sie normalerweise ganz. Der Obere Buntsandstein umfaßt das ca. 130 m mächtige Rötsalinar und 80 - 90 m Tonstein (BGR 1990a). Der Widerspruch zwischen den Mächtigkeitsangaben ist zwar augenfällig, welche der Angaben aber richtig ist (400 m oder 130 m plus 80 - 90 m), bleibt offen. In der Bohrung Go 1004 wurde lediglich gestörtes Rötsalinar, bestehend aus Steinsalz und Anhydrit, erbohrt (BGR 1990a). Als Grundwasserleiter haben diese Gesteine keine Bedeutung.

4.1.1.3 Muschelkalk

Der Untere Muschelkalk besteht aus Kalkstein mit dolomitischen Lagen. Der Mittlere Muschelkalk setzt sich aus Dolomit und Anhydrit mit Steinsalzeinschaltungen zusammen. Die Gesteine des obersten Mittleren Muschelkalk und des Oberen Muschelkalk fehlen in der unmittelbaren Umgebung des Teilsalzstocks Gorleben (BGR 1990a). Mächtigkeitsangaben werden in BGR (1990a) nicht gemacht, jedoch kann die Mächtigkeit der Schichten des Muschelkalk mit maximal etwa 300 m veranschlagt werden (WIENHOLZ 1965: S. 21, BGR 1984a: S. 7). In BGR (1991a) werden Röt und Muschelkalk zusammengefaßt. Danach beträgt ihre gemeinsame Mächtigkeit in der SE-Randsenke etwa 400 m, in der NW-Randsenke etwa 250 m.

Die Gesteine des Muschelkalk stellen gut durchlässige Grundwasserleiter dar und sie sind der wichtigste mesozoische Grundwasserleiter (BGR 1984a). Trotzdem wird von BGR (1984a) in einem stark vereinfachten Modell angenommen, daß nur unwesentliche Mengen an aus großer Entfernung herantransportiertem Tiefengrundwasser am Teilsalzstock Gorleben aufsteigen können. Jedoch bleiben verschiedene Faktoren in diesem Modell der tiefen Grundwasserbewegung unberücksichtigt, wie z.B. der Chemismus des Grundwassers, der Einfluß von Störungen oder von horizontalen Strömungskomponenten senkrecht zu den Profilebenen. Insgesamt handelt es sich um ein "relativ allgemeingültiges Prinzipmodell" (BGR 1984a: S. 3). Außerdem wäre der Einfluß der Flechtinger Scholle, der Scholle von Calvörde, der Hellberge bei Gardelegen und vor allem des ausstreichenden Muschelkalk am Salzstock Altmerleben nördlich von Kalbe zu untersuchen - Lokalitäten, die sich in wesentlich geringerer Entfernung zum Salzstock Gorleben-Rambow als der Elm befinden (s. 4.3.3).

4.1.1.4 Keuper

Die Mächtigkeit des Keupers ist stark halokinetisch beeinflusst und schwankt zwischen 0 m im Scheitelpunkt des zur Keuperzeit vorhandenen Salzkissens, den heutigen Salzstockflanken, und 1.000 m in den Randsenken der benachbarten Salzstöcke Dömitz und Aulosen BGR 1990a). Der Untere Keuper (Lettenkohlenkeuper) besteht aus einer Wechsellagerung von Tonstein, Schluff- bis Sandstein sowie Karbonat- und Kohlelagen. Der untere Teil des Mittleren Keuper (Gipskeuper) wird aus Ton- bis Tonmergelsteinen mit Gips- und Steinsalzlagen aufgebaut. Darüber folgen schluffig-sandige bis sandige Ablagerungen, die von Ton- und Tonmergelsteinen mit Gipslagen der Roten Wand überlagert werden. Im Oberen Keuper (Rhät) folgen Ton-Sandstein-Wechselfolgen, die nach oben zu zunehmend toniger werden (Beschreibung nach BGR 1990a: S. 172). Das Vorkommen von Schilfsandstein im Mittleren Keuper in vorwiegend sandiger Ausbildung ist anzunehmen (WIENHOLZ 1965), wird aber in BGR (1990a) nicht erwähnt.

Der Ausbiß der Keuper-Schichten ist in der SE-Randsenke meist 1 km oder mehr von der Salzstockflanke entfernt, in der NW-Randsenke fehlen Keuper-Sedimente fast völlig (BGR

1990a: Anl. 4, 5, 6; BGR 1991a: Anl. 4). In der SE-Randsenke werden sie von grundwasserleitenden Gesteinen des Malm überlagert.

Die Gesteine des Unteren Keuper werden in BGR (1984a) als "wechselnd - schwach durchlässig", die des Mittleren Keuper als "wechselnd - schwach durchlässig" und "undurchlässig" und die des Oberen Keuper als "gut durchlässig" eingestuft. Grundwasserleiter sind zum einen die Rhät-Sandsteine und, vermutlich, der Schilfsandstein. Die hydrogeologische Bedeutung des überregional vorhandenen Schilfsandstein und der Rhät-Sandsteine bleibt unklar.

4.1.1.5 Lias

Die Ausbisse des Lias befinden sich im SE ca. 1 - 2 km, im NW ca. 5 km vom Salzstock entfernt (BGR 1990a: S. 172, BGR 1991a). Allerdings ist die genaue Lage des Ausbisses an der SE-Flanke des Teilsalzstockes Gorleben unterhalb des Salzstocküberhangs, wie die gesamte Schichtfolge, in den Schnitten der Anlage 4 in BGR (1990a) teilweise als unsicher eingetragen. In vom Salzstock weiter entfernten Bereichen beträgt die Mächtigkeit bis ca. 500 m. Tonsteine dominieren, in die Sand- und Kalksteine eingeschaltet sind (BGR 1990a). Aus Südwestmecklenburg wird ebenfalls eine vorwiegend tonige Schichtfolge mit schluffigen und sandigen Einschaltungen beschrieben (WIENHOLZ 1965).

Die Gesteine des Lias werden als Grundwassernichtleiter angesehen (BGR 1984a). Die wenigen Sandsteineinschaltungen haben vermutlich als Grundwasserleiter keine Bedeutung.

4.1.1.6 Dogger

Der Ausbiß der Schichten des Dogger befindet sich noch etwas weiter vom Salzstock entfernt, als der der Lias-Schichten. In der NW-Randsenke beträgt die Distanz ca. 6 km (BGR 1990a: S. 174, Anl. 36; BGR 1991a). Die maximale Mächtigkeit beträgt etwa 650 m. Nach BGR (1990a) dominieren tonige Ablagerungen, in die Sandsteinlagen eingeschaltet sind. Allerdings sind aus dem Dogger auch mächtige Sandsteine bekannt. Der Dogger-Sandstein im Raum Karstädt - Wittenberge, d.h. nur etwa 25 km östlich, ist bis zu 230 m mächtig (MEINHOLD et al. 1961).

Die Gesteine des Dogger (im Gifhorner Trog) stellen Grundwassernichtleiter dar (BGR 1984a). Die hydrogeologische Bedeutung der oben erwähnten Sandsteine bleibt für den Raum Gorleben unklar.

4.1.1.7 Malm und Wealden (Berrias)

Im Verlauf des Malm und des Wealden sind Sedimente lediglich in den Randsenken des Salzstocks Gorleben-Rambow abgelagert worden. Während in der SE-Randsenke des Teilsalzstocks Gorleben die Schichten des Neben- und Deckgebirges unmittelbar bis an die Salzstockflanke heranreichen, fehlen entsprechende Ablagerungen in der NW-Randsenke (BGR 1990a: Anl. 36, BGR 1991a: Anl. 7). Die Schichtfolge des Malm und Wealden umfaßt ca. 150 m kalkige Sandsteine (BGR 1990a). In den Randsenken des Teilsalzstocks Rambow existiert ein vollständiges Malm-Profil: Im Oxford treten hier sandige Kalksteine, Kalksandsteine und Sandsteine (Heersumer Schichten) sowie der Korallenoolith auf. Im Kimmeridge kommen Anhydrit und Kalkstein sowie tonige, sandige und kalkige Sedimente vor (WIENHOLZ 1965). Aus Bohrungen aus der weiteren Umgebung von Gorleben sind sandige, teilweise sandig-kalkige Ablagerungen des Wealden in Mächtigkeiten bis einige Dekameter bekannt (SCHOTT 1967).

Die Gesteine werden in BGR (1984a) allgemein als Grundwasserleiter eingestuft. Weitere, detailliertere Angaben werden in den verfügbaren Unterlagen nicht gemacht.

4.1.1.8 Valangin bis Alb

In der Bohrung Go 1005 wurden Feinsandsteine und schluffige Tonsteine mit Kohlebröckchen der Unterkreide erbohrt (BGR 1990a). Eine genauere stratigraphische Zuordnung ist den Unterlagen nicht zu entnehmen, weitere Angaben zur Lithologie der Schichten von Valangin bis Apt fehlen. Jedoch sind aus Bohrungen in der weiteren Umgebung von Gorleben sandige, teilweise sandig-kalkige oder sandig-tonige Ablagerungen des Valangin bis Apt bekannt (SCHOTT 1967). Die Gesteine des Alb umfassen Ton- und Tonmergelsteine (BGR 1990a: S. 174, BFS 1990: S. 92).

Die Ablagerungen des Valangin bis Alb erreichen in den Randsenken wesentlich höhere Mächtigkeiten als außerhalb derselben. Dies gilt insbesondere für die SE-Randsenke, wo die Mächtigkeit nach SE schnell abnimmt (BGR 1990a). In der weiteren Umgebung von Gorleben sind Sedimente des Valangin bis Apt nicht lückenlos vorhanden (SCHOTT 1967). Die Ton- und Tonmergelsteine des Alb sind zwar in der weiteren Umgebung von Gorleben lückenlos verbreitet, sie erreichen aber außerhalb der Randsenken in Gebieten ohne halokinetische Bewegungen lediglich eine Mächtigkeit von <50 m (BGR 1990a: S. 174). Die maximale Mächtigkeit der Schichtfolge vom Valangin bis Alb beträgt in beiden Randsenken jeweils etwa 450 m (BGR 1991a: Anl. 23). Die Schichten reichen unmittelbar bis an die Salzstockflanken heran (BGR 1990a: Anl. 36, BGR 1991a: Anl. 8).

Die Gesteine werden als hydrologisch "wechselnd bis schwach durchlässig" angesehen (BGR 1984a). Eine zumindest lokale, merkliche Grundwasserführung ist wegen folgender Befunde anzunehmen: In der Bohrung Go 1005, die den Salzstocküberhang durchteuft, wurde an der Unterseite des Überhangs Hutgestein und Lösungen angetroffen. Das Nebengestein ließ sich

der Unterkreide zuordnen (BGR 1990a: Anl. 8). Die Existenz des Hutgesteins beweist, daß ungesättigtes Grundwasser vorhanden sein muß. Störungen (wie sie nachweislich vorhanden sind) könnten dabei zusätzlich Wasserwegsamkeiten darstellen. Die vorhandenen Kenntnisse (zumindest wie sie den verfügbaren Unterlagen zu entnehmen sind) ermöglichen jedoch keine fundierte Abschätzung der hydrogeologischen Bedeutung der Unterkreide-Ablagerungen.

4.1.1.9 Cenoman bis Maastricht

Die Oberkreide-Ablagerungen bestehen vorwiegend aus einer Kalkstein-Mergelkalkstein-Wechselfolge mit Tonsteineinschaltungen (BGR 1990a). Eine genauere stratigraphische Zuordnung wird in BFS (1990) und BGR (1990a) nicht vorgenommen, da offensichtlich die vorhandenen Kenntnisse dies nicht zulassen.

Die Mächtigkeit der Oberkreide beträgt nach BGR (1990a) in der NW-Randsenke maximal 700 m, jedoch sind in BGR (1991a) aus der Anlage 32 (Randsenkenmächtigkeit der Oberkreide) lediglich Mächtigkeiten bis ca. 500 m ablesbar. Dagegen erreicht die Mächtigkeit in der SE-Randsenke unmittelbar im Salzstockrandbereich mehr als 900 m (BGR 1991a: Anl. 32). Auf dem Salzstock selbst sind nur noch kleine Reste an Oberkreide-Ablagerungen vorhanden, die hier durchschnittlich 5 m mächtig sind (BGR 1991b). Der Abb. 4 in BGR (1984a) ist zu entnehmen, daß Ablagerungen des Campan und Maastricht zumindest in der südlichen Umgebung des Salzstocks fehlen. Etwa 10 km östlich des Salzstocks beißen die Schichten der Oberkreide (Campan) aus (BGR 1990a: S. 174).

Die Gesteine des Cenoman bis Santon werden in BGR (1984a) als hydrologisch "durchlässig" eingestuft. Wie BGR (1990a: Anl. 36) zu entnehmen ist, scheint ein hydraulischer Kontakt von Oberkreide-Schichten zum Hutgestein des Salzstocks vorhanden zu sein. Nähere Angaben dazu sind in den verfügbaren Unterlagen nicht enthalten.

4.1.2.10 Paläozän

Sedimente des Unteren Paläozäns sind nur aus der Bohrung GoHy 133 bekannt (BGR 1991b). Ansonsten sind die paläozänen Sedimente dem Oberen Paläozän zugehörig. Tonsteine dominieren, in die Feinsandsteinlagen eingeschaltet sind (BGR 1990a: Anl. 33). In BGR (1990a: S. 174) werden abweichend davon nur allgemein schluffige Sedimente erwähnt. Am Übergang zum Eozän treten weiterhin Tuffitlagen auf (BGR 1990a).

Offensichtlich weil eine Grenzziehung in den Bohrungen häufig nicht sicher möglich war, werden in der Anlage 25 in BGR (1990a) Paläozän und Unteres Eozän zusammengefaßt. Ihre gemeinsame Mächtigkeit beträgt bis über 300 m in der nördlichen und bis 200 m in der SE-Randsenke. Die Mächtigkeit des Oberen Paläozän beträgt auf dem Dach des Teilsalzstocks

Gorleben 0 bis etwa 80 m (BGR 1991b). Oberes Paläozän fehlt jedoch in den Darstellungen der Anlagen 11, 12 in BGR (1990a).

In BGR (1984a) werden die Schichten des Paläozän hydrologisch als "schlecht durchlässig, lagenweise mäßig durchlässig", in BGR (1990a: Anl. 33) dagegen als Grundwassernichtleiter eingestuft.

4.1.1.11 Eozän

In der Tertiärbohrung GoHy 994 in der südlichen Randsenke bei Gartow wurde das bisher vollständigste Profil des Eozän und Oligozän Nordwestdeutschlands erbohrt. Die Bohrung diente insbesondere auch für paläontologische Untersuchungen und erbrachte wichtige regionalgeologische Ergebnisse (BGR 1990a).

Die Ablagerungen des Eozän bestehen aus Schluffen und tonigen Schluffen mit sandigen Einschaltungen (BGR 1990a: S. 174). Angaben über die Gesamtmächtigkeit werden in BFS (1990) und BGR (1990a) nicht gemacht und sind auch aus den Kartendarstellungen nicht ablesbar. DUPHORN (1983: S. 24) gibt 140 - 180 m im halokinetischen Hebungskegel und >430 m in der NW-Randsenke an. Im Dach des Salzstocks beträgt sie maximal etwa 200 m (BGR 1991b).

Ablagerungen des Unteren Eozän sind über dem Teilsalzstock Gorleben lückenhaft und häufig nur in unvollständiger Schichtfolge vorhanden. Das Untere Eozän ist über dem Salzstock maximal etwa 80 m mächtig (BGR 1991b).

Nach BGR (1991a) sind Sedimente des Mittleren Eozän über dem größten Teil des Teilsalzstocks Gorleben nicht mehr vorhanden. Allerdings weicht die Darstellung in BGR (1991b: Karten und Profilschnitte) davon erheblich ab und zeigt, daß mitteleozäne Ablagerungen speziell im mittleren Abschnitt des Teilsalzstocks noch im Dachzentrum des Salzstocks erhalten blieben, die an der Gorlebener Rinne ausbeissen. Das Vorhandensein von Brüsselsand ist hier zu vermuten. Die 8 - 30 m mächtigen, teilweise verfestigten Sandablagerungen des "Brüsselsandstein" an der Basis des Mittleren Eozän stellen einen wichtigen Grundwasserleiter dar. Eine kartographische Darstellung der Verbreitung dieser Schichteinheit im Bereich des Salzstocks fehlt in den vorhandenen Unterlagen. Die Mächtigkeit des Mittleren Eozän beträgt etwa 75 m über dem südwestlichen Ende des Salzstocks Gorleben-Rambow und erreicht über 275 m in der NW-Randsenke.

Ablagerungen des Oberen Eozän sind über dem Teilsalzstock Gorleben in Mächtigkeiten von 0 bis 50 m vorhanden (BGR 1991b, BGR 1990a: Anl. 11). Allerdings fehlt ihre Darstellung in den Schnitten der Anlagen 4, 5 und 6 in BGR (1990a) und in BGR (1991a).

Das Untere Eozän und das Mittlere Eozän mit Ausnahme des Brüsselsands umfaßt hydrologisch "schlecht durchlässige, lagenweise mäßig durchlässige" Schichten (BGR 1984a). In BGR (1990a: Anl. 33) werden sie abweichend davon, ebenso die Schichten des Oberen Eozän, als Grundwassernichtleiter eingestuft. An der Basis des Unteren Eozän ist eine einige m mächtige schluffige Feinsandeinschaltung als "Basal-Sand"/ "Gartow-Sand" bekannt (BGR 1990a: Anl. 16, im Text allerdings nicht erwähnt). Die Verbreitung und hydrologische Bedeutung dieser Ablagerungen bleibt unklar. Der Brüsselsand wird in BGR (1984a) als hydrologisch "mäßig durchlässig" eingestuft. Er beißt am südlichen Durchbruch der Gorlebener Rinne durch den halokinetischen Hebungsgraben und über dem Salzstock an der Rinne aus, wodurch zwischen beiden ein direkter hydrologischer Kontakt besteht.

Aus den Bohrbeschreibungen ist erkenntlich, daß häufig eine genaue stratigraphische Einstufung und Gliederung der eozänen Sedimente nicht möglich war (z.B. PICKEL 1982: Teil 3: Bohrung GoHy 800). Die immer noch bestehenden Unsicherheiten in der stratigraphischen Einstufung sind vermutlich auch die entscheidende Ursache für die unterschiedlichen Darstellungen des Eozän in Karten und Profilen. Allerdings wird in BGR (1990a) der aktuelle Wissensstand nicht exakt dokumentiert (in Text, Karten und Profilen), und noch bestehende Unsicherheiten werden nicht klar benannt. Ältere Darstellungen enthält z.B. PICKEL (1982: Karten und Profilschnitte). Einige aktuellere Karten enthalten BGR (1991a) und BGR (1991b).

4.1.1.12 Oligozän

Das Latdorf (Unteres Oligozän) umfaßt schluffige Tone (BGR 1990a: Anl. 33), die hydrologisch als "schlecht durchlässig, lagenweise mäßig durchlässig" (BGR 1984a) bzw. als Grundwassernichtleiter (BGR 1990a: Anl. 33) eingestuft werden. Aus den Unterlagen geht jedoch nicht hervor, wo überall Latdorf-Sedimente erbohrt wurden. In den Profilschnitten in BGR (1990a) und BGR (1991b) fehlt das Latdorf, in BGR (1991a: Anl. 12) sind einzelne Vorkommen verzeichnet. Nach DUPHORN (1983) wurden Sedimente des Latdorf im halokinetischen Hebungsgraben des Salzstocks angetroffen.

Das Rupel (Mittleres Oligozän), mit Mächtigkeiten um 70 - 110 m (DUPHORN 1983), setzt sich aus vorwiegend aus Tonablagerungen zusammen. An der Basis ist ein mächtiger Sandhorizont vorhanden, der "Neuengammer Gassand". Seine Mächtigkeit im Dach des Salzstocks beträgt 0 bis >15 m (BGR 1991b). Über seine Verbreitung in den Randsenken finden sich in den verfügbaren Unterlagen keine Angaben. Nach BGR (1991a) schwankt die Gesamtmächtigkeit des Rupel zwischen 100 m über dem Salzstock (außerhalb der Gorlebener Rinne) und 200 m in der NW-Randsenke. Es ist daher anzunehmen, daß die Mächtigkeit des Neuengammer Gassandes in den Randsenken ebenfalls höher als auf dem Salzstock ist. Speziell im Bereich des Durchbruchs der Gorlebener Rinne durch den halokinetischen Hebungsgraben ist ein großflächiger, unmittelbarer Kontakt zu den quartären Sedimenten der Rinnenfüllung anzunehmen. Der Neuengammer Gassand wird in BGR (1984a) mit "mäßig durchlässig" bewertet.

Tone und Schluffe, nach oben zu feinsandig werdend, sind die dominierenden Sedimente des Unteren Chatt (Oberes Oligozän). Im Oberen Chatt herrschen Schluffe und Feinsande vor, in die einzelne Tonlagen eingeschaltet sind (BGR 1990a: Anl. 33). Das Chatt erreicht in der NW-Randsenke Mächtigkeiten bis etwa 110 m, in der SE-Randsenke sind sie etwas geringer (BGR 1991a), im halokinetischen Hebungsgraben erreichen sie bis ca. 30 m Mächtigkeit (DUPHORN 1983). Über dem Teilsalzstock Gorleben mit Ausnahme der halokinetischen Hebungszone sind Sedimente des Chatt nicht mehr vorhanden (siehe Profilschnitte in PICKEL 1982). Allerdings zeigt die Anlage 26 in BGR (1991a) im SW-Teil des Salzstocks über den Salzstock hinweg verlaufendes Chatt (mit Mächtigkeiten von 80 - 100 m), im Schnitt 213 der Anlage 6 in BGR (1990a) dagegen fehlt es hier wie über dem übrigen Salzstock (BGR 1990a: Anl. 4 - 6: Interessant wären in diesem Zusammenhang die in der Lageskizze verzeichneten Profilschnitte 214 und 216, die jedoch wie die Schnitte 215, 217 und 218 aus unerfindlichen Gründen nicht dargestellt werden).

Die Sedimente des Unteren Chatt (Eochatt) werden in BGR (1984a) als hydrologisch "schlecht durchlässig, lagenweise mäßig durchlässig", die des Oberen Chatt (Neochatt) als "mäßig durchlässig, lagenweise gut" eingestuft. In BGR (1990a: Anl. 33) werden die Schichten des Eochatt als Grundwasserstauer (Grundwassernichtleiter), die des Neochatt als Grundwasserstauer bis -hemmer (Grundwassergeringleiter) bezeichnet. In PICKEL (1982: 82) wurden die Schichten des Chatt mit Ausnahme des Asterigerinen-Horizontes generell noch als Grundwasserhalbleiter (Grundwassergeringleiter) eingestuft.

4.1.1.13 Miozän

Nur lokal beginnt die miozäne Schichtfolge mit den nur wenige Meter mächtigen Tonen des Vierland (Unteres Miozän). Meist folgen jedoch unmittelbar auf die oligozänen Ablagerungen die bis etwa 130 m mächtigen Braunkohlensande (DUPHORN 1983). Sie entsprechen stratigraphisch dem Unteren Miozän und dem unteren Teil des Mittleren Miozän (BFS 1990: Abb. 3). In BGR (1990a: Anl. 33) werden sie im Unterschied dazu komplett dem Unteren Miozän zugeordnet. Bei den Braunkohlensanden handelt es sich in der Regel um Mittel- bis Grobsande, in die im oberen Teil einzelne Braunkohlenflöze eingeschaltet sind. Nach PTB (1983) sind die Braunkohlenflöze bis zu 15 m mächtig. Darüber folgen nach BGR (1990a: Anl. 33) die mittelmiozänen (abweichend davon nach BFS 1990: Abb. 3 bis ins unterste Obermiozän reichenden), bis etwa 80 m mächtigen Braunkohlenschluffe (Schluff und Ton).

In PICKEL (1982) werden die Braunkohlensande in einer Mächtigkeitskarte und Profilschnitten dargestellt. Danach erreichen die Sande häufig Mächtigkeiten von über 100 m (PICKEL 1982: Anl. G/HG/7). In PSE (1985a) wird eine Mächtigkeit von 100 - 120 m angegeben. Die Mächtigkeit der Braunkohlensande schwankt stark, da sie in unterschiedlichem Maße im Quartär erodiert wurden. Über dem Salzstock und im Bereich der Gorlebener Rinne fehlen miozäne Ablagerungen und somit auch die Braunkohlensande ganz (PICKEL 1982: Anl. G/HG/7). Im Bereich des Durchbruchs der Gorlebener Rinne durch den halokinetischen Hebungsgraben be-

steht jedoch ein unmittelbarer Kontakt von Ablagerungen des Miozän zu den quartären Sedimenten der Rinnenfüllung. Dagegen ist eine differenzierte kartographische Darstellung des Grundwasserleiters "Braunkohlensande" weder in BGR (1990a) noch in BGR (1991a) enthalten. BGR (1990a) enthält lediglich eine Karte der Miozän-Basis und der Miozän-Gesamtmächtigkeit. Danach erreicht letztere in der NW-Randsenke über 250 m, in der SE-Randsenke sind es noch bis etwa 175 m. Diese Werte sind jedoch nur grobe Richtwerte, da nicht die Teufendifferenz von der Quartär- zur Miozänbasis, sondern fälschlicherweise von NN zur Miozänbasis dargestellt ist.

In BGR (1984a) werden die Braunkohlensande hydrologisch als "gut durchlässig, lagenweise mäßig bis schlecht durchlässig" eingestuft. Nach PICKEL (1982: S. 89) weist der obere Teil der Braunkohlensande eine wesentlich höhere Durchlässigkeit als der untere Teil auf. In BGR (1990a) ist für den Braunkohlensand ein k_f -Wert von $5 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-4}$ m/s angegeben, was einer "mittleren Durchlässigkeit" nach DIN 18 130 entspricht. Die in BGR (1990a) und BGR (1984a) angegebenen k_f -Werte stimmen allerdings nicht genau überein. Die Braunkohlensande stellen somit einen wichtigen Grundwasserleiter dar (vgl. PSE 1985a: S. 2-7). Der Braunkohlenschluff gilt als "schlecht durchlässig" (BGR 1984a) bzw. als Grundwassernichtleiter (PICKEL 1982: S. 88).

4.1.1.14 Präelster-Zeit (Ältestpleistozän)

Bei den Sedimenten der Menap-Kaltzeit handelt es sich vorwiegend um fein- bis mittelkörnige Sande mit wenigen Fein- bis Mittelkieslagen. Die Mächtigkeit beträgt maximal 55 m (BGR 1990a). Schluffe, Mudde und Torf bilden die Ablagerungen des Bavel-Komplexes. Die Wechselfolge des Cromer-Komplexes setzt sich aus Schluff/Mudde und Sand zusammen und ist bis "mehrere Dekameter" mächtig (BFS 1990). Die Ablagerungen sind im Bereich einer lokalen, präelsterzeitlichen Subrosionsenke von über 3 km Länge und bis zu 1,5 km Breite über dem südwestlichen Teil des Salzstocks erhalten geblieben. Mit Ausnahme von zwei kleinen bavelzeitlichen Einsturzgebieten über dem Gipshut - verursacht durch lokal rasche Abtragung am Salzspiegel (s. u.) - wurden die Sedimente in einem sehr flachen, dem Steinhuder Meer vergleichbaren See abgelagert (MÜLLER 1986). Eine detaillierte Darstellung der präelsterzeitlichen Ablagerungen in Karten und Profilschnitten liegt nicht vor, eine grobe Darstellung ihrer Verbreitung enthält BGR (1990a: Abb. 46, Anl. 27).

Im Bereich um die Bohrungen GoHy 940/944 im südlichen Zentralbereich des Teilsalzstocks Gorleben (BGR 1990a: Abb. 46) liegt der Gipshut in einer Teufe von 237 m u. NN und es fehlen menapzeitliche Sedimente (hier fand in einem lokalen relativen Hochgebiet keine menapzeitliche Sedimentation statt). Die darauf folgenden Ablagerungen des Bavel- und Cromer-Komplexes, die außerdem Hinweise auf Versalzung des Seewassers enthalten, erreichen dagegen eine Mächtigkeit von 98 m. Es wird angenommen, daß es sich um die Füllung eines bavel- bis cromerzeitlichen Erdfalls handelt (BGR 1990a). Es ist davon auszugehen, daß lokal extrem hohe Subrosionsraten zu diesem Erdfall mit hoher Mächtigkeit der Füllung führten. Als

Versturzsedimente eines prälsterzeitlichen Erdfalls wird auch das Vorkommen von Bavel-Cromer-Sedimenten aus der Bohrung GoHy 1171 im Nordteil des Teilsalzstocks gedeutet, das mit starker prälsterzeitlicher Subrosion im Bereich des Kaliflözes Staßfurt im Zusammenhang steht (BGR 1990a).

Über die hydraulische Wirksamkeit speziell der prälsterzeitlichen Ablagerungen wird in den vorliegenden Unterlagen keine Aussage gemacht (z.B. BFS 1990, BGR 1990a). BGR (1984a) gibt nur sehr allgemein für die quartären Sedimente eine "gute Durchlässigkeit, mäßig bis schlecht durchlässige Schichten vorhanden" an. In PSE (1985a) wird für Mittel- bis Grobsande des unteren quartären Aquifers ein k_f -Wert von $k_f = 5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ angegeben. Aufgrund ihrer Gesteinsausbildung ist eine gute Durchlässigkeit der Prälster-Sedimente anzunehmen.

4.1.1.15 Elster-Eiszeit

Die Ablagerungen der Elster-Eiszeit umfassen Moränenablagerungen, Beckensedimente und Schmelzwasserablagerungen. Während der Elster-Eiszeit wurden in hohem Maße ältere Sedimente (Miozän) aufgearbeitet und es entstanden Rinnen. Die Elster-Sedimente finden sich vorwiegend in den beiden Randsenken und in der Gorlebener und Gartower Rinne. Die Gesamtmächtigkeit der Elster-Ablagerungen kann bis zu 250 m betragen (DUPHORN 1983).

Die Schmelzwasserablagerungen bestehen aus Sanden und Kiesen mit schlechter Korngrößen-sortierung. Der Geschiebemergel stellt ein Gemisch von Kornfraktionen von Ton bis zu m^3 -großen Geschieben dar, wobei aber die Schluff-Sand-Fraktion in wechselnden Anteilen dominiert. Die Beckensedimente setzen sich aus tonigen Schluffen oder schluffigen Tonen mit einzelnen Sandeinschaltungen, die einige Meter mächtig werden können, zusammen (BGR 1990a).

Die Mächtigkeit der Vorschütt-Schmelzwasserablagerungen, in die sich Lagen oder Linsen von Beckensedimenten einschalten können, beträgt nach BGR (1990a) lokal bis wenige Dekameter, nach DUPHORN (1983) jedoch bis zu 160 m. Im Zuge des Eisvorstoßes wurden allerdings oft die Vorschütt-sedimente in unterschiedlichem Maße wieder erodiert. Während des Eisvorstoßes kam Moränenmaterial zur Ablagerung. Eine Ansprache elsterzeitlichen Moränenmaterials als eindeutige Grundmoräne gelingt jedoch nach BGR (1990a) nicht. Obwohl eine vergleichbare Aussage in DUPHORN (1983) nicht enthalten ist, fehlt eine nähere Erläuterung dieser Annahme. Moränenablagerungen können in mehreren Horizonten vorkommen. In BGR (1990a: S. 182) heißt es hierzu: "Mehrere Eisvorstöße können aber beim jetzigen Kenntnisstand hiermit nicht belegt werden....In den meisten Fällen, besonders bei mächtigen Geschiebemergellagen (mehrere Dekameter), handelt es sich wohl um Material der Abschmelzmoräne eines Hauptvorstoßes oder um elsterzeitlich umgelagertes Moränenmaterial (Abrutschmassen u.ä.), das beim Abschmelzen der Gletscher....entstand". Eine nähere Erläuterung dazu ist den vorliegenden Unterlagen nicht zu entnehmen, ob eventuell subrosions- oder glazitektonisch bedingte Schichtverstellungen denkbar sind (vgl. DUPHORN 1984b), wird nicht diskutiert. Eine

kartographische Darstellung der Verbreitung des Geschiebemergels findet sich nur in DUPHORN (1983), jedoch nicht mehr in neueren Berichten (z.B. BGR 1990a).

Die Entstehung der Rinnen fällt in die Abschmelzphase des Elster-Eises, geschah aber wohl noch unter vollständiger Eisbedeckung (BGR 1990a). Die Rinnen wurden vorwiegend durch subglaziale Schmelzwässer tief in ältere Sedimente eingeschnitten. Die Gorlebener Rinne greift über dem Zentralteil des Salzstocks mit bis etwa 300 m unter NN (BGR 1990a: Anl. 28), entsprechend etwa 325 m unter GOK, örtlich besonders tief in die liegenden Sedimente ein. In BFS (1990) werden als maximale Teufe 290 m u. NN, in BGR (1990a) auf S. 205 jedoch der Wert 275 m u. NN angegeben. Am Südrand des Salzstocks durchbricht die Gorlebener Rinne den halokinetischen Hebungskranz bis in eine Teufe von etwa 250 m, im NE (im Bereich der Elbe) bis in eine Teufe von etwa 200 m unter NN (BGR 1990a: Anl. 29, 31; BGR 1991a). Die Rinne ist über viele km nach Süden verfolgbar. Bei ihrem südlichen Durchbruch durch den halokinetischen Hebungskranz greift die Rinne auch in wasserleitende tertiäre Schichten ein. Durch die Anlage der Gorlebener Rinne lagern elsterzeitliche Schmelzwassersande großflächig unmittelbar auf dem Hutgestein. Nach DUPHORN (1983, 1984b) beträgt diese Fläche 7,5 km², nach BGR (1990a: S. 205) "nur" 4,5 km². Lokal wurde der Gipshut auf einer Fläche "von wenigen 100 m²" ganz abgetragen (BGR 1990a: S. 205).

Die ältere Füllung besteht in der Gorlebener Rinne aus glazifluviatilen, sandigen bis kiesigen Ablagerungen und Schollen von Geschiebemergel, in der Gartower Rinne ist das Rinnentiefe von Geschiebemergel erfüllt und im nördlichen Randsenkentief treten sowohl Geschiebemergel als auch glazifluviatile Sande auf. Im Süden der Gorlebener Rinne treten bis 85 m mächtige obere Schmelzwassersande und -schluffe auf (DUPHORN 1983: S. 32). Der obere Teil der Rinnenfüllungen besteht aus den Ablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes. Seine Mächtigkeit beträgt bis 110 m (BGR 1990a). DUPHORN (1983: Anl. 48) gibt Mächtigkeiten von <10 bis 120 m an, wobei die größten Mächtigkeiten über dem Salzstockzentrum erreicht werden. In die feinkörnigen Beckenablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes sind neben seltenen Schollen von Geschiebemergel einzelne sandige und sogar kiesige Lagen eingeschaltet. Manche, bis mehrere Meter mächtige Lagen sind über mehrere Kilometer in Längsrichtung der Rinnen verfolgbar (BGR 1990a). Es ist anzunehmen, daß diese sandigen bis kiesigen Einschaltungen lokal einen hydraulischen Kontakt zu an der Gorlebener Rinne ausbeißenden sandigen tertiären Sedimenten haben. Sie können daher durchaus hydrologisch eine gewisse Bedeutung besitzen. Allerdings sind den verfügbaren Unterlagen genauere Angaben dazu nicht zu entnehmen.

Die Genese der Hutgesteinsbrekzie steht im Zusammenhang mit der Bildung der Gorlebener Rinne. Dabei wurde elsterzeitliches Material durch Schmelzwasser seitlich vorwiegend entlang des Salzspiegels unter das Hutgestein eingepreßt (s. 4.1.1.1). Die Hutgesteinsbrekzien stellen einen vergleichsweise guten Grundwasserleiter dar (vgl. BGR 1990a: S. 319), der außerhalb der Gorlebener Rinne gelegene Bereiche zumindest potentiell hydrologisch an die eigentliche Rinne anbinden.

In neueren Berichten werden die Ablagerungen der Elster-Eiszeit kartographisch lediglich in einer Elster-Basis-Karte dargestellt, nicht jedoch in Profilschnitten und sonstigen Karten. In älteren Berichten (PICKEL 1982, DUPHORN 1983) sind sowohl Profilschnitte als auch Karten enthalten. Es existieren jedoch Unterschiede in der Interpretation. Mit den in der Zwischenzeit erweiterten Kenntnissen sollte eine verbesserte Darstellung der elsterzeitlichen Ablagerungen möglich sein.

Der elstereiszeitliche Geschiebemergel kann als Grundwassergeringleiter gelten. Dagegen sind die glazifluviatilen Sande wichtige Grundwasserleiter. Die sandigen Einschaltungen im Lauenburger-Ton-Komplex spielen vermutlich zumindest lokal als Grundwasserleiter ebenfalls eine gewisse Rolle. Insgesamt stellt aber der Lauenburger-Ton-Komplex, mit der gemachten Einschränkung, einen Grundwassernichtleiter dar (vgl. DUPHORN 1983: S. 30 ff.). In BGR (1990a: S. 312 ff.) finden sich nur sehr allgemeine Angaben zu hydrologischen Durchlässigkeiten quartärer Sedimente. In PSE (1985a) werden für Mittel- bis Grobsande des unteren quartären Aquifers, der im wesentlichen den elsterzeitlichen Schmelzwassersanden entspricht, Durchlässigkeiten von $K_f = 5 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ angegeben ("durchlässig" nach DIN 18 130).

4.1.1.16 Holstein-Warmzeit

Die Holstein-Sedimente umfassen Mudde (schluffig-tonig), Niedermoortorf und Sand (vorwiegend Fein- bis Mittelsand). Die Mudden haben eine Mächtigkeit von 5 - 10 m. Sandeinschaltungen sind vorhanden, wobei einzelne Sandpakete eine Mächtigkeit von bis zu einigen Metern erreichen. Zudem tritt lokal eine 5 - 10 m mächtige Sandschicht an der Holstein-Basis auf. Torf kommt als einige Zentimeter bis einige Dezimeter mächtige Einschaltungen in der Mudde vor (BGR 1990a: S. 184). Die Mudden sind überwiegend limnisch, lediglich in der mittleren Holstein-Warmzeit (Abschnitte VIII und XII) treten auch marine Sedimente auf (DUPHORN 1983, BGR 1990a).

Ein Überblick über die Holstein-Sedimentation ist aus BFS (1990) und insbesondere aus BGR (1990a) nicht zu gewinnen. Es fehlen detaillierte Karten- und Profildarstellungen, aus denen die Verbreitung und Mächtigkeit der Ablagerungen ablesbar ist. Nach DUPHORN (1983: S. 32, Anl. 17) und BGR (1990a: Abb. 46) sind Holstein-Ablagerungen fast nur auf die Gorlebener Rinne beschränkt. Ihre Mächtigkeit soll maximal 27 m betragen. Möglicherweise waren Holstein-Sedimente "ursprünglich weiter verbreitet und sind dann saalezeitlich auf den Hochlagen außerhalb der Rinne erodiert worden" (BGR 1990a: S. 205). Inwieweit halokinetische Vorgänge die limnische bis marine Sedimentation während der Holstein-Warmzeit beeinflusst haben, wird in BGR (1990a) nicht diskutiert. Es ist denkbar, daß Halokinese insbesondere die marinen Transgressionen in ihrem zeitlichen Verlauf und ihrer Intensität beeinflusst hat.

Angaben über die hydrologische Durchlässigkeit der Holstein-Ablagerungen fehlen in BGR (1990a). In PICKEL (1982) werden die Sedimente zusammenfassend als Grundwassernichtleiter eingestuft. Dies kann nicht uneingeschränkt gelten. Zumindest für mächtigere Sandeinschaltungen.

schaltungen ist eine gute Durchlässigkeit wahrscheinlich und es kann deshalb wenigstens lokal eine Bedeutung als Grundwasserleiter angenommen werden.

4.1.1.17 Saale-Eiszeit

Die saale-eiszeitlichen Ablagerungen umfassen sandige Schmelzwassersedimente, tonig-schluffige Beckensedimente und Geschiebemergel. Die Ablagerungen aller drei Eisvorstöße der Saale-Eiszeit sind im Raum Gorleben vorhanden. Allerdings sind kiesfreie Sedimente (Ton bis Sand) nur aufgrund ihrer Lage zu anderen Schichten stratigraphisch einstuftbar (BGR 1990a).

Die Schmelzwasserablagerungen umfassen sandige und sandig-kiesige Sedimente. Nur bei ungestörten Lagerungsverhältnissen lassen sich die Ablagerungen einzelnen Stadien der Saale-Eiszeit zuordnen. Eine Besonderheit ist eine glazifluviale/fluviale Mischfazies (BGR 1990a: S. 186). Die Beckenschluffe unterscheiden sich nach BGR (1990a) nicht grundsätzlich von denen der Elster-Eiszeit. Weitere Angaben sind in BGR (1990a) dazu nicht enthalten. Die Geschiebemergel, ein Korngrößengemisch von Ton bis Kies, bestehen vorwiegend aus Schluff bis Sand in wechselnden Anteilen. Zusätzlich können in mächtigen Geschiebemergeln Dezimeter bis einige Meter mächtige stark sandige Lagen oder Linsen vorkommen, die teilweise "röhrenähnliche Gebilde" (BGR 1990a) darstellen. Nähere Erläuterungen fehlen in diesem Bericht, es ist aber anzunehmen, daß diese stark sandigen Partien hydrologisch gut durchlässig sind.

Eine stratigraphische Einstufung der Geschiebemergel zu einzelnen Stadien ist nur unter Berücksichtigung ihrer Lage zu anderen Schichten eindeutigen Alters möglich (BGR 1990a). Nach BGR (1990a: S. 187) sind echte Grundmoränen der Saale-Eiszeit nicht nachgewiesen. Meist soll es sich um Abschmelzmoränen oder um Abrutschmassen o.ä. handeln. Diese Aussage ist anzuzweifeln und steht im Gegensatz zu den Karten- und Profildarstellungen in PICKEL 1982) und DUPHORN (1983). Aus den Profilschnitten dieser Berichte geht für große Teile des Untersuchungsgebietes die Existenz von klar definierten Moränen hervor. Lokal, vorwiegend im Bereich der Gorlebener Rinne und im Bereich des Hühbeck, sind saalezeitliche Ablagerungen glazitektonisch verschuppt (vgl. DUPHORN 1983). Weiterhin beeinflusste Subrosion lokal in unterschiedlichem Maße die Lagerungsverhältnisse. Eine eingehende Diskussion der Befunde und Interpretationen erfolgt in BGR (1990a) nicht. Auf Seite 206 wird lediglich angemerkt: "Die Lagerungsverhältnisse sind in Anbetracht der verhältnismäßig geringen Aufschlußdichte nur näherungsweise klärbar".

Die Verbreitung der saale-eiszeitlichen Ablagerungen geht aus den Karten- und Profildarstellungen in PICKEL (1982) und DUPHORN (1983) hervor. Allerdings sind gewisse Unterschiede in den Interpretationen von PICKEL und DUPHORN vorhanden. Schließlich stimmt die BGR nicht generell mit der quartärgeologischen Gesamtinterpretation von DUPHORN übereinstimmt

(BGR 1983). Trotzdem fehlen in BGR (1990a) entsprechende Darstellungen mit eigener Interpretation und Berücksichtigung neuerer Kenntnisse.

Saale-eiszeitliche Schmelzwassersande sind im gesamten Raum Gorleben verbreitet. Der Drenthe-1-Geschiebemergel tritt rinnenartig über der NW- und der SE-Randsenke, am südwestlichen Salzstockrand, in einem kleinen fleckenhaften Areal über dem Teilsalzstock Gorleben und weiteren punktuellen Vorkommen auf (DUPHORN 1983: Anl. 18). Die größte Mächtigkeit von 104 m wird südwestlich des Salzstocks erreicht (DUPHORN 1983: S. 35). Der Drenthe-2-Geschiebemergel ist überwiegend lückenhaft über dem Teilsalzstock und südöstlich davon verbreitet (DUPHORN 1983: Anl. 19). Der Warthe-Geschiebemergel ist lückenhaft im gesamten Gebiet von Gorleben und auch über dem Salzstock vorhanden (DUPHORN 1983: Anl. 20). Als einziger Geschiebemergel ist er von Eistektonik unbeeinflusst. Seine Mächtigkeit beträgt meist 2 - 30 m. Die Beckenschluffe liegen weitverbreitet zwischen den Geschiebemergeln des Drenthe-2- und Warthe-Stadials, in der Gartower Rinne auch über dem des Warthe-Stadials und nur vereinzelt zwischen den Drenthe-Geschiebemergeln (DUPHORN 1983: S. 37).

Einige saaleeiszeitlich angelegte Rinnen greifen tief in ältere Ablagerungen, insbesondere der Elster-Eiszeit, ein und stellen so zusätzliche hydrologische Verbindungen zwischen verschiedenen Grundwasserleitern her. So ist auch eine Zerschneidung des grundwasserstauenden Lauenburger-Ton-Komplexes möglich (DUPHORN 1983: S. 115, Anl. 41: Rinne südwestlich des Hühbeck). Zum Problem saaleeiszeitlicher Rinnen heißt es dagegen nur kurz in BGR (1990a: S. 206): "Zu einer intensiven subglazialen Rinnenbildung wie in der Elsterkaltzeit ist es in der Saale-Kaltzeit nicht gekommen."

Die Geschiebemergel sind als Grundwassergeringleiter, die Beckensedimente als Nichtleiter und die Schmelzwassersande als Grundwasserleiter anzusehen (DUPHORN 1983). In BFS (1990) und BGR (1990a) finden sich dazu keine Angaben. In PSE (1985a) werden für Mittel- bis Grobsande des oberen quartären Aquifers Durchlässigkeiten von $K_f \frac{3}{4} 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ angegeben ("stark durchlässig" nach DIN 18 130).

4.1.1.18 Eem-Warmzeit

Muddige bis torfige Ablagerungen der Eem-Warmzeit sind nach DUPHORN (1983: S. 37) nur vereinzelt in Teufen zwischen 20 bis 40 m erbohrt worden, so z.B. in der Bohrung GoHy 620. Die maximale Mächtigkeit der Eem-Ablagerungen beträgt 6 m (DUPHORN 1983). Nach BGR (1990a) wurden Eem-Sedimente lediglich in einer einzigen nicht näher benannten Bohrung nachgewiesen.

Aus hydrogeologischer Sicht spielen die Sedimente möglicherweise keine Rolle, obwohl sie sicherlich grundwasserleitende Ablagerungen darstellen. In BGR (1990a) sind dazu wie auch zur Verbreitung keine Angaben vorhanden.

4.1.1.19 Weichsel-Eiszeit

Die Sedimente der Weichsel-Eiszeit (deren Eis das Gebiet von Gorleben nicht mehr erreichte, vgl. WOLDSTEDT & DUPHORN 1974) umfassen im wesentlichen fluviatile Sande und kiesige Sande (Niederterrassen-Komplex) sowie Flugsande in Flugsanddecken und Dünen (DUPHORN 1983, BGR 1990a).

Niederterrassensedimente (vorwiegend Fein- bis Mittelsand) sind im gesamten Untersuchungsgebiet im Raum Gorleben flächendeckend vorhanden. Die einzige Ausnahme bildet der Hühbeck (BGR 1990a). DUPHORN (1983) unterscheidet einen unteren und einen oberen Niederterrassenkörper, die in BGR (1990a) in Anlehnung an SCHRÖDER (1988) als ältere und jüngere Niederterrasse bezeichnet werden. Der untere Niederterrassenkörper ist nicht flächenhaft vorhanden (DUPHORN 1983: Anl. 23 und Profilschnitte). Die Mächtigkeit des gesamten Niederterrassenkörpers beträgt maximal etwa 40 m. In BGR (1990a) finden sich dazu keine weitergehenden Angaben.

In die Niederterrasse sind im Bereich der Elbaue drei bis zu 6 m tiefe Rinnen eingeschnitten, die heute durch den Verlauf des nördlichen und südlichen Schaugrabens und die Seege markiert werden. Eine weitere Rinne existiert im Bereich der NW-Randsenke und erstreckt sich in NE-SW-Richtung. Weiterhin quert eine ca. 1 km breite Sandrinne den Südwestteil des Teilsalzstocks Gorleben in SSE-NNW-Richtung (Achse Trebel - Gedelitz). Die Rinnen sind wahrscheinlich alle im Spätglazial angelegt worden (DUPHORN 1983: S. 43-49.). In BGR (1990a) wird auf die Rinnen und ihre hydrogeologische Bedeutung nicht weiter eingegangen.

Außerhalb der heutigen Elbeniederung bilden Flugdecksande, meist mit Mächtigkeiten zwischen einigen Dezimetern bis 2 m, verbreitet den Abschluß der Schichtfolge. Lokal treten Dünen auf, in denen der Flugsand Mächtigkeiten bis 10 m erreicht (BGR 1990a). Die meisten Dünen wurden jedoch nach DUPHORN (1983) im Holozän aufgeweht. Sie werden allerdings in BGR (1990a) offensichtlich überwiegend der Spätweichsel-Eiszeit zugeordnet, ohne das diese unterschiedliche Interpretation in BGR (1990a) diskutiert wird. Durch die Auswehung des Flugsandes kam es zur Bildung zahlreicher Ausblasungswannen, wie z.B. die Hohlform des "Weißen Moors" über dem Zentrum des Teilsalzstocks Gorleben (DUPHORN 1983).

Spätweichselzeitlich sind geringmächtige Beckensedimente und Talsande, deren Ablagerung bereits zum Holozän überleitete (BGR 1990a). Sie treten in Talungen, Seen und deren Überschwemmungsgebieten auf.

Die Sande der Niederterrasse und die Flugdecksande sind als Grundwasserleiter anzusehen. Angaben über ihre Durchlässigkeit fehlen jedoch in den Berichten, speziell in BGR (1990a). Der Geestbereich der Gartower Tannen gilt als Grundwasserneubildungsgebiet (s. 4.3.2.1).

4.1.1.20 Holozän

Nachdem sich die Elbe im Spätglazial der Weichsel-Eiszeit im Bereich der heutigen Elbniederung wieder um einige Meter eingetieft hatte (SCHRÖDER 1988), wurde hier im Holozän Mudde und Torf, Hochflutlehm, Auelehm sowie Flußsand abgelagert. Ihre Mächtigkeit kann mehrere Meter erreichen (DUPHORN 1983, BGR 1990a).

Im Holozän wurden die spätweichselzeitlich angelegten Erosionsrinnen (s. 4.1.1.19) zunehmend verfüllt. Restliche Hohlformen werden von Seen eingenommen, wie zum Beispiel der Laascher See oder der Schwarze See (DUPHORN 1983). In den Seen kam es im Holozän zur Ablagerung von Torf-, Mudde- und Sandlagen (BGR 1990a). Diese Seen sind also nicht das Ergebnis quartärer Subrosion mit entsprechender Absenkung des Deckgebirges (DUPHORN 1983). Für den Rudower und Rambower See über der Scheitelzone des Teilsalzstocks Rambow gilt dies so ohne weiteres nicht. Der Teilsalzstock Rambow wird von MEINHOLD & REINHARDT (1967) als Beispiel für rezente Salzbewegungen angeführt. Die Seen würden somit ihre Entstehung einer rezenten Subrosion im Untergrund verdanken (CEPEK 1968). Für den Teilsalzstock Gorleben ist für das Quartär zeitweilig und lokal ebenfalls starke Ablaugung nachgewiesen, so während des Altquartärs (BGR 1990a) und der Saale-Eiszeit (BGR 1990a; nach DUPHORN 1983 begann die Subrosion bereits während der Elster-Eiszeit). Rezente Ablaugung ist für den benachbarten Salzstock Gr.-Heide-Siemen anzunehmen (DUPHORN 1983: S. 49). Gleiches gilt für den Salzstock Arendsee mit dem gleichnamigen See darüber (CEPEK 1968, WAGENBRETH & STEINER 1982: S. 36). Die Prozesse, die am Teilsalzstock Rambow in jüngster geologischer Zeit zur Entstehung der erwähnten Seen führten, sind vermutlich auch für den Teilsalzstock Gorleben von Bedeutung, da beide Salzstockteile eine gemeinsame Struktur bilden. Eine Diskussion dieser Fragestellung findet sich in BGR (1990a) nicht.

DUPHORN (1983: S. 50) schlug vor, an Hand einer Kartierung der Rinnenfüllung der Trebel-Gedelitzer Rinne (s. 4.1.1.19) zu prüfen, ob eventuell ein Aufbeulen des Salzstocks (Diapirismus) in diesem Bereich in jüngster geologischer Zeit erfolgte. Eine solche Kartierung wäre mit relativ geringem Aufwand möglich, wurde aber nach unserer Kenntnis bisher nicht durchgeführt. In BGR (1990a) werden die Rinnen als solche nicht einmal erwähnt. Statt dessen heißt es in BGR (1990a: S. 208), daß im Rahmen der Untersuchungen von DUPHORN keine Hinweise für Zusammenhänge zwischen oberflächennahen geologischen Abläufen und solchen im Salzstock (Diapirismus oder Subrosion) während des Holozän gefunden wurden. Die oben angeführten Problempunkte der holozänen Entwicklung des Teilsalzstocks Rambow werden nicht erwähnt.

Holozänen Alters sind weitere Flugsandbildungen und zahlreiche Dünen (in BGR 1990a nur im Kap. 3.2.4.2 erwähnt). Die Flugsanddecken sind 0,5 - 1,5 m mächtig, wobei der quartäre Anteil nicht genau bestimmbar ist. Für einen großen Teil der Dünen ist ein holozänes Alter zweifelsfrei belegt (DUPHORN 1983: S. 50 ff.). In Dünen erreicht der Flugsand Mächtigkeiten bis über 10 m. Eine mehrphasige Dünenbildung ist nachgewiesen.

4.1.2 Aufbau und Lagerungsverhältnisse der Schichtfolge des Neben- und Deckgebirges des Salzstocks Gorleben-Rambow

Die bisherigen Ergebnisse der Standorterkundung Gorleben werden im zusammenfassenden Bericht (Stand: 1.1.1990) der BGR dargestellt (BGR 1990a). Die Kenntnisse über das Neben- und Deckgebirge der Salzstruktur Gorleben-Rambow sind von vornherein unvollständig, da detaillierte Untersuchungen nördlich der Elbe auf dem Gebiet von Mecklenburg-Vorpommern fehlen. Diesen Mangel, der in der Vergangenheit aus politischen Gründen nicht behebbar war, hat auch die BGR als solchen erkannt. Sie schlägt daher die Einbeziehung dieser Gebiete in die Standorterkundung Gorleben vor (BGR 1990d).

Das Neben- und Deckgebirge umfaßt Sedimente vom Buntsandstein bis zum Holozän. Die einzelnen Einheiten werden in Kap. 4.1.1 beschrieben, und es wird dort auf ihre Verbreitung im Neben- und Deckgebirge bereits kurz eingegangen. Im folgenden sollen die Lagerungsverhältnisse im Bereich des Salzstocks Gorleben-Rambow betrachtet werden. Da für den Teilsalzstock Rambow die vorhandenen Kenntnisse nur sehr gering sind, beschränken sich die meisten Aussagen notgedrungen auf den Teilsalzstock Gorleben.

Der Salzstock Gorleben-Rambow sitzt der Eichsfeld-Altmark-Südwestmecklenburg-Schwelle auf, bei der es sich um eine weitgespannte Aufwölbung des präsalinen Untergrundes handelt (REINHARDT 1967, PLEIN 1978). Größere bruchtektonische Störungen im präsalinen Untergrund sind in der unmittelbaren Umgebung von Gorleben nicht vorhanden, jedoch existiert eine Störung im präsalinen Sockel unter dem Salzstock Gr. Heide-Siemen (JARITZ 1980: S. 524, BGR 1990a: Abb. 33). Die Salzstruktur Gorleben-Rambow ist etwa 30 km lang. Die maximale Breite beträgt nur wenige km, wobei der Salzstockteil Rambow schmäler als der Gorlebener Salzstockteil ist. Unter der Elbe befindet sich mit ca. 1 km Breite die schmalste Stelle des Salzstocks. Hier sinkt auch das Salzstockdach bis auf über 400 m unter GOK ab (DUPHORN 1983, BGR 1990a).

Die Umrisse der Salzstruktur Gorleben sind zwar annähernd bekannt, jedoch lassen sich bis jetzt die Lage und Ausbildung der Flanken des Salzstocks mittels geophysikalischer Untersuchungen (Seismik, Gravimetrie) nicht mit absoluter Genauigkeit bestimmen (BGR 1990a). Folgerichtig sind die Umrisse in einigen Profilschnitten (z.B. BGR 1990a: Anl. 4, 5, 6) als unsicher eingetragen, in den meisten anderen Darstellungen unrichtigerweise jedoch nicht. Unsicherheiten existieren auch in Bezug auf den Aufbau des Nebengebirges in unmittelbarer Nähe der Salzstockflanken. Es ist deshalb durchaus möglich, daß salzstocknahe Störungen im Nebengebirge bisher nicht erkannt wurden. Die Tiefbohrung Go 1004 zeigt, daß das Nebengebirge stark gestört sein kann.

Zu beiden Seiten des Salzstocks existieren ausgeprägte Randsenken. Die Lagerungsverhältnisse wurden im Bereich des Teilsalzstocks Gorleben mit geophysikalischen Methoden eingehend untersucht und können mit obiger Einschränkung als weitgehend geklärt angenommen werden. Für die Gebiete nördlich der Elbe im Bereich des Teilsalzstocks Rambow wurde der

geologische Bau in den Randsenken vorwiegend durch Extrapolation und durch Literaturangaben hilfsweise abgeschätzt. Detaillierte geophysikalische Untersuchungen können jedoch dadurch nicht ersetzt werden, weshalb auch die BGR inzwischen eingehendere Untersuchungen in diesem Gebiet als notwendig erachtet (BGR 1990d). Eine Extrapolation wurde außerdem nur bei einigen ausgewählten Schichtgliedern des Mesozoikums und Tertiärs mit vergleichsweise einfachen Lagerungsverhältnissen vorgenommen (PICKEL 1982, BGR 1991a).

Aus der näheren und weiteren Umgebung des Teilsalzstocks Gorleben sind eine ganze Anzahl Störungen in der Post-Zechstein-Schichtfolge bekannt. Am SW-Ende der Gorlebener Salzstruktur existieren mehrere Abschiebungen. Die größte dieser Störungen reicht vom Zechstein-Salz bis in Schichten des Tertiär (BGR 1990a: Abb. 49, 55). Weitere große Störungssysteme sind aus dem Gebiet nordöstlich des Salzstocks Gr. Heide-Siemen, des Salzkissens Drawehn und des Salzstocks Wustrow bekannt (BGR 1990a: Abb. 49). Einige wenige Störungen im mesozoischen Nebengebirge der Randsenken des Teilsalzstocks Gorleben zeigen außerdem die Anlagen 4 bis 6 in BGR (1990a). Nicht näher erläutert werden in BGR (1990a: S. 201) die Vorkommen von Störungen "mit deutlichen Versatzbeträgen" auf der nordwestlichen Salzstockschulter (d.h. dem halokinetischen Ringwall), dem mittleren Teil der südöstlichen Salzstockschulter und im Bereich der beiden Schachtvorbohrungen. Die Abb. 5 in APPEL (1982) zeigt die Lage einer Störung quer zum Streichen des Salzstocks im Bereich der Gorlebener Rinne mit einem Versatzbetrag von ca. 70 m. Unklar bleibt auch, inwieweit Störungen im unmittelbaren Flankenbereich des Salzstocks, der mit geophysikalischen Untersuchungen nur ungenau zu erfassen ist, noch vorhanden, aber unerkannt sind. Zweifellos kann davon ausgegangen werden, daß gerade in diesem salzstocknahen Bereich zahlreiche Störungen unterschiedlicher Größe vorhanden sind (vgl. Bohrung 1004 in BGR 1990a: Anl. 20).

Der halokinetische Hebungs Kranz ("Ringwall", s. Abb. 4.-16) sitzt ringwallartig den randlichen Bereichen des Salzstockdaches auf und besteht vorwiegend aus Ton- und Schluffschichten des Tertiär, die hier durch den Salzaufstieg kranzartig nach oben gebogen sind. Stellenweise reicht der Ringwall bis <70 m unter GOK (< 50 m unter NN, siehe Abb. 100 in BGR 1990a), wie z.B. in der Bohrung GoHy 140, in der die Quartärbasis bei 66 m unter GOK erbohrt wurde. In einigen anderen Abschnitten, vorwiegend im Bereich der Ortschaften Gorleben und Brünkendorf sowie des Hühbeck, liegt der Rand des Ringwalls mit stellenweise über 150 m unter GOK (Bohrung GoHy 80: 169 m unter GOK, entsprechend ca. 150 m unter NN) wesentlich tiefer (Abb. 4.-16). Im Bereich des Teilsalzstocks Rambow reicht der halokinetische Hebungs Kranz aus tertiären Schichten wesentlich näher an die Erdoberfläche heran, wo er sich als wallartige morphologische Erhebung sogar bis an die Erdoberfläche durchprägt (HURTIG 1965, REINHARDT 1967).

Innerhalb des halokinetischen Ringwalls werden große Areale des Hutgesteins durch tonig-schluffige Ablagerungen des Alttertiär bedeckt, "die z.T. eine gestörte Lagerung aufweisen" (BGR 1990a: S. 310). Diese tertiäre Bedeckung ist insbesondere im SW-Teil des Teilsalzstocks Gorleben vorhanden. Die Mächtigkeit dieser tertiären Sedimente ist allerdings gering und beträgt im Durchschnitt wenige Dekameter (BGR 1990a). Die tonigen Sedimente konnten eine großflächige, präelsterzeitliche Subrosion nicht verhindern (s. 4.1.1.14 u. 4.1.3). Darüber

lagern vorwiegend Sande der Prälster- und der Elster-Eiszeit. Sie werden, allerdings lückenhaft, von elster- und saalezeitlichem Geschiebemergel und Beckenschluff überdeckt. Im Hangenden folgen erneut Sande, die der Saale- und Weichsel-Eiszeit zuzuordnen sind (Profilschnitte in PICKEL 1982 und DUPHORN 1983).

Durch die Anlage der Gorlebener Rinne wurde der Ringwall des Teilsalzstocks Gorleben an dessen Südrand und der nördlichen Schmalseite zerschnitten. Am Südrand des Salzstocks greift die Rinne bis in eine Teufe von etwa 250 m unter NN (etwa 275 m unter GOK) in den Ringwall ein, im N wurde der Ringwall bis in eine Teufe von etwa 200 m unter NN (etwa 220 m unter GOK) erodiert (BGR 1990a: Anl. 14, 29, 31; BGR 1991a). Außerdem wurden bei der Anlage der Rinne großflächig die tertiärzeitliche Auflagerung auf dem Dach des Salzstocks und Teile des Gipshutes abgetragen. Lokal lagern quartäre Sedimente unmittelbar dem Salzgestein auf (s. 4.1.1.15).

Die tiefste quartäre Füllung der Gorlebener Rinne besteht aus mächtigen glazifluviatilen Sanden und untergeordnet aus Schollen von Geschiebemergel der Elster-Eiszeit. Der obere Teil der Rinnenfüllung besteht vorwiegend aus den mächtigen Ablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes. Die Abdeckung ist allerdings nicht lückenlos (Profilschnitte in PICKEL 1982, DUPHORN 1983, s. auch 4.2.2.1) auch wenn dies durch den Profilschnitt der Anlage 39 in BGR (1990a) "optisch" durch die gewählte Schnittlage suggeriert wird. Darüber lagern lokal Holstein-Ablagerungen. Im Hangenden folgen teilweise glazitektonisch verschuppte glazifluviatile Sande und Geschiebemergel der Saale-Eiszeit und darüber ungestörte Niederterrassensedimente der Weichsel-Eiszeit (DUPHORN 1983).

Das quartäre Deckgebirge über dem Teilsalzstock Gorleben ist kompliziert aufgebaut. In BGR (1990a: S. 205f.) heißt es: Die verschiedenen Vereisungsphasen mit sich wiederholenden geologischen Prozessen, glazitektonischen Lagerungsveränderungen liegender Schichten und lokaler Subrosion über dem Salzstock "haben zu sehr komplizierten Lagerungsverhältnissen der drenthezeitlichen, holsteinzeitlichen und obersten elsterzeitlichen Schichtenfolge geführt. Die Lagerungsverhältnisse sind in Anbetracht der verhältnismäßig geringen Aufschlußdichte nur näherungsweise klärbar". Nach DUPHORN (1984b) beträgt der maximale Tiefgang der saalezeitlichen Stauchtektonik ca. 150 m. Besonders kompliziert ist der Bau der Stauchmoräne des Hühbeck (DUPHORN 1983). An Hand der Holstein-Ablagerungen läßt sich, soweit Glazitektonik auszuschließen ist, das Ausmaß der post-holsteinzeitlichen Schichtverstellung und -absenkung durch Subrosion im Untergrund rekonstruieren.

DUPHORN (1983) nahm die Existenz eines Scheitelgrabens über dem Zentralteil des Salzstocks an. DUPHORN (1984b) akzeptierte die damalige Auffassung der BGR, daß nach dem damaligen Kenntnisstand nicht vom Konzept eines großen, einheitlichen Scheitelgrabens ausgegangen werden kann, betonte aber das Vorhandensein zahlreicher Störungen über dem Salzstock. Ein Scheitelgraben über dem Dach des Salzstocks existiert laut BGR (1990a: S. 200 f.) nicht. Schichtausfälle im Tertiär und Schichtverstellungen sollen "auf Hebung und Subrosion zurückgehen, die nicht gleichmäßig im gesamten Salzstockbereich, sondern in Teilgebieten zu verschiedenen Zeiten mit wechselnder Intensität abliefen". Die Schichten des Ter-

tiär sollen weitgehend bruchlos auf die Beanspruchung reagiert haben. Weiter heißt es in BGR (1990a: S. 201): "Gräben entstehen meist in relativ mächtigen Deckschichten, die eine Abdichtung der Salzstockoberfläche bewirken. Infolge fehlender Subrosion kommt es beim Salzaufstieg zu einer Aufwölbung des Salzstockdaches und damit zu einer beträchtlichen Zerrbeanspruchung der Deckschichten, die zur Ausbildung von Scheitelgräben führt. Bei der hochliegenden Salzstockoberfläche der Struktur Gorleben gestattete die Subrosion im Tertiär nur eine geringe Aufwölbung des Deckgebirges. Damit war die Voraussetzung für die Bildung eines Scheitelgrabens, nämlich das Auftreten von Zerrbeanspruchung aufgrund von Aufwölbung hier wahrscheinlich nicht gegeben". Die Existenz der präglazialzeitlich angelegten Subrosionsenke auf dem Dach des Teilsalzstocks Gorleben und das Vorhandensein von Störungen wird allerdings auch von der BGR nicht bestritten. Eine ausführliche Diskussion mit entsprechenden Profildarstellungen fehlt in BGR (1990a).

4.1.3 Hydrogeologischer Aufbau des Neben- und Deckgebirges

Im Rahmen der Charakterisierung der Schichtfolge des Neben- und Deckgebirges im Kap. 4.1.1 wurden hydrogeologisch relevante Einheiten benannt. Nach heutigem Kenntnisstand ist unklar, inwieweit die entsprechenden Grundwasserleiter des Nebengebirges (s. 4.1.2 u. 4.1.3) entwickelt sind und welche Bedeutung sie für die hydrogeologischen bzw. hydraulischen Verhältnisse haben. Im folgenden sollen zuerst die hydrogeologisch relevanten Einheiten (Grundwasserleiter), darüber hinaus eindeutige Grundwassernichtleiter sowie ergänzend tertiäre und quartäre Grundwassergeringleiter noch einmal zusammenfassend aufgeführt werden. Die Aufzählung erfolgt dabei jeweils vom Liegenden zum Hangenden:

Grundwasserleiter:

- Hutzone: Hutgestein des Salzstocks
- Sandsteinbänke des Buntsandstein
- Kalkstein des Muschelkalk
- Sandsteine des Keuper: Schilfsandstein, Rhät-Sandstein
- Sandstein des Lias
- Sandstein des Dogger
- Sandstein des Malm und Wealden
- Sandstein des Valangin bis Apt
- Kalkstein-Mergelkalkstein des Cenoman bis Santon
- Gartow-Sand des Unteren Eozän
- Brüsselsand des Mittleren Eozän
- Neuengammer Gassand des Mittleren Oligozän
- Braunkohlensand des Unteren bis unterstes Mittleres Miozän
- Sand der Prälster-Zeit
- Sand der Elster-Eiszeit

- Sandeinschaltungen in Sedimente der Holstein-Warmzeit
- Sand der Saale-Eiszeit
- Sand der Weichsel-Eiszeit
- Sand des Holozän

Als eindeutige **Grundwassernichtleiter** sind die folgenden Einheiten zu nennen:

- Ton- und Schluffstein sowie das Rötsalinar des Buntsandstein
- Ton- und Schluffstein, Ton- und Tonmergelstein des Keuper
- Tonstein des Lias
- Tonstein des Dogger
- Schluff und toniger Schluff des Eozän
- schluffiger Ton des Unteren Oligozän
- Ton des Mittleren Oligozän
- Braunkohlenschluff des Miozän
- Lauenburger Ton der Elster-Eiszeit
- Schluff-Mudde der Holstein-Warmzeit
- Beckenablagerungen der Saale-Eiszeit

Als **Grundwassergeringleiter** des Tertiär und Quartär können gelten:

- tonige, teilweise sandige Sedimente des Paläozän
- tonig-schluffig-sandige Sedimente des Oberen Oligozän
- Geschiebemergel der Elster-Eiszeit
- Geschiebemergel der Saale-Eiszeit

Im folgenden soll der hydrogeologische Bau des Neben- und Deckgebirges einschließlich der Hutzone des Salzstocks betrachtet werden. Die Aussagen beschränken sich auf den Teilsalzstock Gorleben.

Das Hutgestein ist von Klüften und Karsthohlräumen durchsetzt und bildet einen Kluft- und Karstwasserleiter (s. 4.1.1.1 u. 4.2.1.3). Die elstereiszeitlichen Hutgesteinsbrekzien sind dabei besonders durchlässig und stellen mit einer Durchlässigkeit von $K_f = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s vergleichsweise gute Grundwasserleiter dar (vgl. BGR 1990a: S. 319, zur Begriffsdefinition siehe 4.2.1.2). Durch die elsterzeitlichen Einpressungen ist außerdem zumindest lokal mit einer Zerrüttung des Hutgesteins (Kluftbildung) zu rechnen. Als ein Hinweis darauf können die unsystematisch aufgetretenen Spülungsverluste beim Abteufen einiger Salzspiegelbohrungen gewertet werden (BGR 1990a: Anl. 27). Das Hutgestein ist in seiner Gesamtheit als Aquifer anzusehen (s. 4.2.1.3). Die Brekzien binden zumindest potentiell außerhalb der Gorlebener Rinne gelegene Bereiche hydrologisch an die eigentliche Rinne an. Weiterhin ist eine zusätzli-

che hydraulische Verbindung von Deckschichten mit dem "Umweg" über Hutgesteinsbrekzien möglich (z.B. innerhalb der Gorlebener Rinne).

Durch die Anlage der Gorlebener Rinne wurde das Hutgestein großflächig teilweise oder lokal auch ganz abgetragen, so das hier grundwasserführende jüngere Deckschichten geringmächtigem Hutgestein oder unmittelbar dem Salzgestein auflagern. Gerade im Bereich der Gorlebener Rinne wurde vorausseilende Subrosion des Kaliflözes Staßfurt im Salzstock nachgewiesen (s. 4.1.1.1).

Die den Salzstock seitlich begleitenden Randsenken enthalten die ältesten (abgesehen vom Hutgestein) potentiellen oder nachgewiesenen Grundwasserleiter. Die hydrogeologische Bedeutung einiger mesozoischer Schichtglieder bleibt offen. Die Gesteine des Muschelkalk stellen gut durchlässige Grundwasserleiter dar und sie sind der wichtigste mesozoische Grundwasserleiter. Ihre hydrogeologische Bedeutung für den Ferntransport von Tiefengrundwasser ist bis jetzt nicht hinreichend geklärt (s. 4.1.1.3 u. 4.3.3). Die meisten Schichten der Randsenken-Schichtfolge reichen unmittelbar bis an die Flanken des Salzstocks heran. Dagegen beißen die Schichten des Keuper in der SE-Randsenke (in der NW-Senke fehlen sie fast völlig) meist etwa 1 km von der Salzstockflanke entfernt aus. Sie werden jedoch diskordant von Schichten des Malm überlagert, wodurch möglicherweise eine indirekte hydraulische Verbindung zur Salzstockflanke besteht.

Einige dieser potentiellen oder nachgewiesenen Grundwasserleiter stehen vermutlich an der Salzstockflanke mit dem dort austreichenden, besonders subrosionsgefährdeten Kaliflöz Staßfurt bzw. dem potentiell durchlässigen Hauptanhydrit in Verbindung. Dies gilt besonders für den Bereich des Salzstocküberhangs auf der SE-Seite des Teilsalzstocks Gorleben, wo Oberkreide-Schichten das Nebengebirge bilden (BGR 1990a: Anl. 36, BFS 1990: Abb. 6).

Aus der näheren und weiteren Umgebung des Teilsalzstocks Gorleben sind eine ganze Anzahl Störungen bekannt (s. 4.1.2). Am SW-Ende der Gorlebener Salzstruktur, wo mehrere Abschiebungen existieren, ist eine positive Anomalie der Temperaturverteilung vorhanden. Sie weist auf aufsteigendes Tiefengrundwasser hin (s. 4.3.2.5). Die existierenden großen Störungssysteme in der weiteren Umgebung des Salzstocks (s. 4.3.2.5) können als Zuflußkanäle für tiefere Grundwasserstockwerke dienen. Größere Störungen im unmittelbaren Flankenbereich des Salzstocks (der mit geophysikalischen Untersuchungen nur ungenau zu erfassen war) und in den Randsenken stellen potentielle hydraulische Verbindungen zwischen Grundwasserleitern unterschiedlicher Niveaus bzw. Zuflußstellen für Grundwasser aus dem höheren Deckgebirge dar. Unklar bleibt, inwieweit Störungen im Flankenbereich noch vorhanden, aber unerkannt sind. Die Existenz von Hutgestein unter dem Salzstocküberhang in großer Tiefe (Bohrung Go 1005) zeigt, daß hier Ablaugung stattgefunden hat oder immer noch stattfindet (BGR 1990a: Anl. 8). Die Ablaugungsraten sind allerdings vermutlich gering. Nicht diskutiert wird in BGR (1990a) die Herkunft der Lösungen, die in der Bohrung Go 1005 beim Durchteufen des Hauptanhydrits etwa in einer Teufe von 1400 - 1500 m angetroffen wurden (s. 4.1.1.1).

Den wichtigsten Grundwasserleiter der Randsenken stellen die miozänen Braunkohlensande dar. Sie werden von quartären Sanden überlagert und bilden mit diesen ein zusammenhängendes, mächtiges Aquifersystem. Lokal sind die einzelnen grundwasserführenden Schichten durch Grundwassergeringleiter oder Grundwassernichtleiter (miozäne Tone, Schluffe, Geschiebemergel) getrennt (PICKEL 1982, PSE 1985a).

Der halokinetische Ringwall des Salzstocks hemmt die Grundwasserbewegung in tieferen Grundwasserstockwerken über den Salzstock hinweg. Stellenweise reicht der Ringwall bis <70 m unter GOK (< 50 m unter NN, s. 4.1.2). In einigen anderen Abschnitten, vorwiegend im Bereich der Ortschaften Gorleben und Brünkendorf sowie des Hühbeck, liegt der Rand des Ringwalls mit stellenweise über 150 m unter GOK (deutlich >100 m unter NN) aber wesentlich tiefer (s. Abb. 4.-16).

Der SW-Teil des Salzstocks, d.h. der westlich der Gorlebener Rinne gelegene Bereich innerhalb des Ringwalls, bildet ein eigenes hydraulisches System (BGR 1990a). Unmittelbar auf dem Hutgestein lagern hier bis 50 m mächtige tonige Sedimente des Tertiär (PTB 1983). Sie konnten eine großflächige, präelsterzeitliche Subrosion nicht verhindern. Nach PTB (1983) existiert in den tertiären Schichten bis 15 m oberhalb des Hutgesteins ein Bereich, in dem die Schichten "intensiv von Klüften, Kleinstörungen und Harnischen durchsetzt sind". Hier sind Wasserwegsamkeiten zu vermuten. Über den tertiären Tonen folgen Sande der Prä-Elster-Zeit und der Elster-Eiszeit, die ein unteres Grundwasserstockwerk bilden. Geschiebemergel und Beckenschluffe bilden darüber einen, allerdings lückenhaften, wasserstauenden Horizont (Profilschnitte in PICKEL 1982 und DUPHORN 1983, BGR 1990a: S. 310). Die darüber lagernden Sande bilden ein oberes Grundwasserstockwerk. Zwischen beiden Stockwerken sind also offensichtlich hydraulische Verbindungen vorhanden (in der Anlage 39 in BGR 1990a ist, unverständlicherweise, die stratigraphische Einstufung der einzelnen hydrogeologischen Einheiten nicht enthalten). Im unteren Grundwasserstockwerk "wird das Grundwasser größtenteils durch den Ringwall wie in einer Schüssel gehalten und ist mineralisiert" (BGR 1990a: S. 310), d.h. es werden offensichtlich verminderte Grundwasserbewegungen angenommen. Allerdings sind zumindest lokal überdurchschnittliche postelsterzeitliche Subrosionsraten nachgewiesen (BGR 1990a: Anl. 26, 27), was möglicherweise auch auf stärkere rezente Ablaugung hindeutet. Schließlich ist die "Schüssel" auch nicht völlig geschlossen wie es die Darstellung in der Anlage 39 in BGR (1990a) suggeriert, sondern besitzt eine Verbindung zur Gorlebener Rinne (vgl. BGR 1991b). Ein Nebenast der Gorlebener Rinne nördlich der Hutgesteins-erhebung des "Steilen Zahns" stellt diese Verbindung her.

Eine weitere hydrologische Verbindung aus der "Schüssel" heraus durch den Ringwall hindurch könnte der Neuengammer Gassand darstellen, da dieser an der Innenseite des Ringwalls ausbeißt (BGR 1991b: Profilschnitte). Potentiell könnte auch über das Hutgestein ein hydraulischer Kontakt vom unteren Grundwasserstockwerk zu Grundwasserleitern in der Gorlebener Rinne bestehen. Da das Hutgestein in diesem Bereich häufig eine Hutgesteinsbrekzie enthält und es beim Abteufen von Salzspiegelbohrungen wiederholt zu großen Spülungsverlusten im Hutgestein kam (BGR 1990a: Anl. 27), ist mit einer guten Durchlässigkeit zu rechnen. Die präelsterzeitliche Subrosionsenke über dem SW-Teil des Salzstocks deutet darauf

hin, daß hier in der Vergangenheit trotz einer geringmächtigen, tonigen Bedeckung hohe Subrosionsraten möglich waren. Es bleibt offen und wird in BGR (1990a) nicht diskutiert, inwieweit sich die damaligen Verhältnisse von den heutigen unterscheiden und ob damals eine stärkere Ablaugung als heute möglich war.

Die Gorlebener Rinne zerschneidet den halokinetischen Ringwall des Teilsalzstocks Gorleben an dessen Südseite und im Norden. Am Südrand des Salzstocks greift die Rinne bis in eine Tiefe von etwa 250 m unter NN (etwa 275 m unter GOK) in den Ringwall ein, im Norden wurde der Ringwall bis in eine Tiefe von etwa 200 m unter NN (etwa 220 m unter GOK) erodiert (s. 4.1.2). Durch die Anlage der Gorlebener Rinne entstand eine zwar kanalisierte, jedoch in diesem Bereich ungehinderte hydraulische Verbindung über den Zentralteil des Teilsalzstocks Gorleben hinweg. Im Bereich des Durchbruchs der Gorlebener Rinne durch den halokinetischen Ringwall ist mit großflächigen hydraulischen Kontakten zwischen tertiären und tiefen quartären Grundwasserleitern zu rechnen. Tertiäre Grundwasserleiter sind der Brüsselsand, der Neuengammer Gassand und der Braunkohlensand. Im Bereich nordöstlich von Gorleben ist der halokinetische Ringwall besonders niedrig und tiefliegend (s. 4.1.2). Hier sind hydraulische Kontakte vom unteren quartären Grundwasserstockwerk der Gorlebener Rinne (elsterzeitliche Sande) über den Ringwall hinweg zu miozänen Braunkohlensanden der NW-Randsenke anzunehmen (PICKEL 1982: Profilschnitt D-D').

In der Rinne selbst existieren mehrere Grundwasserstockwerke. Mächtige elsterzeitliche Sande bilden ein unteres quartäres Grundwasserstockwerk. Die darüber folgende Überdeckung durch den Grundwassernichtleiter des Lauenburger-Ton-Komplexes ist nicht lückenlos. Darüber folgen weitere Grundwasserleiter -geringleiter und -nichtleiter. Mehrfache vertikale Wechsel von Grundwasserleitern und -nichtleitern sowie auch laterale Wechsel sind typisch. Dies führt dazu, daß die Grundwasserleiter lokal miteinander verbunden sind (Profilschnitte in PICKEL 1982, DUPHORN 1983, BGR 1990a: Anl. 39; s. auch 4.2.1.2).

Allen beschriebenen Teilbereichen (Randsenken, Ringwall, Gorlebener Rinne, SW-Senke innerhalb des Ringwalls) gemeinsam ist die Überlagerung durch den sandig-kiesigen Aquifer der Elbe-Niederterrasse. Dieser oberste Aquifer ist ungespannt, mit Ausnahme einiger Geestauftragungen (z.B. Hühbeck) flächenhaft im Untersuchungsgebiet verbreitet, meist 10 - 20 m mächtig und steht mit den tieferliegenden Aquifern in hydraulischem Kontakt (PSE 1985a).

In PICKEL (1982) sind Arbeitskarten und Profilschnitte enthalten, die die Grundwasserstockwerke des Tertiär und Quartär nach dem damaligen Kenntnisstand darstellen. Die Profilschnitte wurden in PTB (1983) und PSE (1985a) übernommen. In späteren Berichten der BGR fehlen entsprechende und gegebenenfalls verbesserte Kartendarstellungen. BGR (1990a: Anl. 39) enthält lediglich zwei vereinfachte hydrogeologische Profilschnitte, in denen auch erläuternde stratigraphische Bezeichnungen fehlen.

4.2 Randbedingungen der Grundwasserbewegung

Um Richtung und Geschwindigkeit von Grundwasser bestimmen zu können, müssen der geologische Bau des Deck- und Nebengebirges (s. 4.1.2) sowie die (hydro-)geologischen und hydraulischen Verhältnisse bekannt sein. In Kapitel 4.2.1 werden die hydraulischen Verhältnisse über und neben dem Teilsalzstock Gorleben beschrieben, und in Kapitel 4.2.2 die sich daraus ergebenden hydraulischen Eigenschaften nach den vorhandenen Unterlagen vorläufig bewertet. Die einzelnen Grundwasserleiter, -geringleiter und -nichtleiter werden in Kap. 4.1.3 beschrieben.

4.2.1 Das hydraulische System im Bereich des Teilsalzstocks Gorleben

4.2.1.1 Grundwassermengenbilanz

In der Umgebung des Teilsalzstocks Gorleben bilden die grundwasserfernen Teile der Geest Versickerungsgebiete, die wesentlich zur Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet beitragen. Diese Bereiche sind als morphologische Hochgebiete erkennbar. Größtes Neubildungsgebiet ist das Hochgebiet "Gartower Tannen", das von der südlichen Randsenke bis nahe an die Ortschaft Gorleben reicht (BROSE 1991: Abb. 3). Das von Flugsand und Dünen bedeckte Niederterrassengebiet erreicht Höhen bis zu 31 m ü.NN und die Grundwasseroberfläche bis zu etwa 23 m ü.NN. Der Hühbeck am Elbe-Knick über dem Salzstock mit seinen eistektonisch gestauchten quartärzeitlichen Ablagerungen stellt ein kleineres Neubildungsgebiet dar mit Höhen bis zu 70 m ü.NN. Im Nordwesten ragt noch der südliche Bereich des Langendorfer Geestrückens als Grundwasserneubildungsfläche in das Untersuchungsgebiet.

Die durch eine hohe Evapotranspiration gekennzeichneten Exfiltrationsgebiete (negative Grundwasserneubildung) sind im Nordwesten - Südwesten (im Bereich der Vorfluter Lucie-Kanal, Dannenberger Landgraben und Jeetzel) und im Norden (Seege-Niederung bis 15 m ü.NN und Elbeniederung bis Löcknitz) des Untersuchungsgebietes bei der bodenkundlichen Kartierung ausgewiesen worden (BGR 1990 a: S. 342). Die Grundwasserstände in den Niederungen liegen zwischen 13 m ü.NN und 16 m ü.NN.

Die Grundwasserneubildungsraten in den Hochgebieten schwanken zwischen 80 und 180 mm/a und in den Niederungen zwischen 60 und 80 mm/a (BGR 1981). Die positive Grundwasserneubildung wird insgesamt auf 17,2 Mill. m³/a, die negative Grundwasserneubildung auf 1,1 Mill. m³/a beziffert (BGR 1990 a: S.346).

Neben der Evapotranspiration bildet der Grundwasserabfluß über die Vorfluter einen weiteren noch bedeutsamen Negativposten in der Grundwasser-Mengenbilanz. Der Abfluß wird durch Abflußmeßstellen im Untersuchungsgebiet aufgezeichnet (BGR 1990 a: Anl. 2). Die gemessenen

senen Abflußmengen weichen z.T. erheblich von den berechneten Modellergebnissen ab (BGR 1987: Tab. 2).

Die gesamte Abflußmenge ist in den verfügbaren Unterlagen nicht angegeben, nur die Ergebnisse eines Teils der Abflußmeßstellen ist angeführt. Nach eigenen Berechnungen ergeben sich daraus eine Grundwasserabflußmenge von etwa 14 Mill. m³/a (BGR 1987: Tab. 2) plus etwa 1 Mill m³/a, die in das Vorflutsystem der Löcknitz abfließen.

Durch das Wasserwerk Hühbeck bei Vietze werden jährlich 0,44 Mill. m³/a Grundwasser gefördert. Der restliche Wasserbedarf wird durch Privatbrunnen gedeckt (BFS 1990: Abb.2). Die Gesamtmenge der Wasserentnahmen im Untersuchungsgebiet wird nicht beziffert. Eine zukünftige Zunahme des Wasserbedarfs wird als wahrscheinlich angenommen.

Das gesamte Untersuchungsgebiet entspricht etwa der Größe des Modellgebietes bei der numerischen Modellierung (BGR 1990 a: Abb. 100). Insgesamt ist eine Bilanzierung aufgrund der vorhandenen Unterlagen nicht möglich, da nur lückenhafte Einzelergebnisse vorliegen. In der Größenordnung dürfte aber die aus den Modellergebnissen berechnete Grundwasser-Mengenbilanz (BGR 1987: Tab. 3) mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Unklar bleibt dabei der Zu- und Abstrom des tieferen Grundwassers im Deckgebirge über dem Salzstock und im Nebengestein.

Der Grundwassergleichenplan (BGR 1990: Abb. 114) des Untersuchungsgebietes erfaßt das Gefälle und die Strömungsrichtung des oberflächennahen Grundwassers. Tieferes und tiefes Grundwasser in gespannten oder halbgespannten Leitern besitzt In- und Exfiltrationsgebiete, die mit dem regionalen Einzugsbereich des oberen ungespannten Leiters nicht übereinstimmen bzw. wesentlich größer sind. Das tiefe Grundwasser kann die Grenzen der Einzugsbereiche des oberen Grundwasserstockwerkes unterfließen (DVWK 1987). Die von BFS und BGR vorgelegten Teilbilanzierungen beschränken sich auf das oberflächennahe Grundwasser. Die tieferen bis zu Salzstockoberfläche und die tiefen bis zum Buntsandstein reichenden Grundwassersysteme (s. 4.1.3) werden nicht bilanziert.

4.2.1.2 Die hydraulischen Verhältnisse in den Porenaquiferen des Deck- und Nebengebirges

In den tertiärzeitlichen Ablagerungen sind vier Grundwasserleiter (vom Hangenden zum Liegenden) entwickelt (s. auch 4.1.3):

- Braunkohlensand (Untermiozän): Sand mit härteren Sandsteinlagen an der Basis. Ein wichtiger Grundwasserleiter im norddeutschen Raum.
- Neuengammer Gassand (Mitteloligozän): glaukonitische Feinsande; nur die Basis ist als Grundwasserleiter entwickelt.

- Brüsselsand (Mittelozeän): 8 - 30 m mächtig z. T. als Sandstein entwickelt.
- Basalsand [= Gartow-Sand], (Untereozän): ca. 5 m mächtig, Feinsand.

In den Randsenken sind die tertiärzeitlichen Schichten mit großer Mächtigkeit ausgebildet (ca. 1.150 m in der nördlichen und ca. 780 m in der südlichen Randsenke, s. 4.1.1.10 bis 4.1.1.13). Über dem Salzstock beträgt die Mächtigkeit unter 100 m. Im Bereich der "Gorlebener Rinne" sind die Tertiärschichten nicht mehr erhalten.

An den Salzstockrändern sind das Tertiärgestein wie auch die übrigen mesozoischen Serien über den Zechsteinablagerungen durch den Salzstockaufstieg hochgeschleppt und teilweise erodiert worden. Der genaue Schichtverlauf am Salzstockrand, wie auch der Salzstockrand selbst, ist nur ungenau bekannt (gestrichelte Bereiche in den Anlagen 4 - 6 BGR 1990a und Angaben zur Salzstockbegrenzung in BGR 1990b, s. auch 4.1.2). Dort wo die Aquifere in den tertiärzeitlichen Ablagerungen Kontakt mit Aquiferen in den quartärzeitlichen Sedimenten haben, kommt es zu hydraulischen Verbindungen.

Im Profil 203 (BGR 1990a: Anl. 4) reichen paläozäne bis mitteloligozäne Schichten über den südöstlichen Salzstockrand bis an den Rand der "Gorlebener Rinne". Drei Sandhorizonte sind in dieser stratigraphischen Abfolge entwickelt: Basalsand (Untereozän), Brüssel-Sand (Mittelozeän) und Neuengammer Gassand (Mitteloligozän). Ein Kontakt dieser tertiären Aquifere mit der quartären vorwiegend sandigen Rinnenfüllung ist möglich. In der Bohrung GoHy 1003 über dem nordwestlichen Ringwall (s. Abb. 5.-1) sind mehrere Sandsteinhorizonte in untereozänen Serien entwickelt. In der Bohrung 5001 etwa 1 km weiter südlich über dem Zentralbereich des Teilsalzstocks sind diese Horizonte wiederzufinden (BGR 1990a, Anl. 5, Profil 209).

Im Profil C-C' in HOFFMANN (1983, Anl. G/HG/11.3) ist der elsterzeitliche glazifluviale Sand im Rinnentieften mit den alttertiären Grundwasserleitern über dem erosiven Einschnitt der Rinne verbunden. Einen ähnlichen Kontakt im Bereich des nördlichen Rinnenrandes bei Gorleben zeigt das Profil B-B' Abb. 6 aus BROSE (1991). Die Sandfüllung einer Rinne, die den nordwestlichen "Ringwall" durchschneidet, hat hydraulische Kontakte zu den tertiärzeitlichen (Neuengammer-Gassand) und quartärzeitlichen (fluvialer Sand) Ablagerungen (BROSE 1991: Abb. 7). Der über 100 m mächtige miozäne Braunkohlensand steht mit den oberen quartären Leitern der "Gorlebener Rinne" in Kontakt (BGR 1990a, Anl. 4, Profil 203). Im südwestlichen Salzstockbereich zeigen mehrere Profile, daß der Neuengammer Gassand unter dem "Ringwall" durchzieht und Kontakt mit den quartären Deckschichten hat (BGR 1991b und siehe auch Kap. 4.1.3).

Der konvektive Anteil der Temperaturverteilung in 150 m unter NN (BGR 1988) zeigt auf- und absteigende Grundwasserströmungen am nordwestlichen und am südwestlichen Salzstockrand. In dieser Teufe stehen tertiärzeitliche Serien an. Nach den Temperaturmessungen steigt besonders markant im südwestlichen Salzstockrandbereich Grundwasser aus den Tertiär

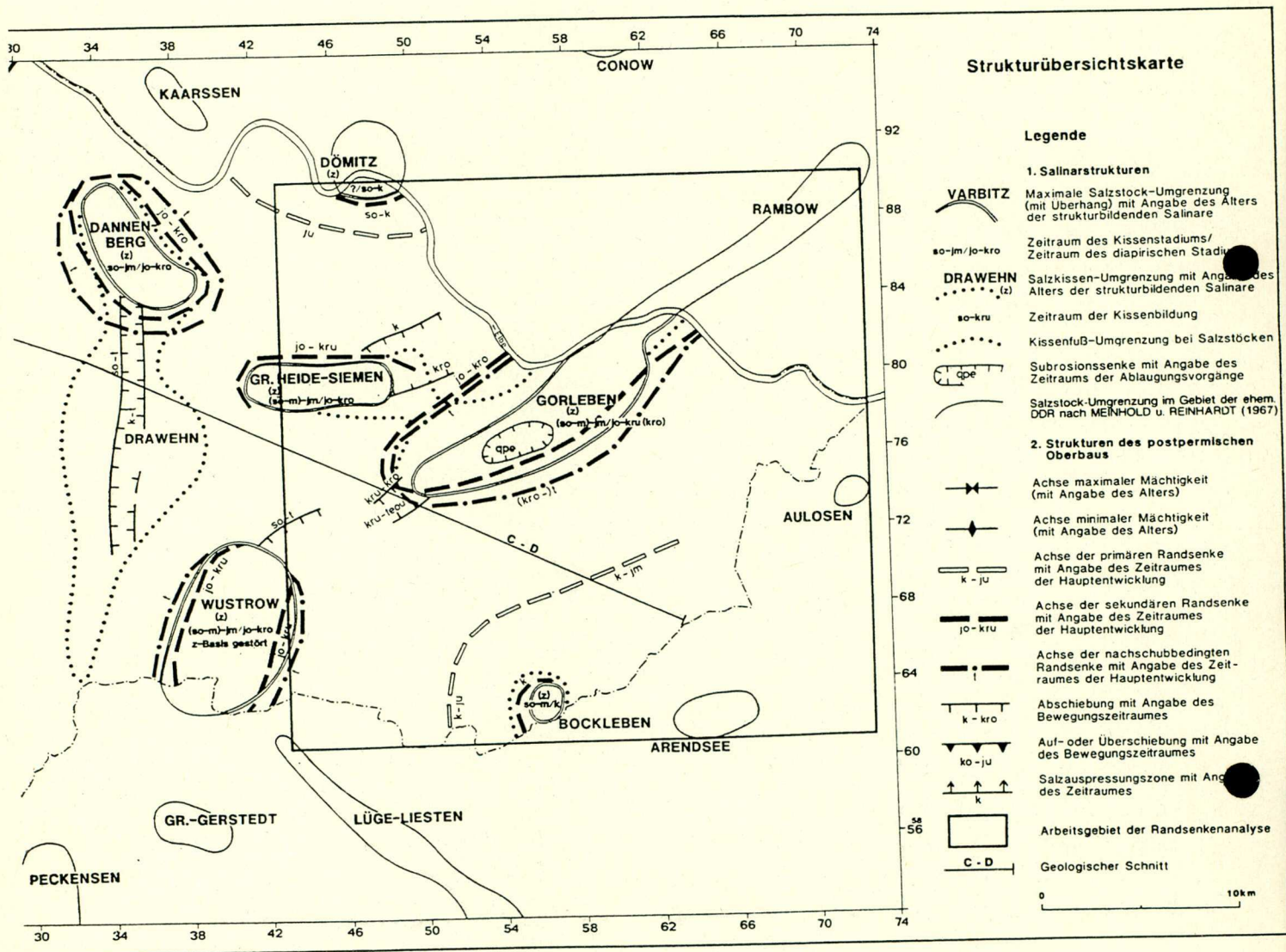


Abb. 4.-2: Übersichtskarte über postsaxonische Strukturen im Oberbau im Bereich des Blattes Salzwedel (Quelle: BGR 1990a)

schichten auf und weniger markant am nordwestlichen Salzstockrand ab. Zwei weitere Abstiegsszonen sind am südöstlichen Salzstockrand entwickelt. Ob Grundwasser am südwestlichen Salzstockrand aus noch größerer Tiefe aufsteigt, ist nicht bekannt. Verwerfungen in diesem Bereich (s. Abb. 4.-2) lassen aber die Vermutung zu, daß in Störungs- und Zerrüttungszonen am Salzstockrand Wasserwegsamkeiten auch für tiefes Grundwasser bestehen könnten (vergl. Kap. 4.1.2). Die auf- und absteigenden Grundwasserströme in den Randbereichen des Salzstockteils Gorleben setzen sich in abgeschwächter Form bis in eine Tiefe von 50 m unter NN fort. Da in diesem Teufenbereich vorwiegend quartäres Lockergestein ansteht, ist dort mit hydraulischen Kontakten zwischen den tertiärzeitlichen (Braunkohlensand u. a.) und quartärzeitlichen Grundwasserleitern zu rechnen.

Aus fluvialem und glazifluvialen Sand und Kies bestehen die Hauptgrundwasserleiter der quartärzeitlichen Sedimente. Geschiebemergel, Schluff und Ton aus Beckenablagerungen sind - mit Ausnahmen - Grundwasserhemmer oder -stauer (genaue Beschreibung der einzelnen Einheiten s. 4.1.1.15 bis 4.1.1.19).

Hydraulisch bedeutsam ist die elsterzeitlich entstandene "Gorlebener Rinne" mit ihren Nebenzweigen, die den Teilsalzstock Gorleben von Südwesten nach Nordosten quert. Nach den Modellrechnungen (BGR 1987) wird in ihr die Hauptmenge des Grundwassers von Süden nach Norden über den Salzstock bewegt. Die Hauptrinne ist mit Sand und einzelnen Schollen von Geschiebemergel (Elster) gefüllt (vergl. Kap. 4.1.2). Sie wird von Geschiebemergel (Grundwasserhemmer) und vom Lauenburger-Ton-Komplex (Grundwasserstauer) überlagert. Durch Pumpversuche konnte nachgewiesen werden, daß die Überdeckung lückenhaft ist und hydraulische Kontakte zu den höheren Stockwerken bestehen (s. 4.2.2.1). Darüber folgen jüngere fluviatile und glazifluviatile Sedimente (Grundwasserleiter) und zwei weitere Geschiebemergel. Insgesamt sind für die quartärzeitlichen Sedimente mehrfache vertikale Wechsel von Grundwasserleitern und Grundwassernichtleitern typisch. Auch lateral treten durch glazitektonische Verschuppung und Fazieswechsel verursachte Änderungen der hydraulischen Leitfähigkeit auf. Diese Sedimentverteilung bedingt die Ausbildung von gespannten und halbgespannten Grundwasserleitern, die lokal miteinander verbunden sind. Einheitliche, über dem Teilsalzstock und seinen Randzonen verbreitete Grundwasserstockwerke sind damit in den quartären Sedimenten nicht entwickelt (vergl. BGR 1990a: Anl. 39).

Der Hauptzweig der "Gorlebener Rinne" ist stellenweise bis zum Steinsalz eingeschnitten. Die Serien des Tertiär und das Hutgestein sind erodiert. Langzeitpumpversuche bestätigen in diesen Bereichen hydraulische Kontakte zu den Grundwasserleitern des Tertiär und zum Hutgesteinsaquifer. Geothermische Messungen belegen, daß auch tatsächlich auf- und absteigendes Grundwasser über dem Teilsalzstock Gorleben zumindest bis zur Teufe von 150 m unter NN diese hydraulischen Verbindungen nutzt (BGR 1988). Markant ist eine positive Anomalie (aufsteigender Grundwasserstrom) im nordöstlichen Bereich der "Gorlebener Rinne". Hier scheint Grundwasser über den "Ringwall" aufzusteigen und nördlich davon am Salzstockrand wieder abzusinken, was eine negative Anomalie in diesem Bereich bestätigt. Eine starke negative Anomalie (absteigendes Grundwasser) am nordöstlichen Untersuchungsrand im Bereich der Geestinsel Hühbeck wird aufgrund geringer Meßdichte nicht interpretiert. Es könnte

sich aber um absteigendes Grundwasser in glazifluviatilen Sandschuppen unter dem Grundwasserneubildungsgebiet des Hühbeck handeln (BGR 1990 a: S. 343, DUPHORN 1983: Abb. 17).

Die miteinander in Verbindung stehenden Grundwasserleiter über dem untersuchten Teil des Salzstocks werden lateral am Salzstockrand von den alttertiären Ton- und Schluff-Schichten abgeschnitten (BGR 1990 a: Abb. 100). Dieser Ringwall (s. Abb. 5.-1) verhindert, daß Grundwasser im Teufenbereich über 50 m unter NN (im südwestlichen Salzstockbereich) seitlich den Salzstock verlassen kann. Nur an bestimmten Stellen sind wasserwegsame Durchlässe vorhanden. Am südlichen Salzstockrand haben die Haupt- und Nebenrinne Einschnitte in die Ringwallsedimente geschaffen. Am nordöstlichen Untersuchungsende des Salzstockteils im Bereich des Elbeknicks verflacht und verschmälert sich der Ringwall und hat dort nur in Tiefen unter 170 m eingeschränkt stauende Wirkung. Ein weiterer schmaler Einschnitt besteht am nordwestlichen Salzstockrand und bildet den Austritt eines Nebenzweiges der "Gorlebener Rinne". Bis auf das oberflächennahe Grundwasser, das vom Ringwall nicht beeinflußt wird, ist eine direkte hydraulische Verbindung des tieferen Grundwassers zu den Grundwasserleitern der Randsenken über Einschnitte im Ringwall möglich. Über gering mächtige Aquifere in den alttertiären Ablagerungen, die den Ringwall mit aufbauen, sind eingeschränkte hydraulische Verbindungen zum Nebengestein des Salzstockes gegeben. Der miozäne Braunkohlensand hat Verbindung zu den glazifluviatilen und fluviatilen Sandablagerungen der saale- und weichseleiszeitlichen Bildungen. Die unterschiedliche Höhenlage, sein Aufbau und das Vorhandensein von Störungen im Ringwall machen diesen zu einer undichten Barriere, die einen Grundwasseraustausch mit den Randsenken nicht verhindern kann.

4.2.1.3 Das Hutgestein als Aquifer

Das Hutgestein ist der erste Gesteinskomplex über dem Salzspiegel (s. 4.1.1.1). Seine erbohrte Mächtigkeit schwankt extrem zwischen 0,15 m (Salzspiegelbohrung 3140) und 111,0 m (Salzspiegelbohrung 1151, BGR 1990a: Anl. 27). In der NE-SW streichender Rinne über dem Teilsalzstock fehlt teilweise das Hutgestein vollständig.

Auf verschiedenen Niveaus innerhalb der Hutgesteinsabfolge kam es bei Bohrarbeiten zu schleichenden bis totalen Spülungsverlusten (BGR 1990 a: Anl. 27). Spülungsverluste sind Anzeichen für Wasserwegsamkeiten im durchteuften Gestein. Beobachtet wurden sie im geschichteten Gipsgestein, in der Hutgesteinsbrekzie, im Sprengelgips, im Liniengips und in isolierten Schollen von Gips- und Anhydritgestein. In anderen z.T. daneben liegenden Bohrungen treten keine Verluste auf. Eine starke inhomogene Hohlraumausbildung scheint charakteristisch für diesen Grundwasserleiter zu sein.

An Bohrprofilen wurden im oberen Bereich der Abfolge (Flaser-, Knollengips, Liniengips, Sprengelgips) Karsthohlräume und vereinzelt Klüfte und Störungen beobachtet. Brekzien und starke, z.T. mit quartären Sedimenten gefüllte Klüfte bauen den unteren Bereich des Hutge-

steins auf (unterer Teil des Sprengelgipses, Hutgesteinsbrekzie und geschichtetes Gips- und Anhydritgestein, s. 4.1.1.1).

Geothermische Messungen in den Salzspiegelbohrungen GoHy 1303, 1304 und 1305 ergaben Anomalien, die auf Wasserbewegungen im Hutgestein zurückgeführt werden (BGR 1988: S. 12). Im Hutgestein verfilterte Pegel reagierten mit starken Spiegelschwankungen des Grundwassers auf Pumpversuche, die in höheren Stockwerken gefahren wurden (z. B. Pumpversuchsgebiet "Weißes Moor", Pegel GoHy 853, 1700 m vom Brunnen entfernt).

Damit ist das Hutgestein als ein eigener Aquifertyp zu betrachten. Ausbildung und räumliche Erstreckung der Karsthohlräume sowie die Orientierung des Kluftsystems bestimmen die Fließrichtung des Grundwassers in diesem Bereich. Prinzipiell unterscheidet sich der Fließvorgang in solchen Leitern stark von dem in Porenaquiferen im Lockergestein. In wasserwegsaamen Klüften, Störungen und Karsthohlräumen kann es zu einem sehr schnellen (turbulenten) Wassertransport kommen. Über die tatsächliche Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit von Grundwasser im Hutgestein liegen keine Ergebnisse vor. In den numerischen Modelluntersuchungen wird das Hutgestein als durchlässiger Porenaquifer behandelt. Seine hydraulischen Parameter beruhen auf Schätzwerten.

In den Profilen der Anlage 4 - 6 in BGR (1990a) ist ersichtlich, daß alttertiäre Schichten im Hangenden und seitlich zum Salzstockrand hin mit dem Hutgestein in Kontakt stehen. Der genaue Schichtverlauf ist dabei meist unsicher. Hinweise auf hydraulische Verbindungen zu den Grundwasserleitern der alttertiären Sedimente (Basal-Sand, Brüsselsand, Neuengammer Gassand) für Bereiche über dem Teilsalzstock lieferten die Langzeitpumpversuche "Meetschow" und "Gorlebener Tannen".

Eine laterale hydraulische Verbindung des Hutgesteins zu den alttertiären Leitern der Randsenken unter den als "Ringwall" bezeichneten Ton und Schluff des höheren Alttertiärs hindurch ist möglich (vergl. Profile in BGR 1991b und s. 4.1.3).

4.2.1.4 Grundwasserzutritte bis unter den Salzspiegel

Ausbeißende Kaliflöze und Anhydritlagen am Salzspiegel zeigen bis in 170 m unter dem Salzspiegel Veränderungen durch eingedrungene Deckgebirgswässer (s. auch 4.1.1.1). Teilweise ist das zu Halitgestein umgewandelte Kaliflöz von klastischen Sedimenten des Deckgebirges durchsetzt (BGR 1990: S. 163; s. auch Abb. 4.-3).

Der Verlauf des Hauptanhydrits und des Kaliflözes der Staßfurt-Folge, die beide ein steiles bis überkipptes Einfallen zeigen, ist in der Anlage 34 in BGR (1990a) wiedergegeben. In den Querschnitten der Anlage 29 in BGR (1990a) ist der Kontakt dieser Serien mit dem Hutgestein genau kartiert.

Klüftiger, gestörter Anhydrit und leicht lösliches Kalisalz bilden Bereiche, wo Grundwasser in den Salzstock eingedrungen ist. Pumpversuche in diesen Bereichen (Bohrungen 1304 und 1305, BGR 1990a) ergaben keine rezenten Wasserwegsamkeiten. Potentiell bilden diese Zonen aber für an Salzen ungesättigtes Grundwasser bevorzugte Subrosionszonen in den Salzstock hinein (selektive Subrosion). Sie bilden die Vorreiter der flächenhaften Subrosion am Salzspiegel. Wenn Kali- oder Anhydritlagen an den Salzstockflanken ausstreichen, ist auch in diesen Zonen mit einem verstärkten Eindringen von subrodierendem Wasser zu rechnen (BGR 1990a: Anl. 36). Den verfügbaren Unterlagen ist zur Sicherheitsrelevanz dieses Aspekts allerdings nichts zu entnehmen.

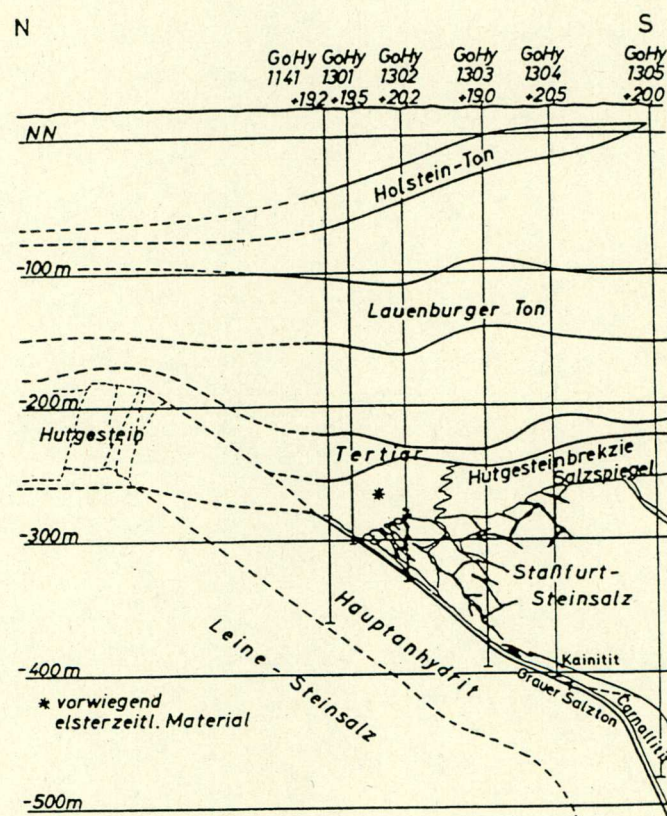


Abb. 4.-3: Geologisches Profil der BGR durch den oberen Teil des Teilsalzstocks Gorleben und sein Deckgebirge (Quelle: DUPHORN 1987)

4.2.2 Ermittlung der hydraulischen Systemeigenschaften

Um Fließvorgänge in einem hydraulischen System quantitativ analytisch oder numerisch zu berechnen, müssen in Feld- oder Laborversuchen die Parameter des Systems bestimmt werden. Je vollständiger und widerspruchsfreier diese Werte ermittelt werden, desto genauer kann die Richtung und Geschwindigkeit des Grundwasserabstroms, z.B. bei einer Grundwassermodellierung, berechnet werden.

Als wichtigste Parameter, die in den folgenden Kapiteln immer wieder auftauchen, sind zu nennen:

- **Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert):** Bestimmt die Gebirgsdurchlässigkeit. Neben den Eigenschaften des durchflossenen Gesteins wird dieser Parameter auch durch die Temperatur und Dichte des Grundwassers beeinflusst, was bei dem höheren Temperaturgradienten und Salzwasservorkommen in den Deckschichten des Salzstocks bedeutsam wird (s. 4.2.2.5). Unterschiedliche Werte ergeben sich auch bezüglich der Durchflußrichtung, da Gestein selten isotrop aufgebaut ist. Die Lockersedimente im Untersuchungsraum haben, bedingt durch ihren schichtigen Aufbau, eine vertikale Durchlässigkeit (k_{fv}), die deutlich geringer ist als ihre horizontale Durchlässigkeit (k_{fh}). Bei Karst- oder Kluftaquiferen kann sich das Verhältnis aber auch umkehren, z.B. im Hutgesteinsaquifer.

Bei Pumpversuchen (s. 4.2.2.1) können mittlere k_f -Werte über einen Bereich, der die Größe des Absenkungstrichters hat, ermittelt werden. Direkte Strömungsmessungen (s. 4.2.2.3) und Laborversuche (s. 4.2.2.2 u. 4.2.2.4) ergeben lokale k_f -Werte bestimmter Gesteinsbereiche.

- **Transmissivität (T):** Die Transmissivität ist das Produkt aus Durchlässigkeitsbeiwert und der Mächtigkeit des Grundwasserleiters. In den quartären Sedimenten im Untersuchungsbereich ergeben sich sehr unterschiedliche Transmissivitäten, da die Mächtigkeit der einzelnen Leiter großen Schwankungen unterworfen ist. Übertragungen von lokal gemessenen Transmissivitäten in benachbarte Bereiche sind dadurch nicht ohne weiteres möglich.

- **Speicherkoeffizient (S):** Integraler Wert des spezifischen Speicherkoeffizienten, der die Änderung des gespeicherten Grundwassers bei Absenkung des Grundwasserspiegels angibt. Je kleiner der Speicherkoeffizient, desto größer ist der Einflußbereich eines Entnahmebrunnens. Gespannte Grundwasserleiter haben einen um Größenordnungen kleineren Speicherkoeffizienten, was zu größeren Radien der Druckspiegelabsenkungen bei Grundwasserentnahmen führt. Diese größere Empfindlichkeit der tieferen gespannten und auch halbgespannten Leiter gegenüber ungespannten Leitern ist bei den Stabilitätsbetrachtungen zum Grundwassersystem im Bereich des Teilsalzstocks Gorleben zu berücksichtigen.

- **Hydraulischer Gradient (J):** Das Verhältnis von Druckhöhenunterschied zu Fließlänge kann auch als Gefälle bezeichnet werden. Beim Vorhandensein eines hydraulischen Gradienten (Gefälles) kann Grundwasser in Richtung geringster Druckhöhe fließen. Dies ist der vorherrschende Fließantrieb in hydraulischen Systemen. Unter bestimmten Voraussetzungen können

aber auch Temperaturunterschiede und Dichteunterschiede (s. 4.2.2.5) eine Grundwasserströmung beeinflussen. Der hydraulische Gradient kann an Grundwassergleichenplänen abgelesen werden (s. 4.3.1).

4.2.2.1 Pumpversuche

Aus folgenden vier Langzeit-Pumpversuchen an drei verschiedenen Orten über dem Teilsalzstock Gorleben wurden die hydraulischen Parameter des Deckgebirges ohne Hutgestein ermittelt (BGR 1990a). Die Bewertung der Durchlässigkeiten wurde dabei nach DIN 18 130 vorgenommen.

Pumpversuchsgebiet "Weißes Moor" südlich der Ortschaft Gorleben über der Gorlebener Rinne. Der Versuch wurde in zwei unterschiedlich tiefen Leitern gefahren:

Filterstrecke: 82,5 - 94,5 m unter GOK im **oberen Süßwasseraquifer**.

Liegendschicht: "Lauenburger Ton".

Hangendschichten: Beckenschluffe und Geschiebemergel.

k_{fh} : $3 - 4 \cdot 10^{-4}$ m/s, durchlässig bis stark durchlässig.

k_{fv} : $2 - 3 \cdot 10^{-7}$ m/s gering durchlässig.

Transmissivität: $2 \cdot 10^{-2}$ m²/s bei einer mittleren Aquifermächtigkeit von 60 m. Speicherkoeffizient: $5 - 8 \cdot 10^{-4}$.

Ein guter hydraulischer Kontakt zum ungespannten oberflächennahen Grundwasser ist bei Meßstelle 21 aufgetreten. Eine Zusickerung von Grundwasser aus dem tieferem Stockwerk wird aufgrund der beobachteten Standrohrhöhen für möglich gehalten (Leakageeffekt). Eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit im gepumpten Leiter bestätigt dieses Ergebnis. Abweichungen von der Typenkurve nach Theis belegen eine Zusickerung aus dem unteren und oberen Grundwasserstockwerk. Der Grundwasserleiter ist halbgespannt (PTB 1983).

Filterstrecke 206 - 226,4 m unter GOK, **unterer Salzwasseraquifer**. Hangendschicht:

"Lauenburger Ton".

Liegendschicht: Hutgestein ?

k_{fh} : $2 - 5 \cdot 10^{-5}$ m/s, durchlässig.

k_{fv} : $5 \cdot 10^{-9}$ m/s, sehr gering durchlässig.

Transmissivität: $1 - 2 \cdot 10^{-3}$ m²/s bei einer mittleren Aquifermächtigkeit von 50 m.

Speicherkoeffizient: $3 - 9 \cdot 10^{-4}$.

Die im Hutgestein verfilterte Meßstelle GoHy 853, 1700 m südwestlich vom Brunnen, zeigte eine deutliche Reaktion auf den Pumpversuch.

Eindeutige Belege einer Zusickerung aus dem höheren Süßwasseraquifer sind dagegen nicht erbracht worden. Die numerische Simulation einer lokalen hydraulischen Verbindung zum höheren Aquifer hat ergeben, daß den gemessenen Daten diese Verbindung nicht unbedingt angesehen werden kann, da die um den Faktor 10 höhere Transmissivität des Süßwasserleiters sofort eine durch Leakage bedingte Absenkung ausgleichen würde (PTB 1985).

Pumpversuchsgebiet "Meetschow", östlich von Gorleben am nördlichen Rand der "Gorlebener Rinne". Nur der untere Salzwasseraquifer in elsterzeitlichen Schichten wurde getestet:

Filterstrecke 193 - 221 m unter GOK.

Hangendschicht: Lauenburger-Ton-Komplex.

Liegendschicht: Hutgestein, stellenweise Schichten des Alttertiärs.

k_{fh} : $2 - 7 \cdot 10^{-5}$ m/s, durchlässig.

k_{fv} : nicht ermittelt.

Transmissivität: $0,7 - 2 \cdot 10^{-3}$ m²/s, bei einer mittleren Aquifermächtigkeit von 30 m.

Speicherkoeffizient: $1 - 8 \cdot 10^{-4}$.

Die ermittelten Systemwerte spiegeln nur bedingt die realen Systemeigenschaften wider, weil eine vermutliche Schichtung des Aquifers aus mehreren Lagen mit unterschiedlicher Durchlässigkeit die Absenkung an den Meßpegeln beeinflußt hat (PTB 1986).

Pumpversuchsgebiet "Gorlebener Tannen", im Zentralbereich des Teilsalzstocks über einem Nebenzweig der "Gorlebener Rinne" im Bereich einer Subrosionssenke:

Filterstrecke 168 - 238 m unter GOK, Salzwasseraquifer in altpleistozänen Schichten.

Liegendschicht: Tertiär ?

Hangendschicht: Geschiebemergel, Beckenschluff ?

k_{fh} : $4 - 17 \cdot 10^{-5}$ m/s, durchlässig bis stark durchlässig.

k_{fv} : nicht ermittelt.

Transmissivität: $3 - 13 \cdot 10^{-3}$ m²/s, bei einer mittleren Aquifermächtigkeit von 70 m.

Speicherkoeffizient: $2 - 8 \cdot 10^{-4}$.

Bei den dicht am Brunnen gelegenen Meßstellen kommt es durch Zusickerung aus dem höheren Grundwasserstockwerk zu einer Veränderung der Absenkungskurve. Diese Zusickerung läßt sich auch durch eine Absenkung im oberen Aquifer verifizieren (PTB 1986).

Ein Ziel dieses Pumpversuches war es, die Herkunft der oberflächennahen Salzwasservorkommen zwischen dem Gebiet "Gorlebener Tannen" und Gorleben zu klären. Der Pumpversuch konnte aber keine Leakage in diesen Gebieten nachweisen.

Insgesamt kann aus den Pumpversuchen geschlossen werden:

Das Grundwassersystem in den Deckschichten kann mehr oder weniger grob in folgende Grundwasserstockwerke gegliedert werden:

1. Freier Grundwasserleiter (Süßwasser), nicht Gegenstand der Pumpversuche.
2. Gespannter bis halbgespannter süßer Grundwasserleiter, oberes Hauptgrundwasserstockwerk.
3. Gespannter bis halbgespannter Salzwasseraquifer.
4. Hutgesteinsaquifer (wurde nicht mit einem Pumpversuch getestet).

Das Salzwasseraquifersystem besteht vorwiegend aus der quartären Rinne im Osten und präelsterzeitlichen Sanden im Westen. Zwischen beiden Bereichen bestehen laterale hydraulische Verbindungen (s. 4.1.3). Kontakte zum oberen Süßwasseraquifer sind im Versuchsgebiet "Weißes Moor" und "Gorlebener Tannen" nachweisbar. Kontakte zum tieferen Hutgesteinsaquifer sind in den Versuchsgebieten "Weißes Moor", "Gorlebener Tannen" und "Meetschow" ermittelt worden.

Verbindungen zwischen dem obersten ungespannten Süßwasseraquifer und dem darunter liegenden halbgespannten Süßwasserleiter sind im Versuchsgebiet "Weißes Moor" beobachtet worden.

Die erhöhte Salinität im oberen Hauptgrundwasserstockwerk an der Meßstelle GoHy 742 (Dichte 1063 kg/m^3) und GoHy 1352 (Dichte 1034 kg/m^3) zwischen Gorlebener Tannen und Gorleben konnte nicht geklärt werden. Hydraulische Kontakte zum Salzwasseraquifer sind dort nicht nachgewiesen worden.

Die kleinen Werte der Speicherkoeffizienten sind typisch für gespannte oder halbgespannte Aquifere. Lokal höhere Speicherkoeffizienten, wie sie an einzelnen Absenkungskurven von Meßpegeln beobachtet wurden, können unterschiedliche Ursachen haben. Sie können durch Zufluß aus einem anderen Grundwasserstockwerk oder durch eine lokale Erhöhung der Durchlässigkeit bzw. der Aquifermächtigkeit zwischen Brunnen und Pegel bewirkt werden. Ob es sich also um eine Anisotropie des Aquifers oder um hydraulische Durchlässigkeiten zu anderen Aquiferen handelt, kann im Einzelfall nur durch geologische Zusatzinformationen entschieden werden.

Die Transmissivitäten sind nur beschränkt aussagekräftig, da die Aquifermächtigkeit in den Wert einfließen. Die wahren Aquifermächtigkeiten schwanken extrem (BGR 1990a: Anl 39) und lassen sich nur unzureichend mit mittleren Mächtigkeiten charakterisieren.

Der sehr kleine vertikale Durchlässigkeitsbeiwert am Pumpversuchsort "Weißes Moor" ist ungewöhnlich ($k_{FV} : k_{FH} \text{ } 1 : 10.000 \text{ bzw. } 1 : 1.000$). Als normaler Wert wird $1 : 10$ (BGR 1990a: S. 312) genannt. Eine Erklärung dafür wird nicht gegeben. Aus den Unterlagen der Berichte zu den Langzeitpumpversuchen wird aber ersichtlich, daß es sich dabei um den Durchlässig-

keitsbeiwert der Zwischenschicht (Lauenburger-Ton-Komplex) zwischen Salzwasserleiter und Süßwasserleiter handelt.

4.2.2.2 Direkte Durchlässigkeitsmessungen

Folgende Durchlässigkeitsbeiwerte für die Grundwasserstauer und -hemmer wurden an Lockergesteinsproben von feinkörnigem und bindigem Material im Labor ermittelt (BGR 1990a: Tab. 56).

Lockergesteinsart (Hauptgemengteil, Nebengemengteile nicht aufgeführt):

Feinsand k_f (m/s) min. $1,9 \cdot 10^{-10}$, max. $9,9 \cdot 10^{-7}$, sehr gering bis gering durchlässig.
Schluff k_f (m/s) min. $1,3 \cdot 10^{-10}$, max. $1,5 \cdot 10^{-8}$, sehr gering bis gering durchlässig.
Ton k_f (m/s) min. $8,2 \cdot 10^{-11}$, max. $4,8 \cdot 10^{-9}$, sehr gering durchlässig.

Diese Werte zeigen, daß auch das Material der Grundwasserhemmer bzw. -stauer eine gewisse Durchlässigkeit besitzt, die besonders für Feinsand stark schwanken kann. Zu beachten ist dabei, daß die Gesteinsdurchlässigkeit gemessen wurde, die im allgemeinen unter der maßgeblichen Gebirgsdurchlässigkeit liegt.

4.2.2.3 Direkte Strömungsmessungen

An 41 Bohrungen über dem Salzstock wurden direkte Strömungsmessungen mit radioaktiven Tracern nach der Einbohrlochmethode durchgeführt (BGR 1990a: Tab. 61 und Abb. 113). Die Meßtiefe betrug zwischen 53,0 m und 270,5 m unter Gelände. Die Messungen geben die horizontale Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers in der lokalen Umgebung der Meßstelle an. Da dabei die Winkelverteilung und die Verdünnung von radioaktiven Tracern um die Meßstelle herum gemessen werden, spiegeln die Meßdaten die für diesen lokalen Bereich geltende statistische Verteilungen wider.

Die horizontale Filtergeschwindigkeit schwankt zwischen $< 0,4$ m/a bis 47,5 m/a. Die mittlere Geschwindigkeit beträgt 2 m/a (BGR 1990a: Standardabweichung log-normal verteilt $+6,8$ m/a, $-0,6$ m/a; BFS 1990 S. 166: Standardabweichung 1,4 m/a und 8,8 m/a). Eine Beziehung zwischen Meßtiefe und Filtergeschwindigkeit besteht nicht.

Die Fließrichtung schwankt zwischen 1 und 351 Grad. Als mittlere Fließrichtung wird 344 Grad angegeben (BGR 1990a: S. 332). Fließrichtungen sind zirkulare Daten, die nicht über das arithmetische Mittel richtig repräsentiert werden können. Ein entsprechender Wert stellt in der Richtungsstatistik das Vektormittel dar (WALLBRECHER 1986). Danach beträgt das Vektormittel für die gemessenen Fließrichtungen 334 Grad. Auch die Standardabweichung von \pm

183 Grad (BGR, 1990), ± 83 Grad (BFS, 1983) müßte entsprechend durch eine zirkulare Varianz ersetzt werden. Sie beträgt hier 0,6 wobei gilt $0 \leq \text{zirkulare Varianz} \leq 1$. Wie die Filtergeschwindigkeit zeigt auch die Fließrichtung keine Beziehung zur Meßtiefe. Maximale Filtergeschwindigkeiten wurden in unterschiedlichen Teufenlagen gemessen:

136 m u. G. (GoHy 1091):

In fraglichen elsterzeitlichen Ablagerungen, nordwestlich von Marleben, Filtergeschwindigkeit 13,14 m/a.

161 m. u. G. (GoHy 753):

In präelsterzeitlichem fluviatilem Sand (Hauptbestandteil Mittelsand), im Gebiet "Gorlebener Tannen", Filtergeschwindigkeit 47,45 m/a.

270,5 m und 267 m. u. G. (GoHy 504):

In elsterzeitlichem glazifluvialen Sand (Hauptbestandteil Mittelsand), zwischen Weißem Moor und Meetschow, Filtergeschwindigkeit 9,86 und 29,2 m/a.

Auch zwischen den ermittelten Fließrichtungen und Filtergeschwindigkeiten ergeben sich keine Beziehungen oder Trends.

Insgesamt belegen diese Messungen ein stark inhomogenes Fließverhalten des Grundwassers über dem Teilsalzstock Gorleben im Bereich zwischen 50 und 270 m unter Gelände.

4.2.2.4 Porositätsbestimmung

Um die Geschwindigkeit eines Wasserteilchens von einem Punkt zum anderen in einem Aquifer (Abstandsgeschwindigkeit v_a) angeben zu können, ist neben der Filtergeschwindigkeit v_f , die aus k_f - Wert und Gefälle berechnet werden kann, auch die abflußwirksame Porosität n_e entscheidend. Es gilt: $v_a = v_f / n_e$. Damit sind Porositätsbestimmungen gerade für die Berechnungen von Laufzeiten notwendig.

Aus Bohrungen kann die abflußwirksame Porosität näherungsweise mit der tonkorrigierten Porosität bestimmt werden (BGR 1990a: Tab 59). Stärkste Schwankungen der Einzelwerte ergaben sich bei Sedimenten mit Schluff als Hauptbestandteil: n_e -Werte von 5 % - 35 % (BGR 1990a: Abb. 104). Bei den Eingabeparametern für die numerischen Modellversuche wird Schluff zusammen mit Geschiebemergel der Wert $n_e = 20\%$ zugewiesen (BGR 1990a: Tab. 60).

Lediglich auf Schätzwerten beruhen die abflußwirksamen Porositäten des Hutgesteins von $n_e = 2\%$ und 10% .

4.2.2.5 Hydraulisch relevante physikalische Grundwassereigenschaften

Dichteunterschiede im Grundwasser können zu einem hydraulisch wirksamen Potentialgefälle führen und die Fließrichtung und Fließgeschwindigkeit beeinflussen.

Die Dichte von Grundwasser wird neben der Temperatur wesentlich von seinem Lösungsinhalt bestimmt. Die Dichteverteilung, aufgetragen gegenüber der elektrischen Leitfähigkeit, verdeutlicht diese Beziehung (BGR 1990a: Abb. 111).

Im Bereich des Salzstockteils Gorleben schwanken die Grundwasserdichten zwischen ca. 1.000 - 1.200 kg/m³ (Temperatur konst. 20 °C).

Wässer mit den höchsten Dichten bzw. höchsten Lösungsinhalten (Gesamtkonzentration an gelösten Bestandteilen TDS = 300 - 320 g/l, vorwiegend NaCl) wurden in Tiefen zwischen 220 und 270 m u. GOK in der "Gorlebener Rinne" gefunden. Der Lösungsinhalt stammt aus der Ablaugung von Evaporiten der Halitabscheidungsfolge (BGR 1989). Entlang der Rinne steigen die Linien gleicher Dichte von Süden nach Norden entsprechend dem Grundwasserabstrom an (BGR 1990a: Abb. 117). Gleichzeitig senkt sich die Rinnenbasis nach Norden generell ab. Das bedeutet einen Anstieg von Salzwasser, eine Konzentrationszunahme entlang einer bestimmten Teufe und eine Zunahme der gelösten Salzmenge in diese Richtung. Dieser Befund spricht für eine rezente Salzstockablaugung in der Gorlebener Rinne.

Lokale höher mineralisierte Grundwässer (s. auch 4.3.3) sind an verschiedenen Stellen über dem Salzstock bestimmt worden (BGR 1989):

Salzwasser (TDS 10.000 - 100.000 mg/l)

GoHy 1351: 25.580 mg/l, Typ NaCl, ca. 1 km südlich von Gorleben, 40 m u. GOK.

GoHy 512: 13.620 mg/l, Typ NaCl, im "Weißen Moor", 52,7 m u. GOK.

Brackwasser (TDS 1.000 - 10.000 mg/l)

GoHy 851: 1.597 mg/l, Typ NaCl = HCO₃, ca. 5 km südlich von Gorleben in 58,5 m u. GOK.

GoHy 2318: 1.555 mg/l, Typ NaCl, zwischen Gorleben und Meetschow in 64 m u. GOK.

GoHy 2326: 7.550 mg/l, Typ NaCl, zwischen Gorleben und Meetschow in 58 m u. GOK.

In der Meßstelle H8b (BESENECKER et al. 1983) am Laascher See südlich des Hühbeck wurde in ca. 91 m u. GOK NaCl-Wasser (13.000 mg/l) angetroffen und aufgrund seiner erhöhten Temperatur als aufsteigendes Tiefenwasser gedeutet.

BROSE (1991) beschreibt oberflächennahe Versalzungszone in Niederungsgebieten bei Marleben, Gorleben und südöstlich des Hühbeck bei Elbholz (BROSE 1991: Abb. 15). Versalzungen durch Uferfiltrat, Düngemiteleintrag und Verdunstungsanreicherung konnten von Versalzungen durch aufsteigendes tieferes Grundwasser unterschieden werden. Eine direkte

Herkunft der Salzfracht dieser Wässer vom Salzstock Gorleben-Rambow war dagegen nicht nachzuweisen.

Diese Vorkommen von oberflächennahen salzreicheren Grundwässern deuten auf einen Aufstieg von Grundwasser aus tieferen Stockwerken. Der hydraulische Kontakt muß mit einer Potentialdifferenz wirksam sein, der es ermöglicht, daß das spezifisch schwerere (dichtere) Grundwasser über das geringer mineralisierte Grundwasser aufsteigen kann. Dabei spielen vertikale hydraulische Wegsamkeiten im Deckgebirge des Salzstockes und eine Anhebung der Salz/Süßwassergrenze im Bereich der Niederungsgebiete durch Druckentlastung eine wesentliche Rolle.

Vorkommen von salzreicherem Wasser entlang dem norwestlichen Rand der Gorlebener Rinne (BGR 1990a: Abb 108) und am Walldurchbruch einer Nebenrinne bei Marleben sind durch positive Differenztemperaturen gekennzeichnet, was auch auf aufsteigendes Grundwasser deutet (BGR 1988).

Eine Unterschichtung der Salzwässer durch geringer mineralisiertes Wasser veranschaulicht ein Vertikalschnitt mit der Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit in diesem Bereich (BFS 1990: Abb.1 in Kap. 3.4.4.4). Das Salzwasser in dieser isolierten Linse zeigt ein Alter von ca. 5.000 Jahren. Seine Genese ist nicht geklärt. Neben dieser "Linse" von erhöhter Leitfähigkeit im Süßwasser zeigt auch der unebene Verlauf der Grenze Süßwasser/Salzwasser (hier bei einer Leitfähigkeit von 5 mS/cm angenommen) bestehende Ungleichgewichte in der Schichtung der Grundwassersäule. Nur das hochsaline Grundwasser (> 150 mS/cm) in Tiefen über 200 m zu NN ist horizontal geschichtet.

Die elektrische Leitfähigkeit der Fließgewässer im Untersuchungsgebiet liegt bei 0,3 - 0,6 mS/cm. Eine höhere elektrische Leitfähigkeit bis > 4 mS/cm (Kupernitz-Kanal) wurde in mehreren Fließgewässern gemessen. Gewässer mit den höchsten Werten zu Niedrigwasserzeiten sprechen für einen punktförmigen kontinuierlichen Eintrag von salzhaltigem Grundwasser. Zu diesen gehören der Ranzau- und der Kupernitz-Kanal, der untere südöstliche Randgraben bei Krautze, der Lanzer Graben und - in abgeschwächter Form - der Prezeller Hauptabzugsgraben (BFS 1991). Vermutlich strömt aufsteigendes salzhaltiges Grundwasser in \pm gleichbleibender Menge diesen Vorflutern zu.

Über die Kanäle Kupernitz und Ranzau werden jährlich 2.000 - 3.000 t NaCl ausgebracht. Die dafür verantwortliche Versalzungszone liegt am südlichen Rand des Salzstockes Siemen. Nach BRÜHL & FABER (1983) stammen die Salzwässer aus dem miozänen Braunkohlensand in der Randsenke zwischen Salzstock Siemen und Teilsalzstock Gorleben. An den Salzstockrändern sind die tertiären Schichten hochgeschleppt und teilweise erodiert, dabei sind hydraulische Kontakte zu den pleistozänen Sand- und Kiesschichten des oberflächennahen Grundwasserstockwerkes entstanden. Eine hydraulische Potentialdifferenz von einigen Metern zwischen Grundwasserneubildungsgebieten und Grundwasserabfluß in den Niederungen kann dabei bis in das tiefere Grundwasserstockwerk wirksam werden. Die chemische Zusammensetzung des Salzwassers im Braunkohlensand zeigt keine spezifische Herkunft. Hydraulisch

bestehen aber Verbindungen zu den Salzwasserleitern in den Deckschichten des Teilsalzstocks Gorleben. Absteigende Salzwässer können am nördlichen Salzstockrand in die tiefer liegenden tertiären Randsenkenaquifere gelangen.

Dichtebestimmungen im Salzwasseraquifer der Gorlebener Rinne verlaufen parallel zur Rinne geradlinig mit einer leichten Steigung nach Nordosten in Abstromrichtung des Grundwassers (BFS 1990: Abb. 2 in Kap. 3.4.4.4); quer zur Rinne sind die Linien gleicher Dichte nicht konstant.

4.3 Richtung und Geschwindigkeit des Grundwasserabstromes

Die Fließrichtung und die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers im Bereich des Teilsalzstocks Gorleben sind - bedingt durch Morphologie und Geologie - nicht einheitlich. Für das tiefe Grundwasser in der westlichen Umgebung des Salzstockes wird ein 2d-Modell verwendet (s. 4.3.3). Das Grundwasser in den Deckschichten über dem Teilsalzstock und den Randsenken bis in eine Tiefe von ca 350 m unter NN wird mit einem 3d-Modell simuliert (s. 4.3.2). Ein Grundwassergleichenplan behandelt das oberflächennahe Grundwasser bis ca. 30 m unter NN (s. 4.3.1).

4.3.1 Grundwassergleichenpläne

Grundwassergleichenpläne gehören zu den klassischen Verfahren, um flächenhaft die Richtung des Grundwasserabstroms zu bestimmen. Mit der Annahme einer mittleren Durchlässigkeit lassen sich auch Filtergeschwindigkeiten ableiten (BFS 1990: Abb. 1 in Kap. 3.4.4.2).

Für das oberflächennahe Grundwasser bis 30 m unter NN ergibt sich das folgende Bild: Die Grundwasseroberfläche liegt im Bereich der Gartower Tannen am höchsten. Von dieser Hochlage zieht sich der Abstrom entlang des Salzstocksüdrandes in nordöstlicher Richtung zum Vorfluter Elbe und in südwestlicher Richtung zu den Vorflutern Lucienkanal, Jeetzel und Dannenberger Landgraben. Der Abstrom in nordwestlicher bis nordöstlicher Richtung führt über den Teilsalzstock Gorleben. Lokal bildet der Hühbeek am Elbeknick über dem Salzstock ein separates Grundwasserneubildungsgebiet, das den generellen Abstrom teilweise nach Süden ablenkt.

Mit einem Gefälle des Grundwasserspiegels von 1‰ - 1,5 ‰ und einer hohen Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-4}$ m/s werden Filtergeschwindigkeiten im Bereich zwischen 5 m/a - 250 m/a erreicht (BFS 1990: S. 168).

In den beiden zusammenfassenden Berichten der BGR (1990a) und des BFS (1990) wird nur der Grundwassergleichenplan für das Wasserwirtschaftsjahr 1986 abgebildet (BGR 1990a:

Abb. 114). Andere Gleichenpläne sind nicht verfügbar. Hinweise auf jahreszeitlich bedingte oder längerfristige Grundwasserspiegelschwankungen können daraus nicht abgeleitet werden. Diese sind aber für eine Bewertung der Stabilität des oberflächennahen Grundwasserfließsystems notwendig.

4.3.2 Numerische Modellierung der Grundwasserbewegung in den Deckschichten über dem Teilsalzstock Gorleben

Numerische Modelluntersuchungen zum Fließverhalten des Grundwassers werden in BGR (1984a, 1984b) und BGR (1987) dargestellt. In BGR (1987) wird das Hutgestein in die Berechnungen mit einbezogen, da die verkarsteten und geklüfteten Hutgesteinsserien Wasserwegsamkeiten aufweisen. Im Ergebnis liefern beide Untersuchungen besonderen hinsichtlich der Fließzeiten stark unterschiedliche Werte. Weitere Modellierungen wurden mit dem Programmsystem SWIFT vorgenommen (BRÜHL 1983, PSE 1985b). Die Darstellung und der Vergleich der Modellergebnisse werden in Kapitel 4.3.2.4 diskutiert. In den folgenden Kapiteln wird speziell auf die von der BGR durchgeführten Modellansätze eingegangen.

4.3.2.1 Der 3d-Modellraum

Die obere Berandung des Modellraumes ist durch Hochlagen und Niederungsgebiete festgelegt (BGR 1984: S. 10). Die Einzugsgebiete der betreffenden Vorfluter wurden mit den unterirdischen Grundwassereinzugsgebieten gleichgesetzt (konvergierende Gefällelinien = konvergierende Grundwasseroberfläche). In Gebieten mit flachem Relief aber kann die Änderung des Wasserstandes eine Änderung der Entwässerungsrichtung bewirken (Bifurkation). Das Oberflächeneinzugsgebiet kann in seiner Größe variieren und damit auch die Größe von Grundwasserabflußgebieten und Grundwasserneubildungsgebieten verändern (WILHELM 1987). Ob Bifurkationen im Untersuchungsraum eine Rolle spielen, wird aus den Unterlagen nicht ersichtlich.

Die topographischen Hochlagen "Gartower Tannen" und "Höhbeck" sind Grundwasserneubildungsgebiete, wo Niederschlags- bzw. Sickerwasser dem Grundwasser im Modellraum zugeführt werden. Den Modellrändern entsprechen Grundwasserscheiden und Grenzstromlinien zu benachbarten Abflußgebieten. Grundwasseraustritt findet an Vorflutern statt. Die Löchnitz bildet den nördlichen, der Luciekanal die südliche Modellgrenze (BGR 1987: App. 2). Das Modellgebiet umfaßt damit eine Fläche von ca. 350 km².

Die Modelluntergrenze nach Einbeziehung des Hutgesteins schwankt zwischen 350 m und 70 m u. NN. Vorwiegend Geschiebemergel, Schluff (Grundwasserhemmer) und Ton (Grundwassernichtleiter) des Tertiär und Quartär bilden die Basisschichten im Modellraum. An einigen Stellen bilden aber auch die Karst- und Kluffleiter des Hutgesteins mit ihren quartären

Einlagerungen sowie quartärer Sand und Kies die Modelluntergrenze (BGR 1987: App. 3.1 - 3.13). Die Mächtigkeit des Hutgesteins schwankt zwischen 0 und 111 m (BGR 1990a), weshalb im Modell eine mittlere Mächtigkeit von 30 m angenommen wurde. Die starke Schematisierung dieses wichtigen Grundwasserleiters wirkt sich negativ auf die Qualität der Modellergebnisse aus.

Zwischen den oberen und unteren Modellrändern wird der Modellraum vertikal begrenzt. An den vertikalen und unteren Modellrändern findet kein Grundwasseraustausch statt. Sämtlicher Grundwasserzu- und Grundwasserabfluß beschränkt sich auf die Oberflächenbegrenzung des Modellraumes.

Untersuchungen des tieferen tertiären und quartären Aquifersystems im Raum Hamburg (DVWK 1987) zeigen, daß dieses Grundwasserstockwerk einen viel größeren Einzugsbereich aufweisen kann, als das oberflächennahe Grundwasser. Der durch die Trinkwasserentnahme für Hamburg entstandene Absenkungstrichter hat einen Radius von 10 bis 20 km. Das zeigt einerseits die leichte Beeinflussbarkeit des tieferen Grundwassersystems über weite Strecken und andererseits, daß Morphologie und oberflächennahe Grundwasserscheiden nicht mit der Abgrenzung des tieferen Aquifersystems übereinstimmen müssen.

4.3.2.2 Diskretisierung

Bei dem verwendeten Finite-Differenzen-Verfahren wird der Modellraum in 380 vier- bis sechseckige vertikale Säulen unterteilt. Über dem Salzstock beträgt der Säulendurchmesser etwa 500 m bis 1.000 m, in den Randbereichen 1.000 m bis 2.000 m. Vertikal werden die Säulen durch 15 Rechenebenen (+15 m bis -350m NN) unterteilt. Dadurch entstehen Raumelemente von ca. 24 m Höhe. Diese $15 \times 380 = 5.700$ Säulensegmente stellen die Grundbausteine der numerischen Modellierung dar. Ihnen werden Mittelwerte für die vertikale und horizontale Durchlässigkeit und die abflußwirksame Porosität zugewiesen.

Die Größenordnung der Raumelemente bestimmt den Detaillierungsgrad des Modells und damit die Abbildungsgenauigkeit der realen hydrogeologischen Situation. Die Größe der Raumelemente wird neben der Rechenkapazität vorwiegend von der Datendichte im Untersuchungsraum bestimmt.

4.3.2.3 Eingabeparameter

Die theoretische Grundlage der Strömungsmodellierung basiert auf der Kontinuitätsgleichung und dem Darcy-Gesetz. Aus beiden Grundprinzipien folgt die Strömungsgleichung, eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung. Für regionale Strömungsprobleme, wie sie z. B. auch am Standort Gorleben vorliegen, ist diese Gleichung nur angenähert iterativ lösbar. Für

den gesamten Modellraum sind Konstanten, Anfangs- und Randbedingungen notwendig. Hydraulische Leitfähigkeiten und Porositäten können dagegen variabel für jede einzelne Diskretisierungszelle unterschiedlich in die Berechnungen eingeführt werden.

Im folgenden werden die Konstanten und Randbedingungen bei der numerischen Modellierung kurz aufgeführt:

- Stationäre Strömungsverhältnisse:

Das zugeführte Grundwasser ist gleich der aus dem 3d-Modell entweichenden Grundwassermenge. Das hydraulische Potentialgefälle bleibt konstant und damit auch die Strömungsverhältnisse. Bei Fließzeitberechnungen bleibt diese Konstanz über die gesamte Fließzeit erhalten. Für die längste hier modellierte Fließzeit sind das 17.000 Jahre. Die Veränderung der Strömungsverhältnisse durch Klimaveränderungen oder durch eine verstärkte Grundwasserförderung bleibt dabei unberücksichtigt.

- Konstante Porenwasserdichte:

Das verwendete Modell ist ein "Süßwassermodell", weil die Wasserdichte von Süßwasser als Konstante eingeführt wird. Dichteunterschiede bis zu 20% durch unterschiedliche Salzgehalte im Grundwasser werden nicht berücksichtigt.

- Konstante Grundwassertemperatur:

Durch die höhere Temperaturleitfähigkeit des Salzgesteins variieren die Grundwassertemperaturen nicht nur vertikal, sondern auch lateral zwischen den Deckschichten über dem Teilsalzstock und den Randsenken. Die Temperaturgradienten über dem Salzstockteil Gorleben betragen 5 K/100 m bis 16 K/100 m (BGR 1990: S. 262). Bei einer oberflächennahen Grundwassertemperatur von 10 °C sind das in 250 m Tiefe 22,5 °C bis 50 °C. Im Bereich der Randsenken beträgt der Temperaturgradient nur 2 K/100 m. Das ergibt bei den gleichen Annahmen in 250 m Tiefe 15 °C. Die thermische Dichtereducierung kann die höhere Dichte im tieferen Grundwasser vermindern, aber nicht ausgleichen.

- Alle Grundwasserleiter sind Lockergesteinsleiter:

Besonders das Hutgestein ist ein sehr inhomogen aufgebauter Karst- und Kluftaquifer (s. 4.2.1.3). Seine Behandlung als Lockergesteinsaquifer wäre nur gerechtfertigt, wenn er bezüglich der Raumelementgröße als isotrop anzusehen ist. Die bisher angeführten Untersuchungen bestätigen diese Annahme aber nicht (s. 4.1.1.1 u. 4.2.1.3).

- Über die vertikalen Ränder und über die Basisfläche des Modellraumes findet kein Grundwasseraustausch statt:

Aufgrund der in Kapitel 4.3.3 dargelegten Modellierung des tiefen Grundwassers wird ein Zu- und Abstrom von Grundwasser über die Modellbasis nicht berücksichtigt. Ein möglicher Grundwasserabstrom wird nicht einmal diskutiert. Tieferes Grundwasser kann aber oberflächennahes Grundwasser unterstößen, so daß die Einzugsgebiete unterschiedlich groß sein können. Da das Modellgebiet in mehrere Grundwasserstockwerke gegliedert ist (mit gespannten und halb-

gespannten Aquiferen), sind Zuflüsse und Abflüsse über die Modellränder wahrscheinlich. Eine quantitative Abschätzung ist aber aus den verfügbaren Unterlagen nicht möglich. Beispielfhaft kann nur der Aufstieg von Grundwasser aus den alttertiären Schichten am südwestlichen Salzstockrand angeführt werden. Die Verbreitung dieses tertiären Aquifers reicht weit über die Grenzen des Modellgebietes hinaus.

Alle diese Konstanten und Randbedingungen sind Vereinfachungen der natürlichen Verhältnisse in den Grundwasseraquiferen.

Variable:

Die geologischen Einheiten in den Deckschichten einschließlich dem Hutgestein werden nach ihrer Grundwasserleitfähigkeit in sechs Typen eingeteilt:

Version B 1987:

- | | |
|---|---|
| 1. Kies und Sand des oberen Grundwasserleiters | $k_{fh} 5 \cdot 10^{-4}$
$k_{fv} 5 \cdot 10^{-5}$
$n 30\%$ |
| 2. Kies und Sand des unteren Grundwasserleiters | $k_{fh} 5 \cdot 10^{-5}$
$k_{fv} 5 \cdot 10^{-6}$
$n 30\%$ |
| 3. Geschiebemergel und Schluffe | $k_{fh} 5 \cdot 10^{-6}$
$k_{fv} 5 \cdot 10^{-7}$
$n 20\%$ |
| 4. Tone | $k_{fh} 5 \cdot 10^{-9}$
$k_{fv} 5 \cdot 10^{-10}$
$n 10\%$ |
| 5. Hutgestein Karst | $k_{fh} 1 \cdot 10^{-5}$
$k_{fv} 1 \cdot 10^{-5}$
$n 2\%$ |
| 6. Hutgestein quartäre Einlagerungen | $k_{fh} 5 \cdot 10^{-5}$
$k_{fv} 5 \cdot 10^{-5}$
$n 10\%$ |

k_{fh} , k_{fv} (m/s) horizontale/vertikale Durchlässigkeitsbeiwerte
 n (%) abflußwirksame (effektive) Porosität

Die hydraulischen Parameter für die quartären und tertiären Sedimente stammen aus drei Langzeitpumpversuchen (BGR 1990a: Tab. 57, s. auch 4.2.2.1). Die Werte für das Hutgestein sind Schätzwerte, wobei dieser Karst- und Kluftaquifer modellbedingt als Lockergesteinsleiter behandelt wird. Schematisch wird auch angenommen, daß die mittlere Mächtigkeit des Hutgesteins 30 m beträgt, wobei die oberen 20 m dem verkarsteten Bereich mit offenen Klüften und die unteren 10 m dem stark geklüfteten Teil mit quartären Einlagerungen entsprechen.

Die Abschätzung der effektiven Porositäten wurde aus geophysikalischen Bohrlochmessungen berechnet.

Entsprechend der Einteilung der geologischen Schichten in sechs hydrogeologische Einheiten wird für jede der 380 Modellgebietssäulen ein Säulenprofil mit der vertikalen Verteilung der Typen aus Interpolationen von Bohrprofilen abgeleitet. Für jedes Raumelement ergibt sich eine spezielle Abfolge der hydrogeologischen Typen. Daraus werden die mittleren Leitfähigkeiten und die mittlere Porosität für jedes Raumelement berechnet.

4.3.2.4 Ergebnisse der Modellierung

Die Modellergebnisse nach dem Modellansatz BGR (1987) werden in 15 Schnitten (Rechenebenen) in einem vertikalen Abstand von 30 m dargestellt:

Rechenebene 1 und 2 (15 m und -15 m zu NN):

Der oberflächennahe Grundwasserstrom fließt in nord - nordöstlicher bis west - nordwestlicher Richtung über den Teilsalzstock Gorleben. Ein kleinerer Anteil des Abstroms fließt in der südlichen Randsenke in nordöstlicher und westlicher Richtung um den Salzstockrand herum. Die horizontale Filtergeschwindigkeit liegt im Bereich von 5,5 - 2,1 m/a mit einem Maximum von 16 m/a.

Ab Rechenebene 3 (ab - 45 m zu NN) teilt sich der Grundwasserabfluß in einzelne Ströme auf. Der Hauptabfluß über dem Teilsalzstock mit Geschwindigkeiten um 5 m/a bewegt sich in Richtung Nord bis Nordnordost (s. Abb. 4.-4 mit beispielhafter Darstellung der Rechenebene 5). Ein schwächerer Abfluß mit Geschwindigkeiten um 0,5 m/a ist West bis Nordwest gerichtet. Die westliche Umfließung des Salzstockrandes schwächt sich gegenüber der jetzt vorherrschenden nordöstlichen Richtung ab. Diese Strömungsrichtungen bleiben etwa bis zur 10. Rechenebene (-225 m zu NN) bestehen, die Filtergeschwindigkeiten nehmen dabei mit zunehmender Teufe ab. Die horizontalen Filtergeschwindigkeiten im Rinnenbereich in einer Teufe zwischen -150 m und -275 m zu NN liegen zwischen 0,02 und 1,09 m/a (s. Tab. 4.-1)

Bis zur Rechenebene 12 (-275 m zu NN) ist nur noch der Nord bis Nordost gerichtete Abflußzweig erkennbar.

Die weiteren Rechenebenen (13 bis 15) bis -350 m zu NN zeigen keine differenzierbaren Strömungsrichtungen mehr. Die Geschwindigkeiten liegen im Mittel zwischen 0,02 und 0,05 m/a mit einem Maxima bei 0,3 m/a (s. Tab. 4.-2).

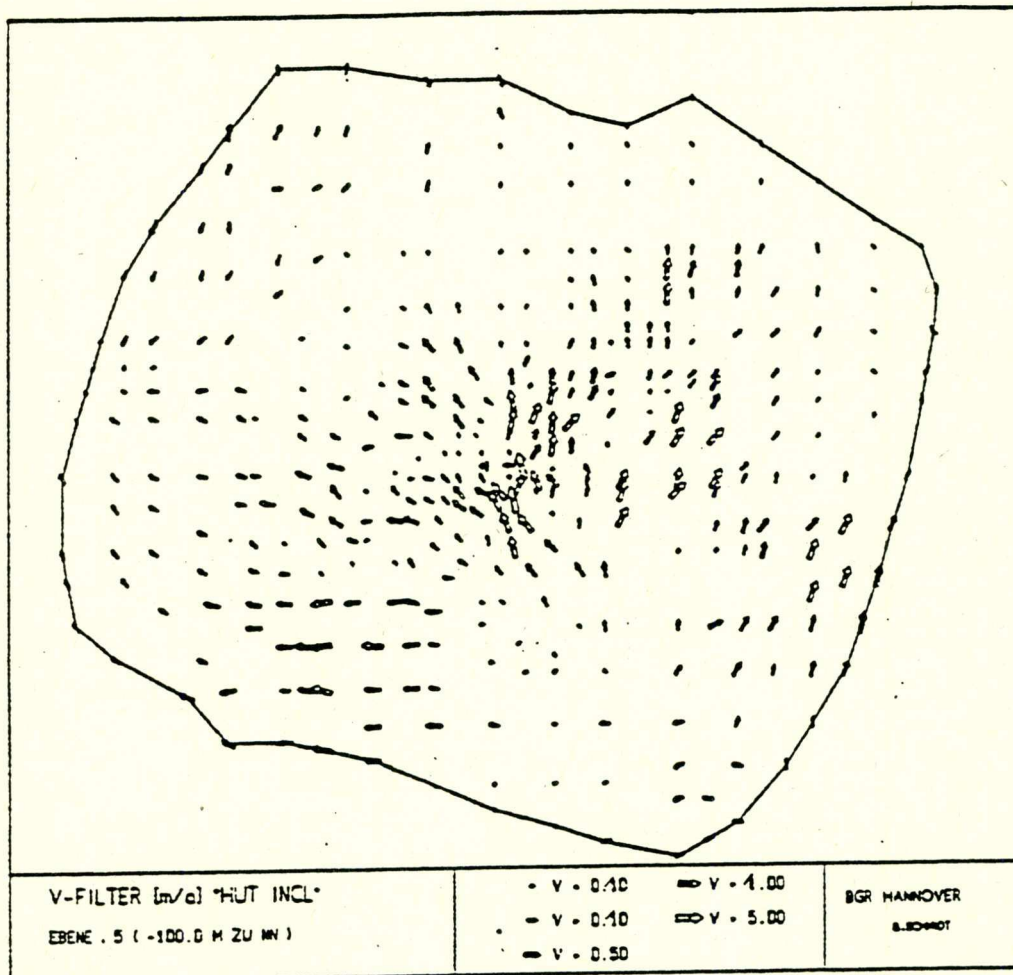


Abb.: 4.-4: Modellerte horizontale Grundwassergeschwindigkeiten (m/Jahr) in Rechenebene 5 (-100 m zu NN) unter Berücksichtigung des Hutgesteins (Quelle: BGR 1987)

Die Verteilung der Abstromrichtungen des Grundwassers im Modellgebiet spiegelt die großräumigen geologischen Strukturen wider. Die Gorlebener Rinne paust sich mit ihrem Hauptzweig, der SSW-NNE verläuft, in den Rechenebenen mit erhöhten Grundwassergeschwindig-

keiten bis zur 12. Ebene durch. Ein kleinerer nordwestlich verlaufender Abzweig der Hauptrinne ist bis zur 10. Rechenebene erkennbar. Diesen Strömungsrichtungen entsprechen Durchlässe im "Ringwall" um den Teilsalzstock (BGR 1990a: Abb. 100).

Die durchgeführten Simulationen von Laufwegen und Laufzeiten von reinen Tracern (Sorptionseffekte werden nicht berücksichtigt) ergeben folgende Werte:

1. Ohne Dispersion der Teilchen:

Startpunkt im Rinnenbereich 187 m unter NN: Fließzeit bis zum Erreichen der Biosphäre im Vorflutgebiet nördlich der Elbe 6.000 Jahre (s. Abb. 4.-5).

Startpunkt im westlichen Teil der Salzstockumwallung 150 m unter NN: Fließzeit bis zu Erreichen der Biosphäre im Westen (Einzugsbereich der Lucie) 6.300 Jahre (s. Abb. 4.-5).

2. Mit Dispersion der Teilchen:

Fließzeiten von verschiedenen Startpunkten aus innerhalb des Hauptzweiges der Gorlebener Rinne bis zum Vorflutgebiet nördlich der Elbe mit Berücksichtigung des Hutgesteins 4.000 - 12.000 Jahre und 6.000 - 17.000 Jahre ohne Berücksichtigung des Hutgestein (s. Abb. 4.-6). Fließzeiten mit Startpunkten im westlichen Nebenzeig der Rinne und Eintritt in die Biosphäre im Einzugsbereich der Lucie betragen 4.000 - 6.000 Jahre (s. Abb. 4.-6).

Die in einer früheren Simulation (BGR 1984b) berechneten Fließzeiten weichen von den neueren Ergebnissen ab. Danach werden Laufzeiten zwischen 770 und 2.540 Jahren, von der Hauptrinne zum nördlichen Vorfluter und 1.550 bzw. 1.570 Jahre von der Nebenrinne zum westlichen Vorfluter angeführt. Mit einer Teilchendispersion berechnete Laufzeiten lagen maximal bei 3.000 Jahren (s. Abb. 4.-7 und 4.-8).

Die berechneten Filtergeschwindigkeiten zeigen in beiden Versionen keine wesentlichen Unterschiede (BGR 1984b: Abb 8.1 - 8.15 und BGR 1987: App. 11.1 - 11.15). Die verwendeten effektiven Porositäten sind in beiden Versionen identisch. Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden nur geringfügig korrigiert. Der Aquifer wurde in der jüngeren Version in zwei Grundwasserleiter aufgeteilt und das Hutgestein neu als Aquifer aufgenommen. Der Hutgesteinsleiter wirkt sich im Modell nur lokal in Teufen unter 150 m zu NN auf die Ergebnisse aus. Er bewirkt dort eine Erhöhung der Filtergeschwindigkeit. Eine Reihe von Korrekturen wurden an einzelnen Modellsäulen vorgenommen (BGR 1987: Abb. 2).

Da diese Diskrepanz der Ergebnisse nicht weiter in den Arbeiten BGR (1987) und BGR (1990a) diskutiert wird, muß vorerst angenommen werden, daß solche Laufzeitunterschiede normale Variationen bei der Modellkalibrierung darstellen. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit für ein geplantes Endlager radioaktiver Stoffe sind aber Laufzeitvariationen zwischen den einzelnen Modellierungen von über 10.000 Jahren keine vernachlässigbare Größen.

Starke Unterschiede in den Filtergeschwindigkeiten bestehen auch zwischen den hier diskutierten Ergebnissen und einer weiteren Modellierung mit dem Programmsystem SWIFT

(BRÜHL 1983). Dort ergeben sich innerhalb der Gorlebener Rinne in 150 m bis 250 m Teufe Abstandsgeschwindigkeiten von 2 bis 7 m/a.

Mit einem vereinfachten Modellaufbau (1344 Diskretisierungszellen und ca. 400 km² Modellfläche) sind weitere Modellierungen mit dem Programmsystem SWIFT von einer Berliner Arbeitsgruppe unter der Leitung von E. BÜTOW durchgeführt worden (PSE 1985b). Ohne näher auf die verwendeten Eingabeparameter einzugehen seien hier nur die Ergebnisse dargestellt:

Maximale horizontale Abstandsgeschwindigkeiten:

- 0 - 10 m u. NN 150 m/a in weichseleiszeitlichem Sediment,
- 10 - 50 m u. NN 8,5 m/a in saaleiszeitlichem Sediment,
- 50 - 150 m u. NN 6 m/a im miozänem Braunkohlensand,
- 150 - 250 m u. NN 2 - 7 m/a in der elstereiszeitlichen Rinnenfüllung.

In einem Detailmodell wurde ein Teibereich der Gorlebener Rinne modelliert (PSE 1985b Abb 5-3), um Laufzeiten für das Grundwasser zu berechnen und die Radionuklidmigration zu simulieren.

Grundwasserlaufzeiten:

Freisetzungsstelle Weißes Moor in 220 m u. NN
Eintritt in die Biosphäre Nähe Löcknitz (Ochsenweide)
Weglänge ca. 10 km.

Drei verschiedene Freisetzungstellen im Bereich einer Diskretisierungszelle mit einer Seitenlänge von 400 m ergaben Laufzeiten von 1.200, 1.700 und 4.100 Jahren.

Die Vereinheitlichung der Korngrößenfraktionen Feinkies bis Feinsand auf einheitlich Mittelsand führte zu einer Laufzeitverlängerung. Die Auswirkungen auf die Laufzeiten durch die Einbeziehung von Grundwasserentnahmen zur Trinkwasserversorgung und Laugenfreisetzungen aus dem Salzstock waren dagegen gering.

Radionuklidmigration:

Neben der Bewegung des Grundwassers wird die Ausbreitung von Nukliden im Deckgebirge des Salzstocks durch die Dispersion, die Sorption und den Freisetzungsverlauf bestimmt.

4.3.2.5 Vergleich der Modellergebnisse mit Messungen in der Natur

Ein Vergleich der Modellergebnisse mit den Messergebnissen der Einbohrlochmethode ist in Tab. 4.-3 dargestellt. Dabei sind die gemessenen Filtergeschwindigkeiten wesentlich höher als die berechneten Werte (im Mittel 2,3 m/a bei der Einbohrlochmethode und 0,5 m/a im Modell). Die Abweichungen in den Fließrichtungen zwischen den direkten Messungen und den Mo-

dellerggebnissen betragen 38 bis 180 Grad. Damit sind die Modellergebnisse über direkte Messungen nicht verifizierbar.

Bis zu einer Teufe von 150 m unter NN stimmen die längerfristig beobachteten Standrohrspiegelhöhen mit denen im Modell berechneten mit einem Fehler von ± 1 m überein. In Teufen unter 150 m ist die Korrelation nicht zufriedenstellend. Die Unterschiede in den Druckhöhen können bis zu ca. 30 m betragen. Als Grund wird die höhere Dichte des versalzenen tieferen Grundwassers angeführt (BGR 1987).

Aus geothermischen Meßdaten lassen sich Aussagen über die Grundwasserbewegungen im Deckgebirge ableiten. Die konvektiven Temperaturfeldanteile von Wärmestrommessungen zeigen in Isothermenschnitten Auf- und Abstromgebiete an. Positive Temperaturanomalien werden von einer aufwärts gerichteten, negative Anomalien von einer abwärts gerichteten Grundwasserströmung erzeugt.

Drei Isothermenschnitte der konvektiven Temperaturverteilung (BGR 1988) in 50, 100 und 150 m unter NN zeigen mehrere zur Teufe hin zunehmende positive Anomalien. Die markanteste positive Anomalie ist am südwestlichen Salzstockrand entwickelt. Hydrogeologische Untersuchungen belegen dort einen Grundwasseraufstrom aus älteren tertiärzeitlichen Schichten. Mehrere kleinere positive Anomalien ziehen sich entlang des nordwestlichen Salzstockrandes. Im Bereich der Gorlebener Rinne sind zwei positive Anomalien entwickelt, die sich erst in 100 bis 150 m Teufe deutlich abzeichnen.

Negative Anomalien sind in den nordöstlichen Randbereichen des Gorlebener Salzstockteils konzentriert. Starke negative Anomalien sind besonders auch im südlichen Rinnenbereich entwickelt.

Ein Vergleich der positiven und negativen Anomalien mit den Modellergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung der auf- und absteigenden Grundwasserströme. Nur die starke positive Anomalie am südwestlichen Salzstockrand ist im Modell unterrepräsentiert.

Die aus den Isothermen berechneten Vertikalgeschwindigkeiten des Grundwassers bis in einen Tiefenbereich von 240 m bewegen sich in der Größenordnung von dm pro Jahr.

Temperaturmessungen in Salzspiegelbohrungen zeigen ausgeprägte Anomalien, die durch Wasserbewegungen im klüftigen Hutgestein verursacht wurden. Weitere Anomalien in den unteren Bohrlochabschnitten werden auf Wärmeleitfähigkeitsunterschiede und auf Lösungseffekte in den Salzgesteinen zurückgeführt.

4.3.3 Modellierung der tiefen Grundwasserbewegung

Neben den quartär- und tertiärzeitlichen wasserleitenden Schichten direkt über dem Teilsalzstock stehen eine Reihe von großräumig verbreiteten Grundwasserleitern mit dem Salzstockrand und seinen Deckschichten in Kontakt (BGR 1990a: Anlage 4-6 und 36). Bis hinunter zum nicht aufgedrungenen zechsteinzeitlichen Salzgestein können die wichtigsten Aquifere in folgenden stratigraphischen Einheiten unterschieden werden (zur näheren Beschreibung der Gesteinsschichten s. 4.1.1):

- Miozän: Braunkohlensand
- Oligozän: Neuengammer Gassand
- Eozän: Brüsselsand
- Oberkreide (Campan bis Santon)
- Malm
- Dogger
- Oberer Keuper: Rhät-Sandstein, Schilfsandstein
- Muschelkalk
- Mittlerer Buntsandstein

- Hutgestein: Residuen von Zechsteinablagerungen und quartärzeitliche Brekzien

Damit Grundwasser in einem Aquifer zirkulieren kann, müssen drei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Das Niederschlagswasser muß in den Aquifer gelangen können (Nährgebiet).
2. Das Grundwasser im Aquifer muß an anderer Stelle die Möglichkeit haben, den Aquifer wieder zu verlassen (Zehrgebiet).
3. Zwischen Nähr- und Zehrgebiet muß eine Potentialdifferenz bestehen.

Bei tieferen Grundwassersystemen können hydraulische Verbindungen zum oberflächennahem Grundwasser vorwiegend über drei Möglichkeiten zustande kommen:

- a) Ausstreichen des Aquifers an der Erdoberfläche.
- b) Verbindungen eines Aquifers zu höheren Grundwasserleitern über Unstetigkeitsflächen wie Verwerfungen und Zerrüttungszonen.
- c) Direkter Kontakt eines Aquifers zu höheren Leitern, z.B. aufgeschleppte tertiäre Schichten am Salzstockrand, Diskordanzen.

Auch Kombinationen dieser Möglichkeiten können Wasserwegsamkeiten zum oberflächennahem Grundwassersystem schaffen.

In einer hydraulischen Modelluntersuchung (BGR 1984a) werden Berechnungen zur tiefen Grundwasserbewegung durchgeführt. Die in dieser Arbeit als Prinzipienmodelle bezeichneten zwei Profile zeigen, daß tiefes Grundwasser aus mehreren zehner km Entfernung, aus dem Elm und der Luisen Höhe, in Richtung Salzstock Gorleben-Rambow transportiert wird und am Salzstockrand aufsteigen kann, wenn dort Wegsamkeit angenommen wird.

Die Filtergeschwindigkeiten betragen horizontal Zentimeter bis Dezimeter pro Jahr (z.T. $> 1\text{m/a}$ Strecke Elm-Bodenteich), und die Aufstiegsraten am Salzstockrand liegen im Bereich Zentimeter pro Jahr. Dabei werden für das Profil, das im Süden am Elm endet, die folgenden tiefen Grundwasserleiter in das Modell mit einbezogen:

- Schichten des Muschelkalkes (gut durchlässig) und des Rhät (durchlässig), die am Elm flächenhaft ausstreichen.
- Kalkstein des Malms (durchlässig), der im Gifhorner Trog an der Quartärbasis ausstreicht
- Serien der Oberkreide (Cenoman - Santon, durchlässig), die über den wechselnd bis schwach durchlässigen Wealden-Schichten mit dem malmzeitlichen Aquifer verbunden sind.

Die oberflächennäheren Grundwasserleiter der tertiären Schichten, die mit den teilweise sehr gut durchlässigen Schichten des Quartär in Verbindung stehen, werden besonders in einem W-E Profil (Luisen-Höhe-Salzstockteil Gorleben) modelliert. Die Filtergeschwindigkeiten liegen in der Größenordnung von Metern pro Jahr im Quartär und im tieferen Tertiär von Zentimetern pro Jahr (BGR 1984: S. 9). Die Geschwindigkeiten für die tertiären Serien erscheinen zu gering im Vergleich zu Messungen im Raum Hamburg. Dort werden Filtergeschwindigkeiten im Braunkohlensand und Kaolinsand von Metern bis Dezimetern pro Jahr angegeben. Die geologische Situation und die Tiefenlage der Serien ist vergleichbar mit der Situation in den Randsenken des Salzstockteils Gorleben (DVWK 1987: S. 190).

Beide Profile laufen westlich des Salzstocks zusammen und enden gemeinsam an dessen westlichem Rand.

Modelliert wird mit einem zweidimensionalen Differenzenverfahren unter Annahme konstanter Dichte, Temperatur und dem Ausschluß horizontaler Strömungskomponenten senkrecht zur Profilebene. Weiterhin wird angenommen, daß alle Grundwasserleiter Porenaquifere sind und das Darcysche Gesetz anwendbar ist. Die oben angeführten Grundwasserleiter außer den tertiärzeitlichen sind Festgesteinsaquifere. Die tertiären Leiter liegen teilweise als Festgestein vor. Damit strömt das Grundwasser in diesen Leitern vorwiegend auf Klüften und nicht laminar in Poren wie bei Lockergestein; das Darcysche Gesetz ist deshalb nicht exakt anwendbar. Da aber ein großräumiger Modellraum vorliegt, ist der daraus resultierende Fehler möglicherweise gering.

In der Umgebung des Teilsalzstocks Gorleben sind mehrere Verwerfungen und tektonische Gräben entwickelt, die als Zuflußkanäle für Grundwasser in tiefere Leiter dienen können (s.

4.1.2). Für diese Möglichkeiten fehlen Modellprofile vom Salzstock nach Norden und Nordwesten. Über Verwerfungen können auch hydraulische Verbindungen zu Grundwasserleitern der Buntsandsteinschichten bestehen, die nicht in die Modellierung mit einbezogen wurden.

In der weiteren Umgebung des Salzstockes Gorleben-Rambow sind weitere geologische Bauseinheiten vorhanden, die neben dem Elm oberflächennah (z. T. mit Lockergesteinsbedeckung) ausstreichende mesozoische Gesteinseinheiten aufweisen:

- **Flechtinger Scholle** (Flechtinger Höhenzug ca. 80 km südlich von Gorleben): An ihrer nördlichen Randstörung sind mesozoische Schichten aufgebogen (Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper), die bei Haldensleben unter quartärzeitlichen Lockersedimenten anstehen.
- **Scholle von Calvörde** (ca. 60 km südlich von Gorleben), nördlich der Flechtinger Scholle gelegen: Diese Scholle ist gänzlich von quartärzeitlichen Sedimenten bedeckt. Auch hier sind mesozoische Schichten an ihrer Nordrandverwerfung bei Gardelegen aufgebogen.
- Am **Salzstock Altmersleben** (ca. 40 km südlich Gorleben) sind bei Kalbe Serien des Muschelkalkes an der Oberfläche aufgeschlossen.

Diese potentiellen Grundwasserneubildungsgebiete für das tiefe Grundwasser in den mesozoischen Festgesteinsschichten liegen näher zu Gorleben als der Elm. Das nach Norden fließende Grundwasser wird weniger durch die Hochlagen anderer Salzstöcke behindert als bei der modellierten Route.

Da die erwähnten Gebiete auf dem Gebiet der ehemaligen DDR liegen, ist hierin vielleicht der Grund für die fehlende Einbeziehung in die Untersuchungen (Modellierungen) zu sehen. Unverständlich bleibt in jedem Fall, daß ohne nähere Prüfung von einer Vernachlässigbarkeit der tiefen Grundwasserbewegung ausgegangen wird (BGR 1990a: S. 341).

Die meisten tieferen Aquifere sind gespannte bis halbgespannte Leiter, wobei eine eindeutige Zuordnung des Gefälles der Grundwasserdruckfläche zum Gefälle der Geländeoberfläche nicht gegeben ist. Modellierungen auch in anderen Richtungen erscheinen da sinnvoll, wo Wasser in tiefere Bereiche gelangen kann.

Der gegenteilige Fall des tiefen Grundwasserabstroms vom Salzstock weg ist nicht in Betracht gezogen worden. Es besteht aber die Möglichkeit, daß versalzenes und dadurch spezifisch schwereres Grundwasser über den Salzstockrand an Zerrüttungszonen weiter absinkt und in tiefere Festgesteinsaquifere eindringt.

Auch Temperaturmessungen in der Bohrung Konrad 101 (BGR 1988) deuten auf Wasserwegsamkeiten in tiefen Kluffleitern hin. Speziell an der Basis des Korallenooliths im Teufenbereich zwischen 740 - 778 m und im Bajocium in 928 m Teufe sind dort Wasserbewegungen in Klüften und an einer Einzelkluft gemessen worden.

Die angeführten Untersuchungen bzw. Modellierungen zur Hydraulik der tiefen Grundwasserbewegung (BGR 1984 a) werden als Prinzipienmodelle bezeichnet, die über zwei spezielle Profile einen geringen (aber möglichen) Ferntransport von Grundwasser zum Salzstock hin belegen. Weitere Arbeiten zu diesem Thema liegen nicht vor.

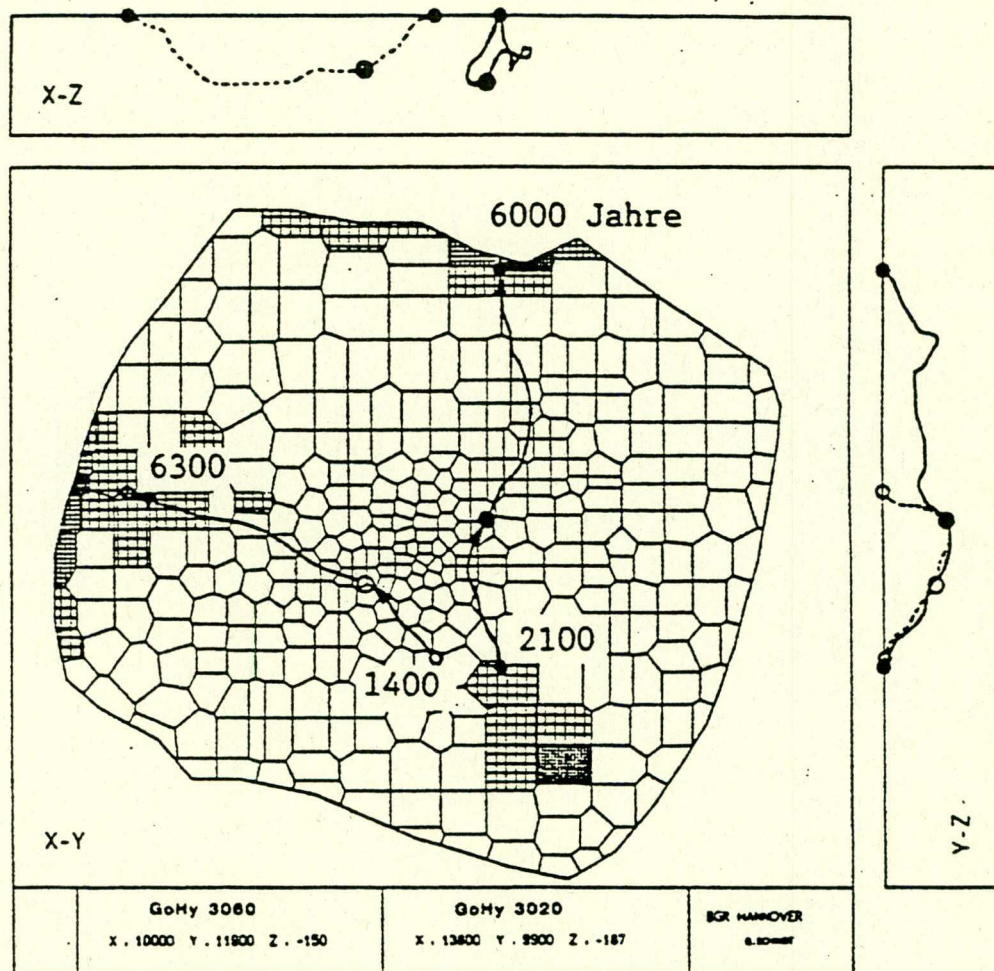


Abb. 4.-5: Berechnete Fließwege und Fließzeiten für zwei ausgewählte Startpunkte (Quelle: BGR 1987)

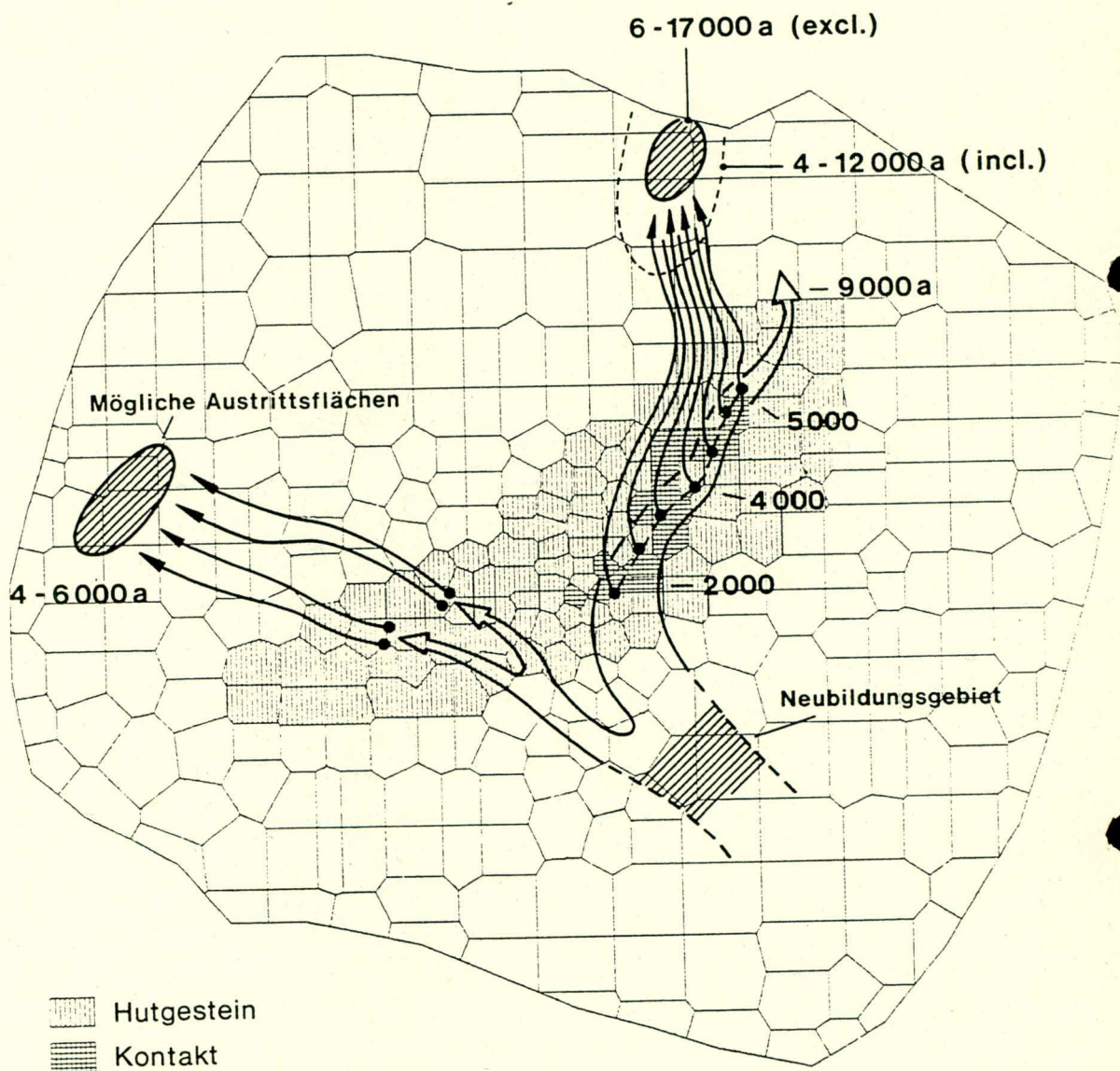


Abb. 4.-6: Modellalter des Grundwassers im Rinnenbereich und Fließzeiten bis zum Erreichen der Biosphäre von Aufpunkten an der Aquiferbasis ohne (excl.) und mit (incl.) Berücksichtigung des Hutgesteins (Quelle: BGR 1990a)

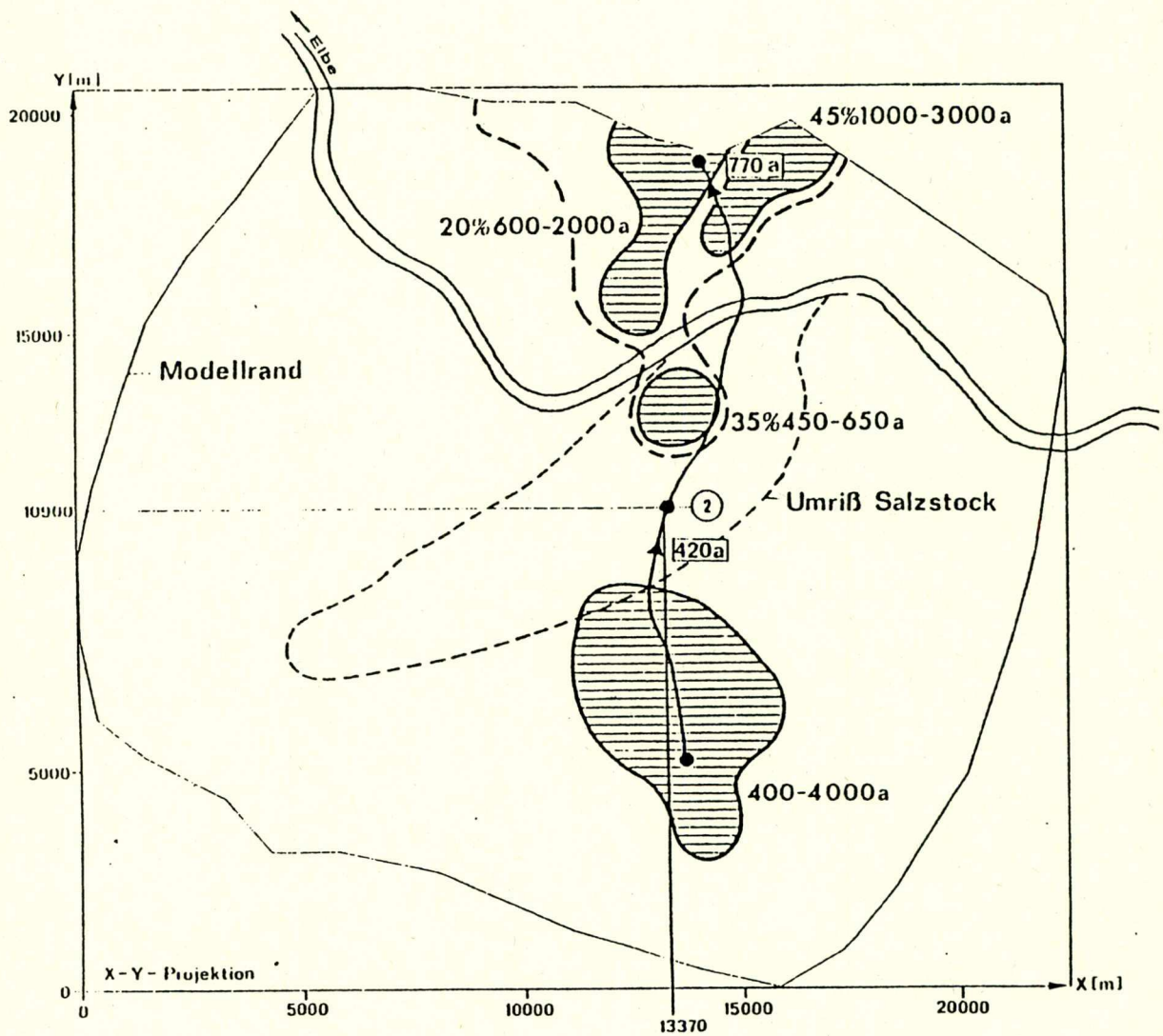


Abb. 4.-7: Modellierte Grundwasserströmungswege und -laufzeiten nach einem Verfahren der zufälligen Wege (Quelle: BGR 1984b)

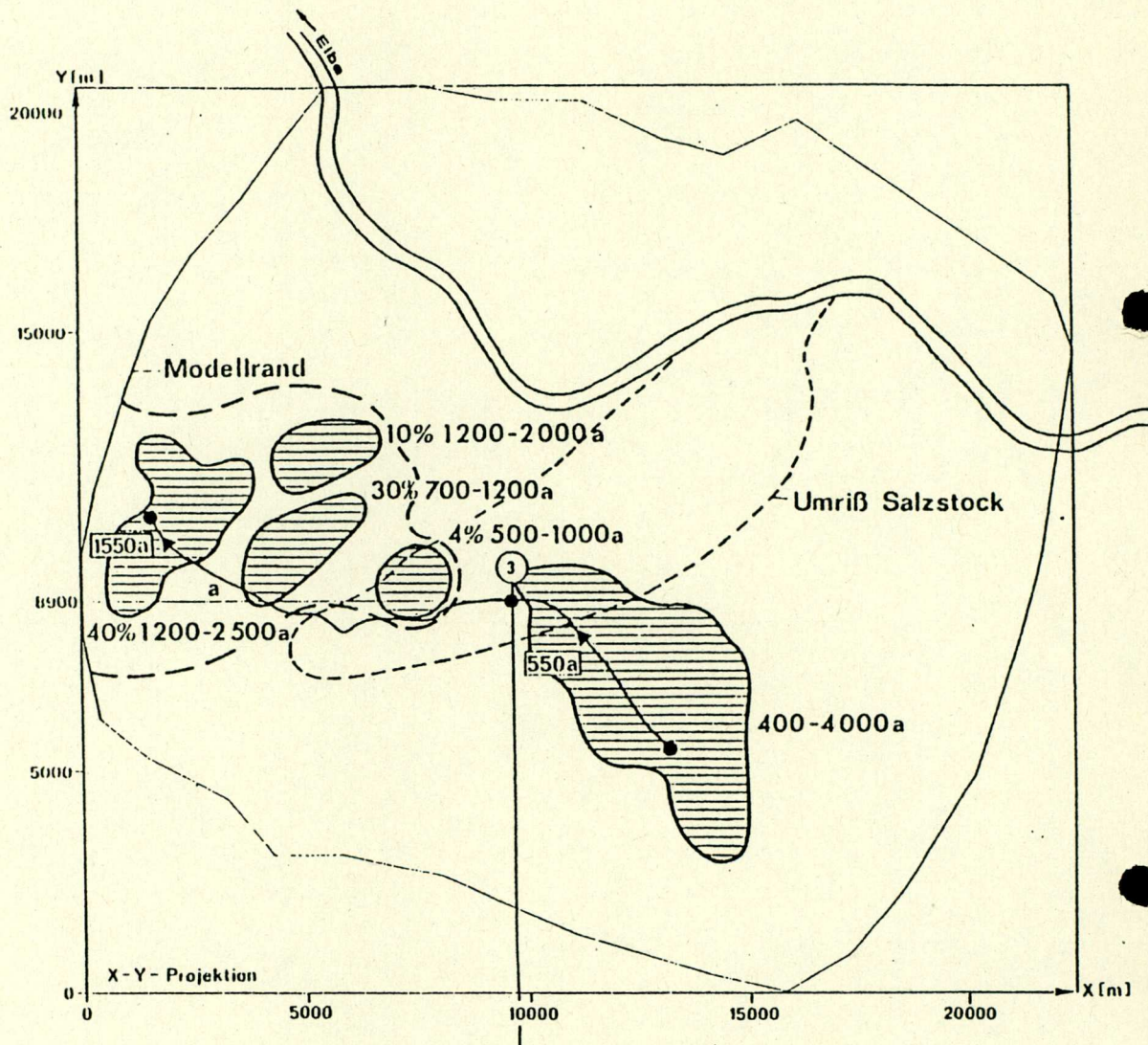


Abb. 4.-8: Modellierte Grundwasserströmungswege und -laufzeiten nach einem Verfahren der zufälligen Wege (Quelle: BGR 1984b)

	-275		-250		-225		-200		-175		-150		Teufe in m zu NN
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	Variante
5	---	5	36	38	77	82	109	107	103	101	43	43	
6	---	3	9	25	64	64	101	101	85	86	28	35	
33	---	12	22	25	47	43	59	52	56	50	28	27	
55	---	9	20	34	34	45	37	43	43	43	43	42	
56	---	0	26	22	48	37	47	49	28	30	3	1	
90	0	15	26	28	37	29	29	31	25	25	28	28	
240	---	14	17	14	27	32	43	38	38	34	11	10	
243	---	14	10	12	24	28	29	28	42	40	5	5	
245	---	25	---	12	13	18	47	46	38	36	15	14	
250	---	7	2	6	16	17	27	29	23	23	6	6	
249	0	4	4	4	24	22	33	29	49	47	10	10	

Knoten N

a : Variante EXCL (ohne Hutgestein)
b : Variante INCL (mit Hutgestein)

Tab.: 4.-1: Horizontale Filtergeschwindigkeiten (cm/Jahr) im Rinnenbereich und hydraulischer Einfluß des Hutgesteins auf das modellierte Gesamtsystem (Quelle: BGR 1987)

Rechenebene m zu NN	----- HORIZONTAL -----			----- VERTIKAL -----		
	Mittel	Maximum	Knoten	Mittel	Maximum	Knoten
15	540	1600	66	10	50	93
-15	210	840	4	8	50	35
-45	150	1100	236	6	50	8
-75	80	660	11	4	60	4
-100	50	630	11	3	30	4
-125	40	240	4	2	15	103
-150	30	130	87	1	10	103
-175	20	100	5	1	10	102
-200	15	100	5	< 1	10	102
-225	10	80	34	< 1	5	102
-250	10	50	143	< 1	2	90 +++
-275	5	25	245	< 1	2	90 +++
-300	4	30	240	< 1	1	90 +++
-325	4	15	249	< 1	< 1	250 +++
-350	2	5	140	< 1	< 1	142

Tab. 4.-2: Berechnete Filtergeschwindigkeiten (cm/Jahr) mit Berücksichtigung des Hutgesteins (Quelle: BGR 1987)

Einbohrlochmethode /5/ -----				Modellergebnisse -----					
Pegel	Flurabstand	Modellvariante :				EXCL		INCL	
		V	R	Knoten	Teufe	V	R	V	R
	m	m/a	-	m u. NN		m/a	-	m/a	-
132	162	0.7	242	172	150	0.1	280	0.1	280
333	117	1.8	75	168	100	0.3	300	0.3	300
562	122	0.7	325	15	125	1.4	10	1.5	10
563	243	3.3	292	15	225	0.2	40	0.2	40
893	114	2.6	54	161/2	100	0.4	280	0.4	280
1162	138	0.7	348	240	125	0.6	20	0.5	20
1272	198	5.9	19	23	175	0.5	280	0.5	300
1303	265	2.2	321	91	250	-	-	0.1	360
2222	199	2.9	33	16	200	0.3	320	0.2	330
2323	179	2.9	260	92	175	0.7	20	0.5	20
2327	195	1.5	349	92	200	0.6	20	0.4	10
Mittelwerte :		2.3	340			0.5	340	0.5	340

/5/ GSF-Muenchen

Tab. 4.-3: Vergleich beobachteter und berechneter Filtergeschwindigkeiten v und Fließrichtungen R (Quelle: BGR 1987)

4.4 Physikalische und chemische Eigenschaften des Grundwassers - Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben

4.4.1 Grundwassermeßstellennetz

Im Rahmen des hydrogeologischen Untersuchungsprogramms Gorleben wurden von 1979 - 1984 auf einer Fläche von ca. 300 km² 326 Grundwassermeßstellen eingerichtet (BGR 1990a) [322 Pegelbohrungen, 4 Brunnen für Langzeitpumpversuche (BfS 1990); nach PICKEL (1979-1986): 357 Grundwassermeßstellen]. Die Grundwassermeßstellen wurden in den verschiedenen Horizonten des Deckgebirges und in den angrenzenden Randsenken des Teilsalzstockes Gorleben niedergebracht. Sie sind überwiegend zwischen 10 und 280 m tief. Der größte Teil der Grundwassermeßstellen befindet sich im Bereich des Deckgebirges, in den angrenzenden Bereichen des Teilsalzstockes (nördliche und südliche Randsenke) sind die wenigsten niedergebracht. Die Lage der Grundwassermeßstellen ist in dem Lageplan der Bohrpunkte, BGR (1990a), Anlage 14 eingetragen. Zu dem gewählten Raster der Grundwassermeßstellen gibt es keine nähere Begründung in den bislang vorliegenden Unterlagen.

Die Grundwassermeßstellen wurden derart in Gruppen um die Aufschlußbohrung angeordnet, daß die wichtigsten Wasserleiter und Bereiche mit unterschiedlichem Salzgehalt des Grundwassers erfaßt sind (BGR 1990a). Eine Übersicht über die verschiedenen stratigraphischen Einheiten und Tiefenstufen, in denen die Grundwassermeßstellen eingerichtet wurden, geben Tabellen 4.-4 und 4.-5 (aus BGR 1990a).

Im Verlauf des hydrogeologischen Untersuchungsprogramms ergab sich der Verdacht auf technische Mängel vor allem bei den Grundwassermeßstellen, die in tieferen Bereichen ausgefiltert waren (s. PICKEL 1979-1986 u. SCHELKES & VIERHUFF 1983). Die betroffenen Meßstellen wurden ausgebessert und die Arbeiten dazu 1985 abgeschlossen.

Die Meßstellen wurden im Abstand von ein bis drei Jahren für routinemäßige Untersuchungen bzw. für Sonderuntersuchungen abgepumpt. In den Jahren von 1979 - 1988 wurden insgesamt 1087 Kurzpumpversuche durchgeführt (BGR 1990a).

Die Grundwassermeßstellen wurden für folgende Untersuchungen errichtet:

- Entnahme von Wasserproben aus festgelegten Horizonten für chemische Analysen sowie Isotopen- und Dichtebestimmungen,
- Messungen von Standrohrspiegelhöhen (Grundwasserstände),
- Durchführung von Sonderuntersuchungen, z.B. Messungen zur Grundwasserbewegung (Ein-Bohrlochmessungen),

- Durchführung von geophysikalischen Bohrlochmessungen, z.B. Wasserleitfähigkeit, Temperatur, Induktion, Porenwasserdruck.

Stratigraphie der Filterstrecke	Anzahl	Teufenbereich Filteroberkante unter GOK (m)	Enddurchmesser in Zoll					Arithm. Mittelwert der elektr. Leitfähigkeit ($\mu\text{S/cm}$)	Anzahl der Ausbesserungen	Anzahl der Salinometermessungen	Anzahl der Kurzpumpversuche
			1	2	4	4,5	10				
Quartär-Weichsel (qw)	59	3-26	-	3	56	-	-	370	2	20	195
Quartär-Saale (qs)	74	10-167	6	29	37	1	1	4400	25	169	244
Quartär-Elster (qe)	100	39-266	13	58	8	19	2	67000	63	471	336
Quartär-Präelster (qpe)	22	120-235	-	10	4	7	1	63000	9	98	67
Tertiär-Miozän (tmi)	53	22-215	2	29	22	-	-	9000	20	99	193
Tertiär-Oligozän (tol)	5	130-208	-	2	3	-	-	14000	2	12	12
Tertiär-Eozän (teo)	10	142-550,5	-	6	2	1	-	123000	6	52	29
Hutgestein	3	155,5-267	-	1	3	-	-	109000	1	25	11
Gesamt	326		21	128	135	28	4		128	946	1087

Tab. 4.-4: Grundwassermeßstellen, gegliedert nach stratigraphischen Einheiten (Quelle: BGR 1990a)

Tiefe der Filteroberkante unter GOK (m)	Anzahl	Enddurchmesser in Zoll					Arithm. Mittelwert d. elektr. Leitfähigkeit ($\mu\text{S/cm}$)	Anzahl der Ausbesserungen	Anzahl der Messungen der elektr. Leitfähigkeit	Anzahl der Kurzpumpversuche
		1	2	4	4,5	10				
0-50	96	2	10	84	-	-	780	7	68	314
50-100	71	11	35	21	3	1	2700	28	183	239
100-150	64	6	37	16	5	-	17000	35	213	215
150-200	54	2	27	8	15	2	50000	29	239	178
200-250	36	-	27	4	4	1	152000	27	219	127
> 250	5	-	2	2	1	-	207000	2	24	14
Gesamt	326	21	138	135	28	4		128	946	1087

Tab. 4.-5: Grundwassermeßstellen, gegliedert nach Tiefenstufen (Quelle: BGR 1990a)

4.4.2 Untersuchungsprogramm und Untersuchungsumfang

Die hydrogeologischen Untersuchungen umfassen folgende Einzelprogramme:

- Betriebsüberwachungsprogramm,
- Beweissicherungsprogramm,
- Hydrochemische Untersuchungen,
- Hydrochemische Sonderuntersuchungen (WESSELOW 1992).

Betriebsüberwachungs- und Beweissicherungsprogramm sind spezielle Untersuchungsprogramme, die für die generellen chemischen und physikalischen Eigenschaften des Grundwassers keine Hinweise liefern. Im folgenden wird daher auf sie nicht weiter eingegangen.

Feldanalysen

Im Rahmen der Untersuchungen werden parallel zur Entnahme von Wasserproben physikalisch-chemische Feldanalysen durchgeführt. Die Dokumentation der Grundwasserspiegelabsenkungen und der physikalisch-chemischen Feldparameter erfolgte durch das Büro Dr. Pickel und DBE (BGR 1990a). Das Beprobungsprogramm wurde zunächst vom Büro Dr. Pickel durchgeführt. Seit 1982 wurden die feldwasseranalytischen Arbeiten zunehmend von der DBE übernommen. Die feldwasseranalytischen Arbeiten beinhalten folgende Tätigkeiten:

- Abpumpen und Beprobung der Grundwassermeßstellen,
- Durchführung von repräsentativen Feldwasseranalysen für eine weiterführende Auswertung fachbeteiligter Institute,
- Wasserprobennahme für interne und externe Laboranalysen,
- Dokumentation und Bereitstellung von hydrochemischen Grunddaten für das gesamte geowissenschaftliche Untersuchungsprogramm.

Bei der Feldwasseranalyse werden folgende Parameter berücksichtigt (nach WESSELOW 1992):

- | | |
|--|-----------------------|
| - Wassertemperatur | - Kohlendioxid |
| - pH-Wert | - Schwefelwasserstoff |
| - Redoxpotential (im Durchfluß) | - Hydrogenkarbonat |
| - Redoxpotential (im Filterbereich) | - Gesamthärte |
| - freier Sauerstoff (im Durchfluß) | - Karbonathärte |
| - freier Sauerstoff (im Filterbereich) | - Nichtkarboanthärte |
| - elektrische Leitfähigkeit | - Gesamteisen |

Eine Übersicht über den zeitlichen Ablauf und die ausführenden Institutionen für Probenahme und Feldanalyse im Rahmen hydrochemischer Routine- und Sonderprogramme gibt Abb. 4.-9 (aus WESSELOW 1992, Blatt 10).

Hydrochemische Untersuchungen

Die hydrochemischen Analysen der Wasserproben erfolgten seit Beginn des Untersuchungsprogramms (1980) im Labor des Büros Dr. Pickel, seit 1987 werden die Proben im Labor des BGR analysiert¹. Insgesamt liegen 1.916 Analysen vor (BGR 1990a), dabei wurde jede Meßstelle soweit möglich mindestens zweimal beprobt, in einigen Fällen wurden bis zu 6 Grundwasserproben entnommen (BAUMANN 1989). Sofern fast jede Meßstelle höchstens zweimal beprobt wurde, läßt sich über die zeitliche Änderung der Grundwasserbeschaffenheit keine Aussage treffen.

Für die chemischen Analysen der Wasserproben wurden routinemäßig folgende Parameter berücksichtigt:

pH-Wert, Leitfähigkeit (Lf), Abdampfrückstand (bei einigen Proben), KMnO_4 -Verbrauch, Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , Br^- , J^- (einige Proben), $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , NO_3^- .

Ab 1984 wurden in größerem Umfang Sonderanalysen unter Berücksichtigung folgender zusätzlicher Parameter angefertigt:

Al^{3+} , Ba^{2+} , Bor, F^- , Silikat, PO_4^{3-} .

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse erfolgte unter den Gesichtspunkten:

- Untersuchung der statistischen und teufenabhängigen Verteilung der Grundwassermineralisation und verschiedener hydrochemischer Grundwassertypen;
- Ableitung von Grundwassertypen durch Bestimmung von Äquivalent-Verhältnissen von Ionenpaaren und deren relative Änderungen mit steigendem Versalzungsgrad ;

¹ Im Jahre 1990 wurde an zehn Wasserproben aus Meßstellen des hydrogeologischen Untersuchungsprogrammes ein Laboratoriumsvergleich zwischen den Wasserlaboratorien durchgeführt. Der Vergleich diente der Qualitätskontrolle der bisher vorliegenden Analysen und sollte insbesondere Aufschluß darüber geben, inwieweit durch den Übergang der Wasseranalytik vom Labor PICKEL an die BGR im Jahre 1987 eine Vergleichbarkeit der Analysenergebnisse beider Labors gewährleistet ist. Die Auswertung zeigt zum Teil erhebliche Abweichungen der Analysenergebnisse der beteiligten Laboratorien untereinander, wobei qualitative Mängel des Labors HARRES PICKEL CONSULT deutlich wurden. Der Laboratoriumsvergleich macht nach KLINGE & WIPPERMANN (1993) deutlich, "daß eine ausreichende Qualität der Wasseranalysergebnisse nicht von vornherein als gegeben angenommen werden kann, sondern durch eine laufende Qualitätskontrolle nachgewiesen werden muß".

Probenahme und Feldanalyse im Rahmen Hydrochemischer Routine- und Sonderprogramme

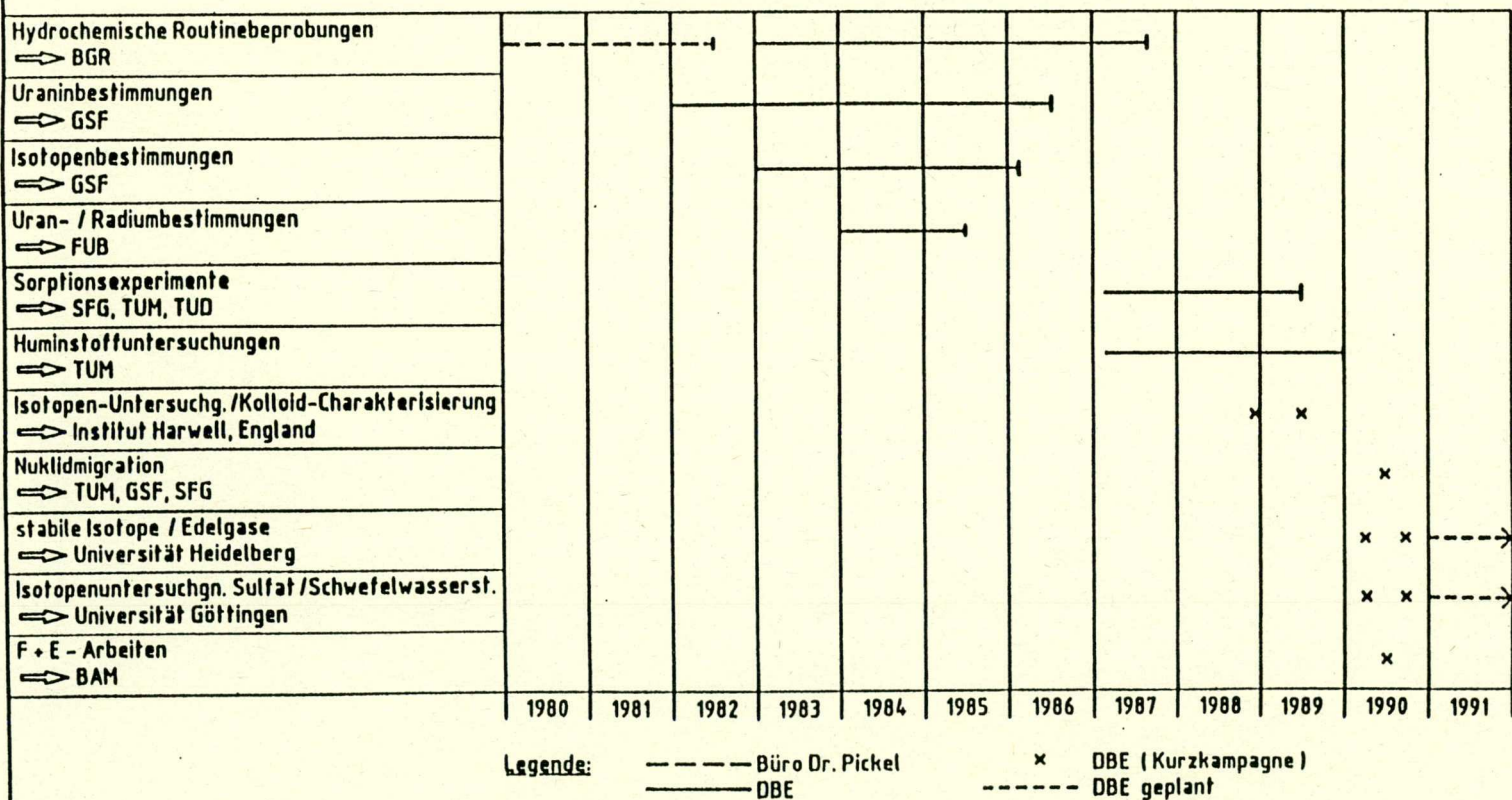


Abb. 4.-9: Probenahme und Feldanalysen im Rahmen hydrochemischer Routine- und Sonderprogramme (Quelle: WESSELOW 1992)

- Betrachtung möglicher Lösungs- und Fällungsreaktionen mit Hilfe von thermodynamischen Gleichgewichtsrechnungen sowie die Berechnung von Mischungsreihen zwischen Wässern mit unterschiedlichem Versalzungsgrad (BAUMANN 1989).

Für die Weiterführung der Grundwasserbeobachtung für den Rest der Projektplanungsphase ab 1992 hat die BGR (1990b) ein Grobkonzept für ein Meßprogramm mit reduziertem Aufwand (Anzahl der in die Untersuchung einbezogenen Meßstellengruppen wird reduziert) vorgelegt. Das Meßprogramm soll nach BGR (1990b) folgende Aufgaben erfüllen:

1. Beobachtung der zeitlichen Änderungen von Beschaffenheit und Druck des Grundwassers über dem Endlager und im nahen Abstromgebiet zur genaueren Charakterisierung potentieller Fließwege.
2. Erfassung von mittelfristigen Trends bei der Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit und den Schwankungen der Grundwasserhöhen.
3. Nachweis der großräumigen Stabilität des Grundwasserfließfeldes und der geogenen Grundwasserbeschaffenheit.

Hydrochemische Sonderuntersuchungen

An hydrochemischen Sonderuntersuchungen durch externe Auftragnehmer wurden bisher durchgeführt (Zusammenstellung aus WESSELOW 1992, Blatt 8 und Ergänzungen aus BGR 1990a, PICKEL 1979-1986, KIM 1987-1989):

Sonderuntersuchung: Uraninbestimmung
Auftragnehmer: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Institut für Radiohydrometrie
Parameter: Uranin
Umfang:
Zeitraum: -1985 einschließlich
Zweck: Überprüfung auf Spülrückstände
Quelle:

Sonderuntersuchung: Isotopenuntersuchungen
Auftragnehmer: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Institut für Radiohydrometrie
Parameter: ^2H , ^{18}O
Umfang: 63 Meßstellen (^2H), 258 Meßstellen (^{18}O)
Zeitraum:

Zweck: Altersbestimmung des Grundwassers
 Quelle: in Zwischenberichten Büro Dr. Pickel fortlaufend dokumentiert

Sonderuntersuchung: natürliche Radium- und Urangehalte
 Auftragnehmer: Freie Universität Berlin, Institut für angewandte Geologie
 Parameter:
 Umfang:
 Zeitraum:
 Zweck:
 Quelle:

Sonderuntersuchung: Huminstoffuntersuchungen
 Auftragnehmer: Technische Universität München, Institut für Radiochemie
 Parameter: pH-Wert, Redoxpotential (E_H), Leitfähigkeit (Lf)
 DOC, Huminsäure, Fulvinsäure
 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}
 Cl^- , Br^- , F^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^-
 Spurenelemente
 Umfang: 185 Proben
 Zeitraum: - 1989
 Zweck: Einfluß von Huminstoffen auf Radionuklidmigration
 Quelle: KIM 1987-1989

Sonderuntersuchung: Sorptionsexperimente
 Auftragnehmer: - Staatliches Forschungsinstitut für Geochemie Bamberg
 - Technische Universität Darmstadt
 - Technische Universität München, Institut für Radiochemie
 Parameter:
 Umfang:
 Zeitraum:
 Zweck:
 Quelle:

Sonderuntersuchung: Nuklidmigration
 Auftragnehmer: - Technische Universität München, Institut für Radiochemie
 - Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Institut für Radiohydrometrie
 - staatliches Forschungsinstitut für Geochemie Bamberg
 Parameter:
 Umfang:
 Zeitraum:
 Zweck:
 Quelle:

Sonderuntersuchung: Grundlagenexperimente zum Sorptionsverhalten an Huminstoffwässern

Auftragnehmer: Institut Harwell, England

Parameter:

Umfang:

Zeitraum:

Zweck:

Quelle:

Sonderuntersuchung: F+E-Arbeiten

Auftragnehmer: Bundesamt für Materialprüfung Berlin

Parameter:

Umfang:

Zeitraum:

Zweck:

Quelle:

Sonderuntersuchung: Isotopenbestimmung und Bestimmung von Edelgasen

Auftragnehmer: Universität Heidelberg, Institut für Umweltphysik

Parameter: He, Ne, Ar, Kr, Xe

^3H , ^{13}C , ^{14}C

Umfang: 76 Proben (für ^3H , ^{13}C , ^{14}C)

Zeitraum: 1979-1985

Zweck: Altersbestimmung des Grundwassers

Quelle: Isotopenhydrologische Untersuchungen an Grundwässern aus Gorleben, Bericht Universität Heidelberg

Sonderuntersuchung: Isotopenuntersuchungen an Sulfat und Schwefelwasserstoff

Auftragnehmer: Universität Göttingen, Institut für Geochemie

Parameter:

Umfang:

Zeitraum:

Zweck:

Quelle:

Sonderuntersuchung: Isotopenuntersuchung des Schwefels

Auftragnehmer: Universität Karlsruhe, Institut für Petrographie und Geochemie

Parameter: ^{34}S

Umfang: 20 Meßstellen

Zeitraum:

Zweck: Herkunft von Evaporitabfolgen

Quelle: 29. Zwischenbericht Büro Dr. Pickel

Auf Ergebnisse der Sonderuntersuchungen wird hier nur eingeschränkt eingegangen. Zum Teil standen die entsprechenden Berichte nicht zur Verfügung, oder es liegen noch keine Berichte vor, da die Daten aus den Sonderuntersuchungen noch nicht ausgewertet worden sind (z.B. Isotopenuntersuchungen des Schwefels).

4.4.3 Chemische Beschaffenheit des Grundwassers

Die Grundwässer in den Deckschichten des Teilsalzstockes Gorleben enthalten unterschiedliche Mengen an gelösten Stoffen. Die Gesamtversalzung zeigt eine deutliche Tiefenabhängigkeit. Im Bereich von 0 bis 50 m GOK wurden fast ausschließlich Süßwässer angetroffen, während mit zunehmender Tiefe höher mineralisierte Wässer in der Reihenfolge Brackwasser - Salzwasser - Sole auftreten. Nach BGR (1990a) wird anhand der Gesamtkonzentration an gelösten Bestandteilen folgende Typisierung des Grundwassers vorgenommen:

Süßwasser:	< 1.000 mg/l
Brackwasser:	1.000 - 10.000 mg/l
Salzwasser:	10.000 - 100.000 mg/l
Sole:	> 100.000 mg/l

Die Grenzen zwischen Salz- und Süßwasser sind nicht einheitlich. Entgegen der Tendenz, vor allem oberflächennah Süßwasser anzutreffen und stärker versalzene in größerer Tiefe, gibt es in der nördlichen und südlichen Randsenke des Teilsalzstockes zwei Bereiche, in denen Süßwasser auffallend tief hinunterreicht (s. Abb. 4.-10). Hier erreicht die Süß-/Salzwassergrenze ihre größte Tiefenlage mit etwa 200 m unter GOK. Über einigen Bereichen des Teilsalzstockes, vor allem in einem Bereich südlich von Gorleben, ist Salzwasser in geringer Tiefe (< 50 m) anzutreffen (Salzwasserfahne). An einigen Stellen wurde beobachtet, daß geringer mineralisiertes Grundwasser von höher mineralisiertem überschichtet wird (PTB 1983; s. auch Abb. 4.-10). Die Ursache hierfür konnte bislang nicht ermittelt werden.

Darüber hinaus treten in fünf abgegrenzten Teilbereichen im Bereich und in der Umgebung des Teilsalzstockes Gorleben örtliche Versalzungen des oberflächennahen Grundwassers auf (BROSE & BRÜHL 1986, BROSE 1991). In der Abb. 4.-11 sind die lokalen Versalzungszone eingetragen. Im Bereich des Teilsalzstockes Gorleben befinden sich Versalzungszone westlich der Ortschaft Marleben und östlich von Gorleben zwischen Gorleben und Meetschow.

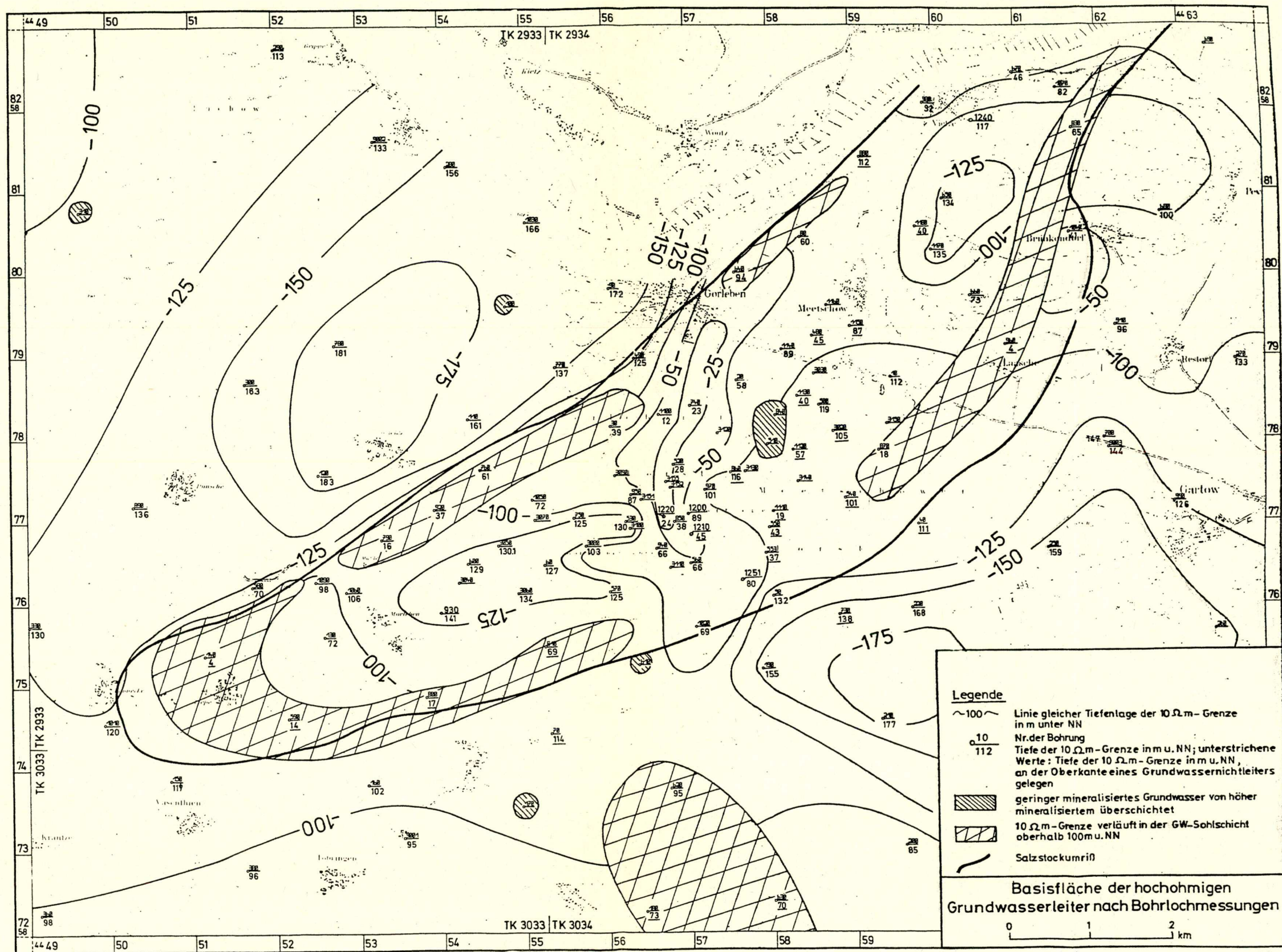


Abb. 4.-10: Basisfläche der hochohmigen Grundwasserleiter nach Bohrlochmessungen (Quelle: PTB 1983)

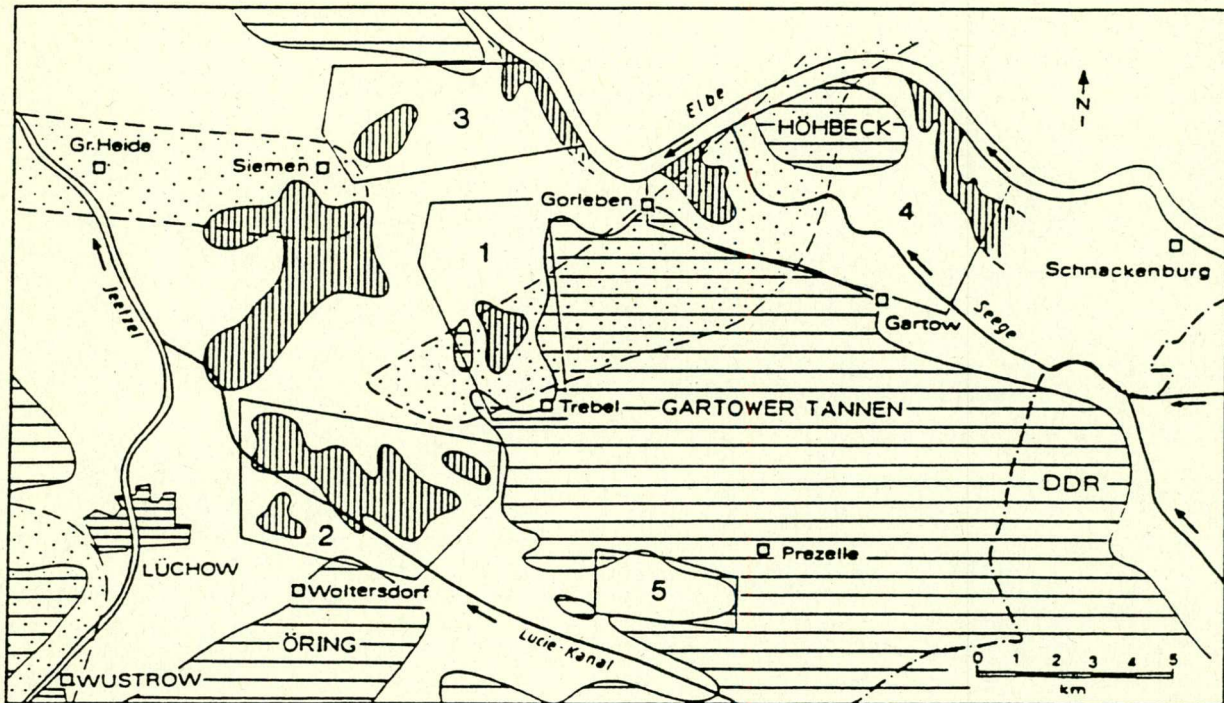


Abb. 4.-11: Versalzungszone im Raum Gorleben - Untersuchungsgebiete 1-5 [punktiert: Salzstöcke, waagrecht schraffiert: Geländehöhen über 21 m NN, senkrecht schraffiert: Grundwasserversalzungszone] (Quelle: BROSE & BRÜHL 1986)

Bei der engeren Versalzungszone westlich von Marleben handelt es sich um einen 2 km langen Streifen, der auffällig dem Verlauf des südöstlichen Randgrabens folgt. Die Verteilung der Na- und Cl-Gehalte im Bereich der Versalzungszone deuten auf zwei getrennte, örtlich sehr begrenzte Aufstiegepfade hin. Eine Abhängigkeit des NaCl-Gehaltes vom Klimageschehen konnte in den tieferen Meßstellen (3-4 m) im oberflächennahen Grundwasser nachgewiesen werden, "die eine deutliche Dynamik des Tiefenwasseraufstiegs belegen" (BROSE 1991). Temperaturmessungen belegen in diesem Bereich eine aufwärtsgerichtete Grundwasserströmung (s. 4.3.2.5 und Abb. 4.-16).

Die engere Versalzungszone im Bereich Gorleben/Marleben beschränkt sich auf ein schmales, parallel zum Gorlebener Bach verlaufendes Band. Für diese Versalzungszone nimmt BROSE (1991) einen sehr eng begrenzten Aufstiegepfad innerhalb der horizontal und vertikal sehr unregelmäßig aufgebauten Gorlebener Rinne an. Eine Abhängigkeit vom Klimageschehen ist nicht gegeben.

Durch die Untersuchungen von BROSE (1991) konnte belegt werden, daß als Ursache für die Versalzungserscheinungen der Aufstieg salzhaltiger Tiefenwässer in den tiefsten Bereichen der Niederungen zu sehen sind. Dabei kommt es zur Vermischung mit den oberflächennahen süßen Grundwässern und damit verbunden auch zu chemischen Reaktionen und Austauschprozessen. Der Mechanismus des Aufstiegs läßt sich nach BROSE (1991) auf das Zusammenwirken von drei Faktoren zurückführen:

1. Die Potentialdifferenz im Grundwasser zwischen den dränierten Niederungen mit geringer bis negativer Grundwasserneubildung und den morphologischen höheren Grundwasserneubildungsgebieten.
2. Lokal begrenzte, vertikale hydraulische Wegsamkeiten, die sich vor allem im Bereich elstereiszeitlicher Erosionsrinnen ergeben.
3. Anhebung der Salz/Süßwassergrenze im Bereich der Niederungsgebiete nach dem Herzberg-Prinzip infolge von Druckentlastung.

Es konnte allerdings kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Ablaugungserscheinungen am Teilsalzstock Gorleben und den oberflächennahen Versalzungszone nachgewiesen werden. Die bei BROSE (1991) angewandte Methode, nämlich ein Vergleich typischer Ionenverhältnisse des tiefen Grundwassers in verschiedenen Teilbereichen des Untersuchungsraumes, erlaubt wegen der großen Streubreite der Ionenverhältnisse allerdings auch keine statistische Auswertung und damit auch keine klare Aussage über die Herkunft der Mineralisation der Tiefenwässer oder die Ablaugung bestimmter Salzstockbereiche. Daher erscheint die von BROSE (1991) angestellte Vermutung, daß die aufsteigenden Wässer aus dem oberen Bereich der in der gesamten norddeutschen Tiefebene anzutreffenden Na-Cl-Tiefenwässer stammen, nicht nachvollziehbar bzw. ebenso wenig belegt.

Die Grundwässer in den Deckgebirgsschichten des Teilsalzstockes Gorleben lassen sich nach BAUMANN (1989) anhand des relativen Konzentrationsverhältnisses der gelösten Hauptkomponenten in die folgenden vier Hauptgrundwassertypen unterteilen (trifft auf 96% der Grundwasserproben zu):

- | | |
|--|--------|
| - Ca-SO ₄ -Wässer | (7%), |
| - Ca-HCO ₃ -Wässer | (24%), |
| - alkalisierte Austauschwässer (Na-HCO ₃ -Wässer, Na-SO ₄ -Wässer) | (22%), |
| - Salzwasser und Solen vom Na-Cl-Typ | (43%). |

Die im folgenden kurz beschriebenen vier Hauptgrundwassertypen unterliegen ebenfalls der Tiefenabhängigkeit, dabei kann jedoch die Tiefenlage eines bestimmten hydrochemischen

Wassertypen in verschiedenen Teilbereichen über bzw. neben dem Salzstock sehr unterschiedlich sein.

Ca-SO₄-Wässer:

Die Ca-SO₄-Wässer sind in den oberflächennahen wasserführenden Schichten bis zu einer Tiefe von 10 m u. GOK dominierend. Sie kommen zum größten Teil in kalkfreien oder entkalkten Sedimenten der oberen Niederterasse der Elbe vor. In Grundwasserneubildungsgebieten beträgt der Gesamtlösungsgehalt der Ca-SO₄-Wässer 2-5 meq/l, in den Vorflutbereichen meist zwischen 7 - 25 meq/l. Der Anteil der Ca-SO₄-Wässer nimmt mit zunehmender Tiefe ab, dafür steigt der Anteil an Ca-HCO₃-Wässern an. In Tiefen unter 20 m u. GOK wurden keine Ca-SO₄-Wässer mehr angetroffen.

Ca-HCO₃-Wässer:

Ca-HCO₃-Wässer sind überwiegend in einer Tiefe von 10 bis 75 m u. GOK anzutreffen. Sie treten vor allem in den kalkhaltigen saaleeiszeitlichen Schmelzwasserablagerungen auf.

Alkalisierte Austauschwässer:

In der Gruppe der alkalisierten Austauschwässer überwiegen mit einem Anteil von über 90% die Na-HCO₃-Wässer. Sie sind durch Mischung und Ionenaustauschprozesse von Ca-HCO₃-Wässern mit Na-Cl-Wässern entstanden

Na-Cl-Wässer:

Na-Cl-Wässer sind überwiegend in Tiefen von > 120 m u. GOK anzutreffen. Die höchstkonzentrierten Solen (bis > 300 g/l TDS) wurden in tiefen Bereichen der Gorlebener Rinne beobachtet. Es handelt sich dabei um Ablaugungswässer von Evaporiten des Teilsalzstockes.

In den Salzwässern und Solen des NaCl-Typs konnten hohe Konzentrationen an Sulfat und erhöhte Gehalte an Spurenelementen (Br, J, Li, Sr) nachgewiesen werden (BGR 1990a).

Über die Konzentrationsverteilung der übrigen Parameter, die im Rahmen der hydrochemischen Untersuchungen zugrundegelegt wurden, finden sich in den zusammenfassenden

Berichten (z.B. BGR 1990a) keine Angaben. Die Auswertung ausgewählter Grundwasserproben durch BAUMANN (1989) hat ergeben, daß die Konzentrationen an Nitrat, Phosphat, Bromid, Bor, Lithium, Barium, Strontium, Aluminium und Ammonium häufig unter der Nachweisgrenze liegen.

In BAUMANN (1989) wird der Chemismus der Gorleben Grundwässer diskutiert. Der generelle Chemismus der untersuchten Wässer beruht danach auf der Mischung eines hochkonzentrierten Na-Cl-Wassers mit einem schwachmineralisiertem, oberflächennahen Ca-HCO₃-Wasser und verschiedenen dabei ablaufenden Reaktionen (Ionenaustauschprozesse, Lösung/Fällung, Sulfatreduktion). Eine Übersicht über die wichtigsten Reaktionen gibt Abb. 4.-12. Ergebnis nach BAUMANN (1989): "Die Mischwässer mit relativ niedrigen Cl-Gehalten (kleiner ca. 70 mmol/l) sind wegen der Zunahme der Natrium- und der Abnahme der Erdalkalikonzentration durch Ionen-Austauschreaktion deutlich alkalisiert (Na-HCO₃-Wässer) und wegen intensiver Sulfat-Reduktion an Sulfat stark abgereichert. Demgegenüber führt bei höheren Cl-Gehalten (größer ca. 100 mmol/l) die Lösung und Umwandlung von Aluminium-Silikaten (Feldspäten, Tonmineralen) zu einer Erdalkalisierung der Wässer. Wegen der Anreicherung vor allem von Kalzium und Strontium in den Na-Cl-Wässern ist beim Überschreiten der Sättigung für die Minerale Kalzit, Gips und Coelestin mit der Neubildung sekundärer Karbonate und Sulfate zu rechnen".

Dichteverteilung, elektrische Leitfähigkeit

Entsprechend der Zunahme der Versalzung des Grundwassers mit zunehmender Tiefe steigt die Dichte entsprechend an. Die Abhängigkeit der Dichte von der Entnahmetiefe zeigt Abb. 4.-13, die Abhängigkeit zwischen Dichte und Leitfähigkeit zeigt Abb. 4.-14.

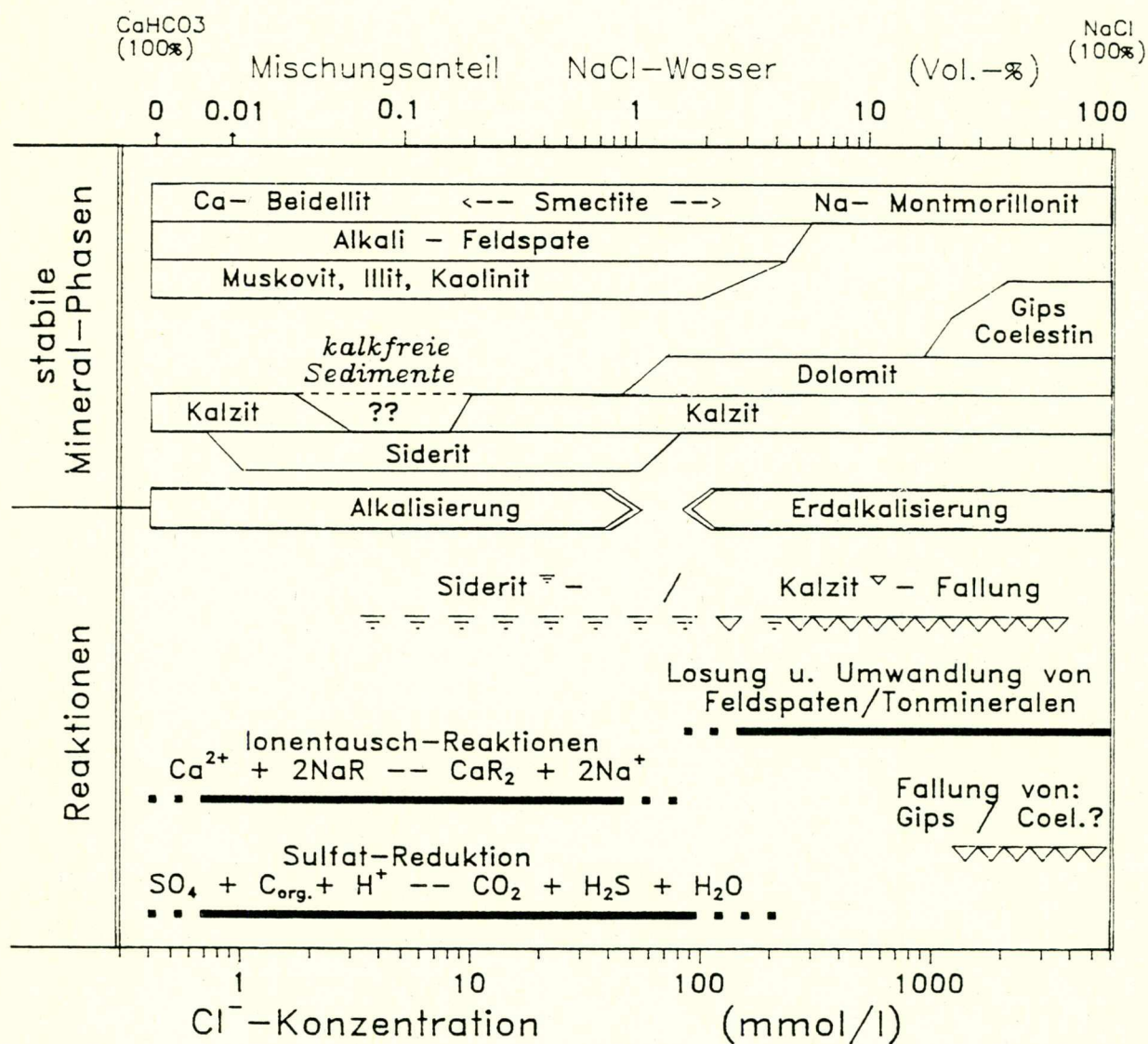


Abb. 4.-12: Schematische Übersicht über wesentliche Reaktionen und stabile Mineralphasen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Konzentrationsbereichen des Chlorids (Quelle: BAUMANN 1989)

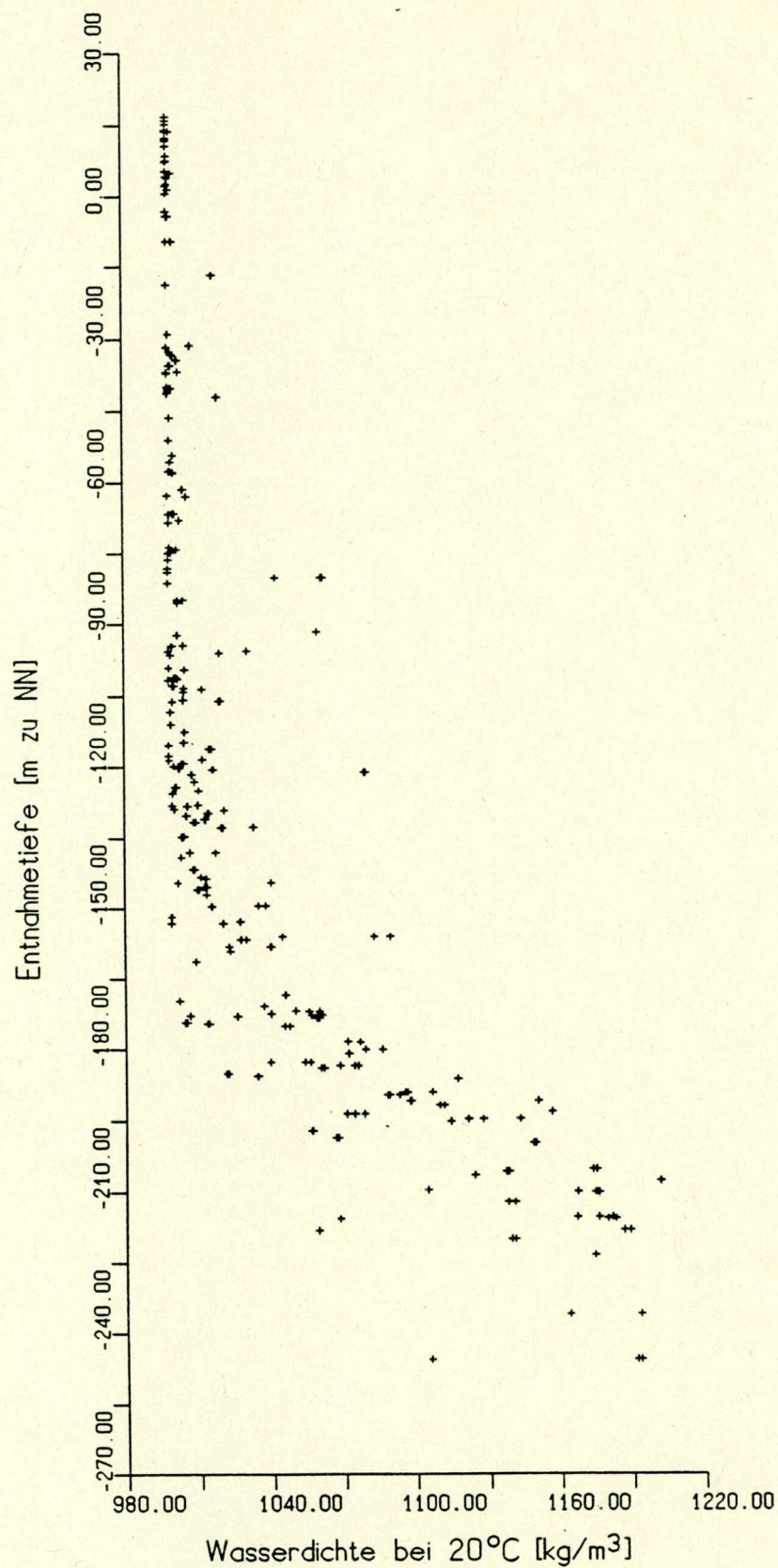


Abb. 4.-13: Abhängigkeit zwischen Dichte und Entnahmetiefe der Grundwässer aus dem Bereich des Teilsalzstockes Gorleben (Quelle: BGR 1990a)

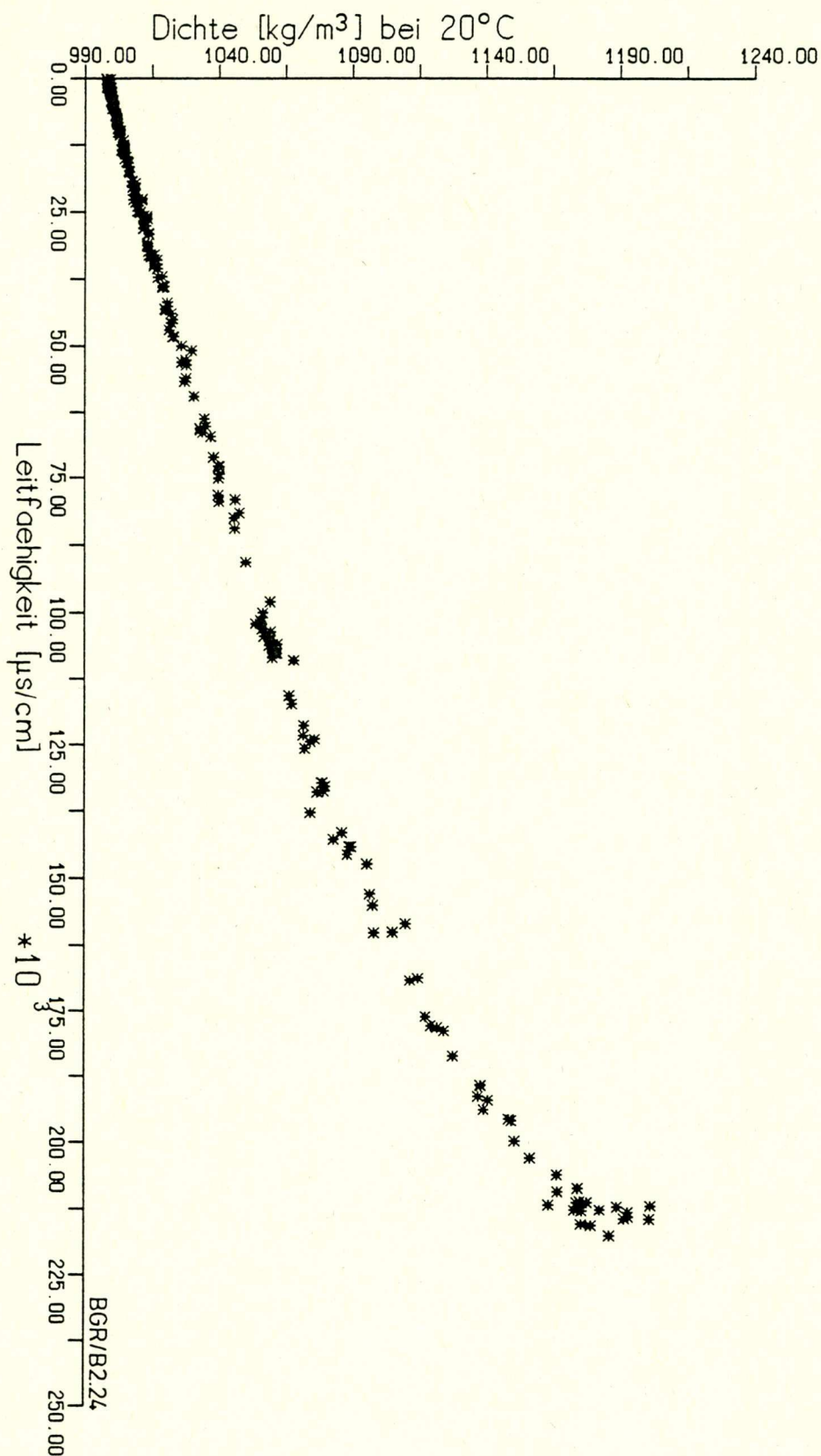


Abb. 4.-14: Abhängigkeit zwischen Dichte und Leitfähigkeit der Grundwässer aus dem Bereich des Teilsalzstockes Gorleben (Quelle: BGR 1990a)

4.4.4 Isotopenalter

Zum Zwecke der Altersbestimmung der Grundwässer wurden an ausgewählten Grundwasserproben Isotopenuntersuchungen durchgeführt (^{13}C , ^{14}C , ^2H , ^3H , ^{18}O).

Aus den Tritium-Bestimmungen geht hervor, daß freigesetztes Tritium aus den Kernwaffentest sich auch in tieferen Meßstellen mit einer Tiefe bis 15 m unter GOK nachweisen lassen.

^2H und ^{18}O -Bestimmungen erfolgten längs eines W-E-Profiles und eines N-S-Profiles im Bereich des Teilsalzstockes sowie in speziellen Bereichen des Untersuchungsgebietes (STICHLER 1981). Es wurde eine Abnahme der $\delta^2\text{H}$ -Werte und der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit der Tiefe beobachtet. Die geringsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte wurden an Proben aus dem Bereich der Quartärrinne ermittelt (STICHLER 1981). Die niedrigen δ -Werte im tieferen Grundwasser deuten auf eine Bildung dieser Wässer in einem kühleren, feuchteren Klima gegenüber den heutigen Klimaverhältnissen hin, sie wären demnach am Ende oder während der letzten Eiszeit (Pleistozän) vor mehr als 10.000 Jahren entstanden (BGR 1990a).

Aus den ^{14}C -Werten wurden Grundwassermodellalter unter Korrekturannahmen ermittelt. Wegen der Vielzahl der notwendigen Korrekturen ist eine Ermittlung des Grundwassermodellalters im Einzelfall mit großen Unsicherheiten behaftet (BGR 1990a). Es läßt sich jedoch eine generelle Altersabfolge des Grundwassers in den hydrogeologischen Haupteinheiten erkennen (BGR 1990a) ²⁾

- Im oberen Aquiferbereich wurden die höchsten ^{14}C -Konzentrationen gefunden (s. Abb. 4.-15). Hier wird ein relativ geringes Modellalter bis 5.000 Jahre angenommen.
- Modellalter von ungefähr 10.000 Jahren im unteren Aquiferbereich, wenn eine Grundwasserneubildung in einem kalkhaltigen geochemischen Milieu angenommen wird.
- Im unteren Aquifersystem (Werte nur im Bereich der Gorlebener Rinne ermittelt) sind mit 10 bis 20 pmc höhere ^{14}C -Gehalte als im Bereich der Trennschichten und der Salzwasserfahne ermittelt worden (s. Abb. 4.-15). Nach BGR (1990a) können diese etwas höheren Werte folgende Ursachen haben:

²⁾ Nach PTB (1983) lassen sich die Grundwässer in zwei Gruppen einteilen:

1. Grundwässer, die unter Klimabedingungen gebildet wurden, welche etwa den heutigen Verhältnissen entsprechen, mit einem Alter bis zu etwa 12.000 Jahren (C^{14} -Modellalter). Sie dürften nacheiszeitlich gebildet sein.
2. Grundwässer, die während einer kühleren oder feuchteren Klimaperiode gebildet wurden, mit einem Alter von mehr als 12.000 Jahren. Es wird eine Bildung am Ende oder während der letzten Eiszeit angenommen.

- stärkere Grundwasserbewegung und dadurch höhere Anteile an jüngerem Grundwasser;
 - geringerer Einfluß von ^{14}C -Verdünnungseffekten durch HCO_3 -Lösung aus der Gesteinsmatrix (HCO_3 -Konzentration im Grundwasser des unteren Aquifersystems 100-200 mg/l);
 - geringe bakterielle ^{14}C -Abreicherung, da die auftretenden hohen Salzgehalte von $> 3 \text{ mol/l}$ die Lebensfähigkeit von Bakterien stark einschränken, was sich in relativ hohen $\delta^{13}\text{C}$ -Werten (Mittelwert -12 ‰) andeutet.
-
- Niedrige ^{14}C -Gehalte ($< 10 \text{ pmc}$) sind im Bereich der Trennschichten zwischen dem oberen und unteren Aquifersystem ermittelt worden (s. Abb. 4.-15). Ein Modellalter von ungefähr 20.000 Jahren wird angenommen.
 - Modellalter von ungefähr 10.000 Jahren sind im Bereich der Salzwasserfahne ermittelt worden. Niedrige ^{14}C -Gehalte ($< 10 \text{ pmc}$) sind hier ebenfalls festgestellt worden (s. Abb. 4.-15). Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sind im Bereich der Salzwasserfahne ebenfalls sehr niedrig und lassen auf eine Entstehung dieser Wässer in einer kühleren Klimaperiode schließen.

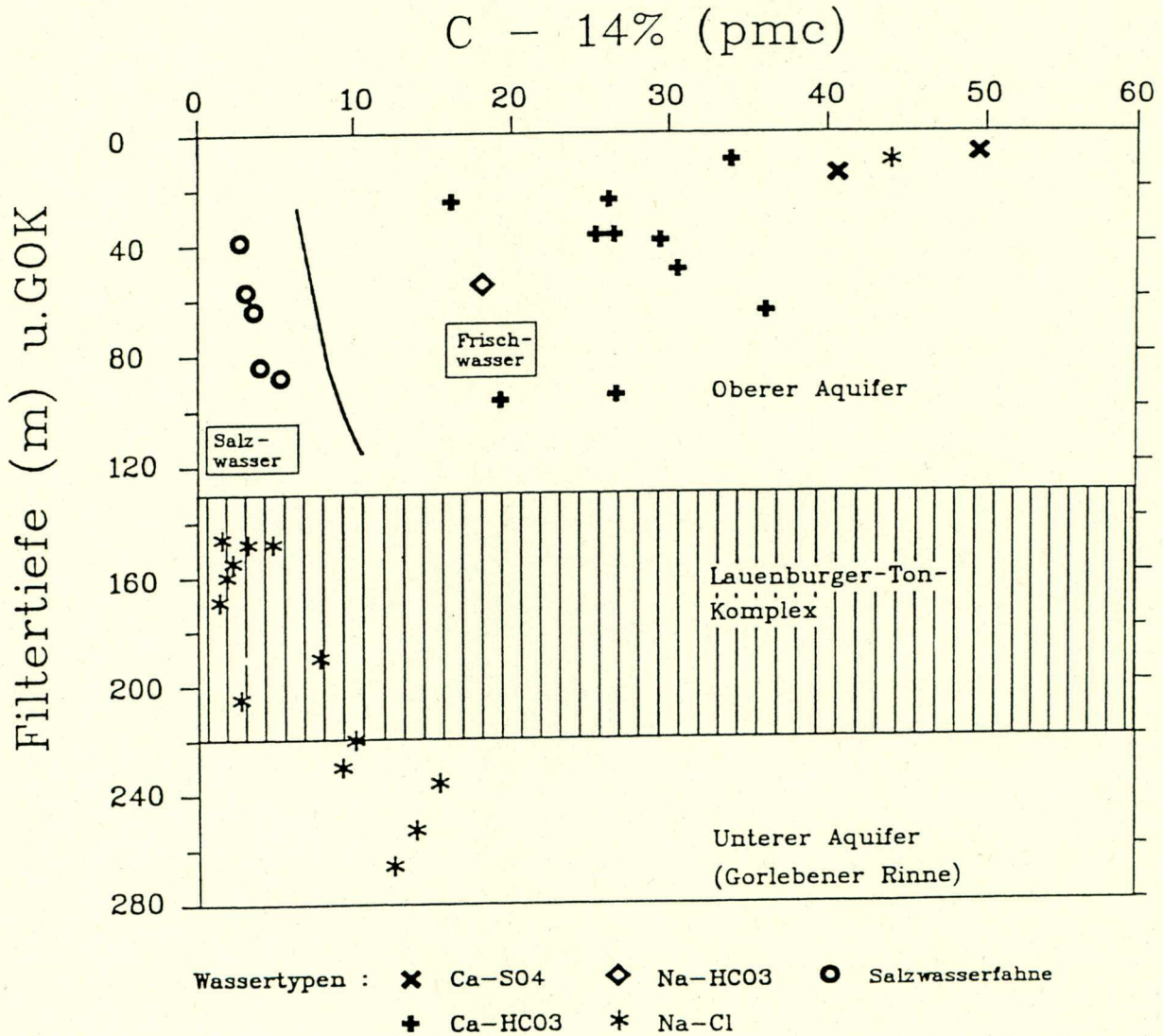


Abb. 4.-15: ¹⁴C-Gehalte (pmc) in Abhängigkeit von der Filtertiefe (m) (Quelle: BGR 1990a).

4.5 Bedeutung der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge für den Radionuklidtransport

Die bisherigen Messungen und Modellrechnungen (die Ergebnisse der Modellrechnungen als in der Größenordnung richtig angenommen) zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben zeigen eindeutig, daß

- sich das Grundwasser im Deckgebirge relativ schnell bewegt und je nach angenommenem "Startpunkt" der Wasserteilchen bzw. je nach Modellierung innerhalb von 1.000 bis 17.000 Jahren oberflächennahes Grundwasser erreichen wird (s. 4.3.2.4).
- die Länge der Fließwege je nach Startpunkt und möglicher Austrittsfläche zwischen ca. 4 bis 10 km liegt (BGR 1990a).

Bei der Ausbreitung der Radionuklide mit dem Grundwasser im Deckgebirge spielt die Sorption der Radionuklide an die feste Gesteinsmatrix des Grundwasserleiters eine wesentliche Rolle. So kommt es bei stärkerer Sorption eines Radionuklides zu einer deutlichen Verzögerung seiner Bewegung relativ zu der des Grundwassers, mit dem es transportiert wird. Dies führt zur Verlängerung der Transportzeit und zur Konzentrationsminderung.

Die bisherigen Kenntnisse und Untersuchungen (z.B. PSE 1985c) zeigen, daß die Sorption für einige Radionuklide (bzw. Radionuklidverbindungen) zweifellos eine deutliche Transportverzögerung bewirkt. Dies wirkt sich vor allem für Radionuklide mit kürzeren Halbwertszeiten und/oder hoher Sorption, die während ihres Transportes merklich zerfallen, positiv aus. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen, insbesondere auch die Ergebnisse von PSE (1985c), daß für Radionuklide mit großer Halbwertszeit (z.B. C-14, Halbwertszeit 5.700 Jahre) oder sehr großer Halbwertszeit (z.B. Tc-99 mit 210.000 Jahren, Np-237 mit 2,1 Mio. Jahren, J-129 mit 16 Mio. Jahren) der Zerfall während des Transportes im Deckgebirge keine bedeutende Rolle spielt, da die Transportzeiten trotz Berücksichtigung der Sorption im Verhältnis zur Halbwertszeit der entsprechenden Radionuklide gering sind. Wegen der relativ schnellen Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben in Verbindung mit den relativ kurzen Fließwegen sind also die Fließzeiten für Grundwasser bis zum Erreichen des oberflächennahen Grundwassers zu gering, als daß langlebige und/oder schwach sorbierbare Radionuklide während des Transportes in ihrer Konzentration ausreichend verringert werden bzw. ausreichend lange Laufzeiten bis zum Erreichen der Biosphäre aufweisen. Bei den Verhältnissen im Deckgebirge Gorleben werden somit Radionuklide mit entsprechenden Eigenschaften innerhalb eines Zeitraumes von einigen tausend bis einigen zehntausend Jahren das oberflächennahen Grundwasser erreichen. Ihre Konzentration dort wird dann - abgesehen von der Dispersion - vor allem vom Freisetzungsverlauf aus dem Salzstock bestimmt.

In Zusammenhang mit dem Radionuklidtransport muß beachtet werden, daß bei der bisherigen Bestimmung der die Sorption beschreibenden K_d -Werte an Gesteins- und Wasserproben

des Deckgebirges noch offene Fragen bestehen (GSF 1990: Pkt. 4.2.3). So erfolgt die Modellierung der Sorption bisher nach dem K_d -Konzept mit festen Gleichgewichtskonstanten, die nur örtlich variert werden können. Die Übertragbarkeit dieser im Labor bestimmten Gleichgewichtskonstanten auf natürliche Systeme muß jedoch gewährleistet sein. In GSF (1990) wird deshalb die Absicherung des K_d -Konzeptes im Sinne eines Konservativitätsnachweises gefordert oder die Erarbeitung eines anderen Sorptionsansatzes. Inwieweit durch die Berücksichtigung der bisher im Labor ermittelten Sorptionswerte bei der Modellierung der Radionuklid- ausbreitung mit dem Grundwasser die tatsächlichen Verhältnisse richtig (oder gar konservativ) beschrieben werden, ist somit noch nicht abschließend geklärt.

Gerade bei den kurzen Grundwasserlaufzeiten im Deckgebirge Gorleben stellt die Sorption den wesentlichen konzentrationsmindernden bzw. laufzeitverlängernden Einflußfaktor dar. Für Radionuklide mit relativ großer Halbwertszeit und/oder geringer Sorption bildet das Deckgebirge jedoch gerade wegen der kurzen Grundwasserlaufzeiten keine die notwendige Langzeitsicherheit gewährleistende Barriere. Dies zeigen die Ergebnisse von PSE (1985c) genauso wie die Einschätzung der PTB (1983), nach der eine erste Bewertung des Deckgebirges hinsichtlich seiner Barrierefunktion zeigt, daß die über dem zentralen Bereich des Teilsalzstocks Gorleben vorkommenden tonigen Sedimente keine solche Mächtigkeit und Verbreitung haben, daß sie in der Lage wären, Kontaminationen auf die Dauer von der Biosphäre zurückzuhalten.

An dieser im Ansatz zweifellos richtigen Einschätzung sind allerdings die falschen Schlußfolgerungen gezogen worden. Indem nämlich mit Blick auf physikalisch-chemische Vorgänge im Deckgebirge (Dispersion, Sorption) bei der realitätsnahen Modellierung des Radionuklidtransportes und einer Optimierung der (Endlager-)Planungen die Einhaltung der Schutzziele doch noch angenommen wird, werden die bereits vorliegenden Befunde über die Qualität des Deckgebirges ignoriert und durch Mutmaßungen bzw. Hoffnungen ersetzt, deren Nachweis höchstens und ausschließlich auf einer modellmäßigen Ebene geführt werden kann.

In diesem Zusammenhang ist es auch interessant, daß inzwischen nach Meinung des BFS (1992, S. 16) die Barrierefunktion des Deckgebirges von Gorleben neben einem wirksamen Schutz des Salzstocks gegen zukünftige Erosionsvorgänge in der Verdünnung der Radionuklide im Deckgebirge bestehen soll. Hier wird also der aus dem Minimierungsgebot abgeleitete ursprüngliche Sicherheitsansatz, nämlich möglichst die Fernhaltung von aus dem Salzstock ausgetretenen Radionukliden vom Transportmedium Grundwasser (bzw. geringe Grundwasserbewegung, geringe Grundwassermengen) in ihr Gegenteil umgekehrt. Bei konsequenter Weiterverfolgung dieses Gedankens, der sicherlich aus der standortspezifischen Befundnot eine positive Eigenschaft ableiten will, müßte ein Endlager unter dem Meeresboden angelegt werden, da in diesem Fall mit einer maximalen Verdünnung austretender Radionuklide gerechnet werden kann und die Gefahr eiszeitlicher Erosionserscheinungen möglicherweise auch minimiert wird.

Insgesamt bleibt festzustellen, daß die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge Gorleben wegen der kurzen Grundwasserlaufzeiten für die Ausbreitung von Radionukliden in Rich-

tung Biosphäre günstig sind. Insbesondere für längerlebige und/oder schlecht sorbierbare Radionuklide (bzw. Nuklidverbindungen wie beispielsweise Chelatkomplexe) ist die Barrierewirkung des Deckgebirges bereits nach heutigem Kenntnisstand als gering einzuschätzen (s. auch 5.). Für entsprechende Radionuklide muß der Teilsalzstock Gorleben die gesamte Sicherheitslast tragen, was dem Modell des wirksamen Mehrfachbarriensystems (hier natürliche Barrieren) gerade nicht entspricht. Aus dem Teilsalzstock Gorleben freigesetzte Radionuklide mit entsprechenden Eigenschaften werden somit in jedem Fall innerhalb relativ kurzer Zeiträume (tausende bis zehntausende Jahre) die Biosphäre erreichen.

Erläuterung:

Geothermische Messungen:
100 m u. NN.

- + aufsteigendes Grundwasser
- absteigendes Grundwasser
- △ fehlendes Hutgestein
- △ geringmächtiges Hutgestein
M = Mächtigkeit

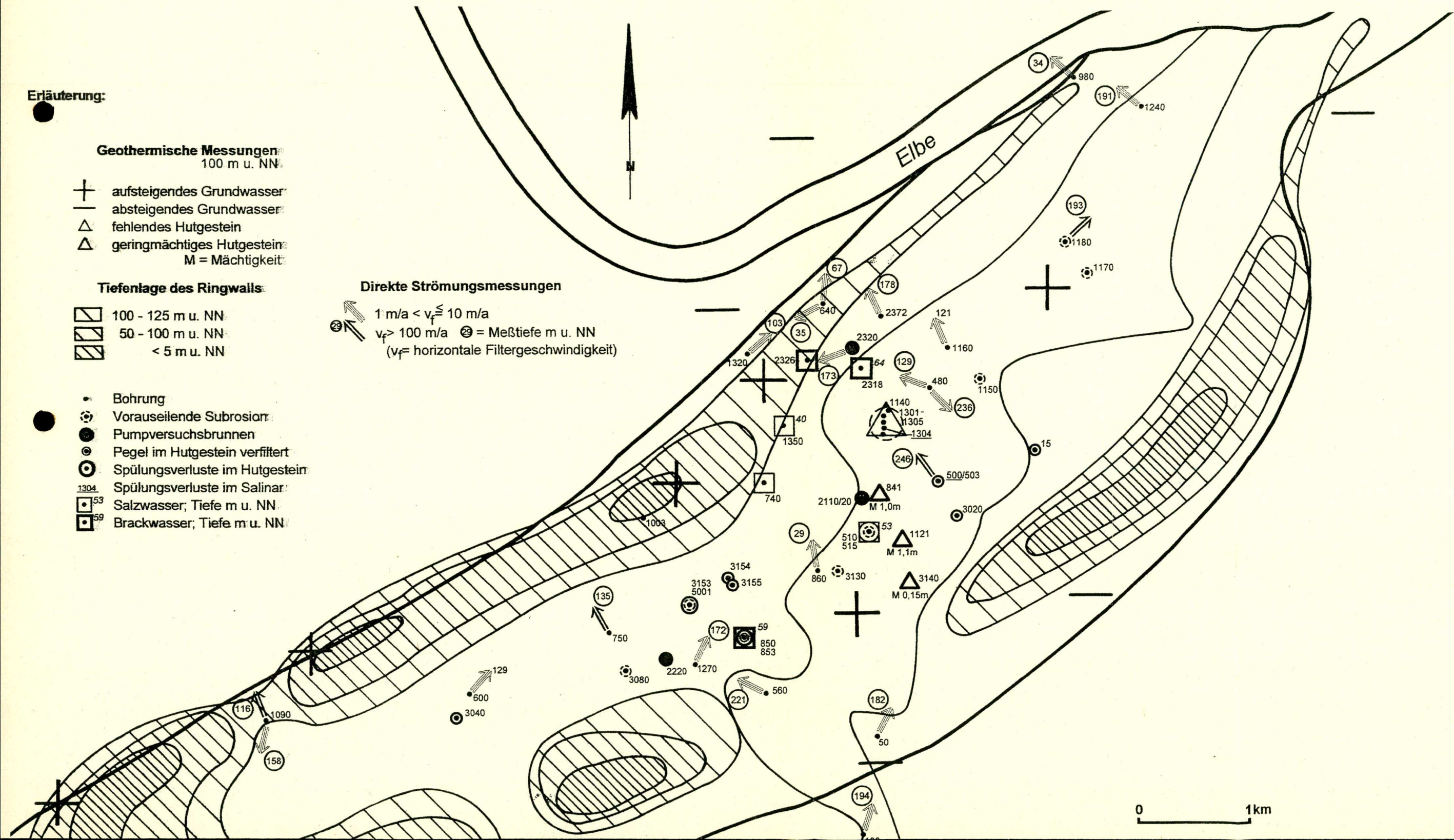
Tiefenlage des Ringwalls:

- 100 - 125 m u. NN
- 50 - 100 m u. NN
- < 5 m u. NN

- Bohrung
- Vorauseilende Subrosion
- Pumpversuchsbrunnen
- Pegel im Hutgestein verfilzt
- Spülungsverluste im Hutgestein
- Spülungsverluste im Salinar
- 53 Salzwasser; Tiefe m u. NN
- 59 Brackwasser; Tiefe m u. NN

Direkte Strömungsmessungen

- 1 m/a < v_f ≤ 10 m/a
- v_f > 100 m/a ② = Meßtiefe m u. NN
(v_f = horizontale Filtergeschwindigkeit)



5. Bewertung der hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse am Standort Gorleben

Grundlage der geologischen und hydrogeologischen Befunde im Deck- und Nebengebirge des Teilsalzstocks Gorleben bilden die in Kap. 3.2.4.2.2 formulierten Kriterien, und Bewertungsmerkmale. Die Ableitung bzw. Begründung der Kriterien wird in Kap. 3.2.4.2.1 beschrieben.

Im folgenden werden die für die Anwendung der Kriterien wesentlichen Befunde zusammengefaßt dargestellt. Dabei sind Befunde, die den Bewertungsmerkmalen der Kriterien direkt zugeordnet werden können, zur besseren Vergleichbarkeit mit den Bewertungsmerkmalen kursiv gedruckt. An die Darstellung der wesentlichen Befunde schließt sich jeweils die Bewertung an.

Kriterium 1.1: Geologischer und hydrogeologischer Aufbau des Nebengebirges

Befunde:

Das mesozoische Nebengebirge des Salzstocks Gorleben-Rambow besteht aus einer bis über 3.000 m mächtigen Abfolge sedimentärer Gesteine. Die Angaben in BGR (1990a) zum Nebengebirge beruhen weitgehend auf geophysikalischen Untersuchungen und Daten aus der Literatur. Danach besteht die Schichtenfolge zum großen Teil aus nicht oder nur gering durchlässigen Gesteinen. *Daneben treten verschiedene grundwasserleitende Schichten auf. Die hydrogeologische Bedeutung mehrerer, aus der Literatur bekannter, regional vorhandener Grundwasserleiter im Raum Gorleben bleibt unklar (s. 4.1.1.2, 4.1.1.4, 4.1.1.6).* Als Grundwasserleiter des mesozoischen Nebengebirges sind der Muschelkalk, Sandsteine des Buntsandstein, der Schilfsandstein und der Rhätsandstein, die Sandsteine des Lias, des Dogger, des Malm und Wealden und des Apt bis Valangin sowie die Kalkstein-Mergelstein-Folgen des Cenoman bis Santon anzunehmen oder zu vermuten (s. 4.1.3). Insgesamt fehlen aber genaue Kenntnisse über den hydrogeologischen Bau des mesozoischen Nebengebirges. Die hydrogeologische Bedeutung der angeführten Schichtglieder für den Ferntransport von tiefem Grundwasser bleibt weitgehend unklar.

Die Trennung verschiedener Grundwasserstockwerke im Nebengebirge des Salzstocks ist nicht vollständig. Zum Beispiel lagern grundwasserführende Schichten des Malm unmittelbar diskordant auf potentiell grundwasserführenden Schichten des Keuper und stehen so in hydraulischem Kontakt miteinander. *Die Aquifere in den tertiären und quartären Sedimenten des Nebengebirges stehen an verschiedenen Stellen mit den Aquiferen des Deckgebirges in hydraulischem Kontakt (s. 4.2.1.2).*

Größere und kleinere Störungen in der näheren Umgebung des Salzstocks und speziell in seinem Flankenbereich können hydraulische Verbindungen zwischen grundwasserführenden Schichten und damit Wegsamkeiten für auf- oder absteigendes Grundwasser bilden (s. 4.1.3).

Am SW-Ende des Salzstocks steigt Tiefengrundwasser im Bereich einer Störungszone auf. Es ist anzunehmen, daß zahlreiche Störungen in unmittelbarer Nähe der Salzstockflanke, einer tektonisch besonders beanspruchte Zone, bisher unerkannt geblieben sind. Lokal ist an der Flanke des Teilsalzstocks Gorleben unter dem SE-Überhang Hutgesteinsbildung nachgewiesen worden (Bohrung Go 1005). Dieses Hutgestein kann nur durch salzengesättigtes tiefes Grundwasser entstanden sein (s. 4.1.1.1). An der Flanke des Salzstocks ist mit einem wiederholten Ausstreichen von besonders subrosionsgefährdeten Kalisalzlagen und durchlässigem Hauptanhydrit zu rechnen (s. 4.1.1.1). Das Nebengebirge wird hier von grundwasserführenden Schichten der Oberkreide gebildet. Im Falle einer Einlagerung von stark wärmeentwickelnden Abfällen in das Endlager und der damit verbundenen Hebung der gesamten Salzstruktur könnten sich an der Salzstockflanke neue Wasserwegsamkeiten öffnen.

Bewertung:

Werden diese Befunde mit den Bewertungsmerkmalen von Kriterium 1.1 verglichen (s. 3.2.4.2.2), so führt dies zur **Bewertung "sehr ungünstig"**. Zu dieser Bewertung führen insbesondere die unvollständige Trennung verschiedener Grundwasserstockwerke im Nebengebirge, die hydraulischen Kontakte zwischen den Grundwasserleitern des Neben- und Deckgebirges sowie die komplizierten Lagerungsverhältnisse im Randbereich des Teilsalzstocks Gorleben.

Kriterium 1.2: Geologischer und hydrogeologischer Aufbau des Deckgebirges

Befunde:

Das tertiäre und quartäre Deckgebirge ist petrographisch sehr inhomogen aufgebaut. Meist handelt es sich um tonige, schluffige, sandige und kiesige Sedimente. Tertiäre und quartäre Grundwasserleiter stehen miteinander in hydraulischem Kontakt und lagern teilweise unmittelbar dem Salzstock auf (s. 4.1.2, 4.1.3, 4.2.1.2). Im SW-Teil des Teilsalzstocks Gorleben ist innerhalb des halokinetischen Ringwalls eine bis etwa 50 m mächtige tonige Tertiär-Bedeckung vorhanden, die jedoch nicht eine großflächige, präelsterzeitliche Subrosion verhindern konnte.

Die vorwiegend tonigen Sedimente des Tertiär, mit einzelnen eingeschalteten sandigen, grundwasserleitenden Schichten, sind am Rand des Salzstockdaches zu einem halokinetischen Ringwall aufgebogen (s. 4.1.2 u. 4.1.3). Der Ringwall hemmt in tieferen Grundwasserstockwerken die Grundwasserbewegung über den Salzstock hinweg. In Gebieten, wo der Ringwall vergleichsweise tief liegt (im Bereich der Ortschaften Gorleben, Brünkendorf und dem Hühbeck) bzw. durch die Gorlebener Rinne zerschnitten wird, ist seine grundwasserbewegungshemmende Wirkung weitgehend oder ganz aufgehoben. Vorwiegend wo Einschnitte in den "Ringwall" bestehen oder seine Höhe gering ist, sind hydraulische Verbindungen vorhanden (s. Abb. 4.-16). Aber auch in den tertiären Schichten der "Wallsedimente" selbst sind

Sandstein- und Sandhorizonte eingeschaltet, die sich bis in den Zentralbereich des Salzstockdaches durchziehen (s. 4.2.1.2 und Abb. 4.-16). Zusätzliche hydraulische Verbindungen bilden Sandstein- und Sandhorizonte im Ringwall (Neuengammer Gassand), die sich bis in den Zentralteil des Salzstockdaches durchziehen.

In den Randsenken stellen die miozänen Braunkohlensande den wichtigsten tertiären Grundwasserleiter dar. Sie bilden mit den auflagernden quartären Sanden, die auch über den Salzstock hinweg verbreitet sind, ein zusammenhängendes, mächtiges Aquifersystem. *Innerhalb der quartären Abfolge sind die grundwasserführenden Schichten nur unvollständig durch Geringleiter oder Nichtleiter getrennt*, wobei glazitektonische Schichtverstellungen und Verschupfung eine wesentliche Rolle spielen (s. 4.1.3, 4.2.1.2). Weiterhin spielt lokal unterschiedlich starke Subrosion als Ursache für Schichtverstellungen eine Rolle.

In der Füllung der tief eingeschnittenen Gorlebener Rinne sowie über dem SW-Teil des Salzstocks innerhalb des halokinetischen Ringwalls existieren in quartären Sedimenten mehrere, nur unvollständig voneinander getrennte Grundwasserstockwerke (s. 4.1.3).

Das quartäre Deckgebirge über dem Teilsalzstock Gorleben ist, insgesamt gesehen, kompliziert aufgebaut. Die Lagerungsverhältnisse und ihre Ursachen sind nicht vollständig geklärt (s. 4.1.2).

Bewertung:

Werden die Befunde mit den Bewertungsmerkmalen von Kriterium 1.2 (s. 3.2.4.2.2) verglichen, so führt dies zur **Bewertung "sehr ungünstig"**. Für diese Bewertung sind insbesondere der sehr inhomogene Aufbau des Deckgebirges, die hydraulischen Kontakte zwischen tertiären und quartären Grundwasserleitern sowie der örtliche Kontakt dieser Grundwasserleiter direkt mit dem Salzstock ausschlaggebend. Hinzu kommt, daß die Lagerungsverhältnisse des Deckgebirges kompliziert sind.

Kriterium 2.1: Hydrogeologische Verhältnisse im Bereich Salzstock/Neben- bzw. Deckgebirge

Befunde:

Das über dem Salzspiegel entwickelte Hutgestein bildet einen sehr inhomogen aufgebauten Kluft- und Karstwasserleiter, wobei insbesondere die Hutgesteinsbrekzien besonders durchlässig sind (s. 4.1.1.1 und 4.2.1.3). Bei Bohrarbeiten kam es an mehreren Lokationen in diesem Bereich zu totalen bis schleichenden Spülungsverlusten, die auf wasserwegsame Hohlräume deuten (s. Abb. 4.-16). Zusätzlich treten in der Hutzone über dem Salzstock elstereiszeitliche Hutgesteinsbrekzien auf. Meist finden sich diese Brekzien an der Basis des Hutge-

steins. Es ist anzunehmen, daß die Einpressung der Brekzien, während der Elster-Eiszeit seitlich von der Gorlebener Rinne ausgehend, zumindest lokal zu einer "Auflockerung" des Hutgesteins durch Kluftbildung führte. *Das Hutgestein steht in hydraulischem Kontakt zu Grundwasserleitern des Neben- und Deckgebirges. Die Kenntnisse über den Aufbau des Hutgesteins, speziell seiner Aquifer-Eigenschaften, sind lückenhaft (s. 4.2.1.3).*

Die untere Füllung der Gorlebener Rinne besteht aus mächtigen grundwasserleitenden Schmelzwassersanden, die großflächig dem Hutgestein und stellenweise auch direkt dem Salzgestein aufliegen. Gerade hier ist vorauseilende Subrosion im am Salzspiegel ausbeißenden Kaliflöz Staßfurt nachgewiesen worden (s. 4.1.1.1). Die Grundwasserleiter in der Rinne und über dem SW-Teil des Salzstocks stehen mit anderen grundwasserführenden Schichten des Tertiär und Quartär sowie dem Hutgestein in hydraulischer Verbindung (s. 4.2.1.2). Dies gilt insbesondere für den Bereich der Durchbrüche der Gorlebener Rinne durch den Ringwall.

An den beiden Bohrungen GoHy 515 (Weißes Moor) und GoHy 3153 (Gorlebener Tannen) sind sowohl vorauseilende Subrosion im Salinar als auch Hohlräume im Hutgestein festgestellt worden. In der Bohrung GoHy 503 (östlich Weißes Moor) kam es im Hutgestein und darunter im Salinar zu Spülungsverlusten (s. Abb. 4.-16).

Die im Hutgestein verfiltrierte Meßstelle GoHy 853 im Bereich Gorlebener Tannen reagierte deutlich auf den Pumpversuch "Weißes Moor" mit dem Pumpversuchsbrunnen GoHy 2120, der ca. 1.700 m nordöstlich davon lag (s. 4.2.1.3). Bei diesem Versuch war das untere, versalzene Grundwasserstockwerk in der Gorlebener Rinne verfiltert. Zwischen dem Versuchsbrunnen und dem Pegel GoHy 853 liegt außerdem die Bohrung 3130. In dieser Bohrung sind bis ca. 12 m unter dem Salzspiegel Klüfte (Störungen) entwickelt, die mit Ton und Feinsand aus dem Deckgebirge gefüllt sind (s. Abb. 4.-16).

An der Bohrgruppe 1301 bis 1305, wo Grundwässer bis zu ca. 170 m tief unter den Salzspiegel in die Gesteine des Teilsalzstocks eingedrungen sind, ist kein Hutgestein ausgebildet (s. Abb. 4.-16). Das Gestein besteht in diesem Bereich aus quartärzeitlichen und tertiärzeitlichen Sedimenten mit eingeschalteten Gips- und Anhydritbrocken. Weiter südlich, noch innerhalb der Gorlebener Rinne, ist das Hutgestein nur sehr geringmächtig entwickelt (um ca. 1 m, s. Abb. 4.-16). Darüber folgen die gut wasserleitenden, elsterzeitlichen Schmelzwasserablagerungen.

Bewertung:

Werden die Befunde mit den Bewertungsmerkmalen von Kriterium 2.1 (s. 3.2.4.2.2) verglichen, so führt dies zur **Bewertung "sehr ungünstig"**. Zu dieser Bewertung führen insbesondere das sehr inhomogen aufgebaute und als Kluft- bzw. Karstwasserleiter ausgebildete Hutgestein sowie der direkte hydraulische Kontakt zwischen Grundwasserleitern des Neben- bzw. Deckgebirges und dem Hutgestein. Hinzu tritt, daß grundwasserleitende Sande direkt dem Salzgestein aufliegen, und zwar gerade auch in Zonen mit besonders subrosionsanfälligen Kalisalzvorkommen.

Kriterium 2.2: Subrosion

Befunde:

Im Bereich des Ausbisses des Kaliflözes Staßfurt am Salzspiegel ist Grundwasser teilweise tief in den Salzstock eingedrungen (s. 4.1.1.1). Dies ist insbesondere in der Gorlebener Rinne der Fall, wo das Hutgestein nur geringmächtig ist und stellenweise sogar ganz fehlt. Die bekannte Teufe der Umwandlung der Kalisalze durch eingedrungenes Grundwasser beträgt etwa 170 m unter den Salzspiegel (s. 4.2.1.4), entsprechend etwa 445 m unter GOK (zum Vergleich: die Einlagerungssohle des geplanten Endlagers soll sich nach BFS (1990) in einer Teufe von 870 m unter GOK befinden). Die Zonen mit vorauseilender Subrosion sind somit kritische Bereiche für ein Endlager, ihre Existenz stellt eine deutliche Schwächung der Barriere Salzstock dar. Im Falle eines Eintritts von Radionukliden aus dem geplanten Endlager in das Neben- und Deckgebirge ist dies mit hoher Wahrscheinlichkeit in diesen Bereichen zu erwarten. Ein nachfolgend rascher Eintritt der Radionuklide in die Biosphäre wäre unvermeidlich (PTB 1983: S. 65).

Am Pumpversuchsbrunnen GoHy 2220 Gorlebener Tannen, der im Salzwasseraquifer der altpleistozänen Schichten verfiltert ist, kam es in der näheren Brunnenumgebung zu Zusickerungen aus dem oberen Grundwasserstockwerk. An den ca. 500 m nördlich und westlich gelegenen Bohrungen GoHy 3080 und GoHy 5001 tritt *vorauseilende Subrosion* bis über 28,7 m unter den Salzspiegel auf (s. Abb. 4.-16). *Subrosion findet am Teilsalzstock Gorleben auch heute noch statt und kann für die Zukunft ebenfalls nicht ausgeschlossen werden (BGR 1990a).*

Bewertung:

Werden die Befunde mit den Bewertungsmerkmalen von Kriterium 2.2 (s. 3.2.4.2.2) verglichen, so führt dies zur **Bewertung "sehr ungünstig"**. Zu dieser Bewertung führen insbesondere die in der Vergangenheit stattgefundenen flächenhafte und selektive Subrosion sowie die noch immer stattfindende und auch für die Zukunft nicht ausschließbare Subrosion.

Kriterium 3.1: Grundwasserbewegung in Deckgebirge und Nebengebirge

Befunde:

Wie schnell sich freigesetzte Radionuklide ausbreiten können, hängt wesentlich von der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers ab. Durch direkte Strömungsmessungen wurden lokale horizontale Geschwindigkeits- und Richtungsdaten ermittelt (s. 4.2.2.3 u. Abb. 4.-16). Nordöstlich von Gorleben bewegt sich Grundwasser aus der Gorlebener Rinne über den dort schma-

len und tiefliegenden "Tertiärwall" Richtung Norden in das Nebengebirge und erreicht dabei *Filtergeschwindigkeiten zwischen 1 m/a und 10 m/a*. Am Einschnitt in den "Ringwall" nordwestlich von Marleben lassen die Messungen in verschiedenen Tiefenniveaus auf aus- und eindringende Grundwässer mit Geschwindigkeiten bis zu 13 m/a schließen.

Vertikale Grundwasserbewegungen sind aus den konvektiven Temperaturfelddaten bekannt (s. 4.3.2.5). In Abb. 4.-16 sind die Werte für den Tiefenbereich 100 m u. NN eingetragen. Danach steigen innerhalb des Deckgebirges am nordöstlichem "Ringwall" Grundwässer auf. Da, wo auch horizontale Grundwasserrichtungen über den "Wall" nach Norden deuten, steigen Wässer aus tieferen Stockwerken der Gorlebener Rinne auf. An der Bohrung GoHy 640 (s. Abb. 4.-16) wurden über den tertiären "Wallsedimenten" in 67 m u. NN eine nördlich gerichtete Strömung gemessen. Die konvektive Temperaturverteilung in diesem Bereich zeigt aufsteigendes Grundwasser an. Laut Bohrprotokoll sind in dieser Tiefe glazifluvialer Sand der Elsterkaltzeit unter Ablagerungen der Holsteinwarmzeit verbreitet. Im Liegenden folgt 19 m Beckenschluff des Lauenburger-Ton-Komplexes, der hier keine abdichtende Wirkung zu haben scheint. (s. 4.3.2.5). *Aus den Isothermen berechnete Vertikalgeschwindigkeiten bis in Tiefen von 240 m u. NN liegen in der Größenordnung von dm/a.*

Nach den Ergebnissen der direkten Strömungsmessungen und der geothermischen Daten bewegt sich das Grundwasser im unteren Porenaquifer (besonders in der Gorlebener Rinne, am Salzstockrand östlich von Gorleben, im Bereich Gorlebener Tannen und an der "Wallpforte" nordwestlich von Marleben) über dem Teilsalzstock Gorleben horizontal im m/a-Bereich mit lokalen Geschwindigkeitsspitzen von über 10 m/a. Die vertikalen Geschwindigkeiten liegen im dm/a-Bereich (s. 4.2.2.3). Fließgeschwindigkeiten aus dem Hutgestein wurden bisher nicht ermittelt.

Mehrere Salz- und Brackwasservorkommen im oberen Süßwasserstockwerk am westlichen Rand der Gorlebener Rinne zwischen Gorlebener Tannen und Gorleben belegen aufgestiegenes (bzw. aufsteigendes) Salzwasser aus tieferen Grundwasserstockwerken (s. 4.2.2.5). Die Vorkommen von oberflächennahen und salzreichen Grundwässern deuten auf eine wirksame hydraulische Potentialverteilung hin, die es ermöglicht, daß dichteres (spezifisch schwereres) Grundwasser über geringer mineralisiertes (leichteres) Grundwasser aufsteigen kann. Die Herkunft und Genese dieser Wässer ist noch nicht abschließend geklärt (s. 4.4.3).

Eine weitere Möglichkeit, Geschwindigkeit und Richtung der Grundwasserbewegung zu erkunden, ist durch die numerische Grundwassermodellierung gegeben (s. 4.3.2). Die aus Pumpversuchen (s. 4.2.2.1) und Porositätsbestimmungen (s. 4.2.2.4) ermittelten Durchlässigkeiten und effektiven Porositäten der Schichten werden in Verbindung mit den Bohrprofilen zu einem 3d-Modellraum zusammengesetzt (s. 4.3.2.1). Die Eingabedaten für das Hutgestein basieren dabei auf Schätzwerten. Neben diesen variablen Eingabeparametern müssen eine Reihe von Konstanten und Randbedingungen berücksichtigt bzw. angenommen werden (s. 4.3.2.3). Manche Bedingungen, wie die Annahme, daß sämtliche Grundwasservorkommen aus Süßwasser bestehen, sind zwar unrealistisch, können jedoch in dieser Bewertungsphase als kon-

servativ angesehen werden. Dadurch ist es aber andererseits nicht möglich, die oberflächen-nahen Grundwasserversalzenungen zu klären. Die Annahme von undurchlässigen vertikalen Modellrändern dagegen ist nicht konservativ, da sie zu geringeren Mengen den Standort Gorleben querenden Grundwassers führt.

Die berechneten horizontalen Filtergeschwindigkeiten liegen in einem Teufenbereich von 150 m bis 275 m u. NN zwischen 0,02 und 1,09 m/a (s. 4.3.2.4). Eine im Rahmen von PSE vorgenommene Modellierung kommt für den Teufenbereich zwischen 150 m bis 250 m u. NN zu Geschwindigkeiten von 2 bis 7 m/a. Eine ältere Modellierung der BGR (1984a) kommt in einem ähnlichen Teufenbereich im elsterzeitlichen Rinnenaquifer zu Geschwindigkeiten von 1 m bis 5 m/a. Die berechneten vertikalen Filtergeschwindigkeiten liegen bis 150 m u. NN im dm/a-Bereich, darunter im cm/a-Bereich (BGR 1987). Die Ergebnisse der Modellierungen werden in Kap. 4.3.2.4 im einzelnen dargestellt.

In einem gesonderten Modellversuch wurde das tiefe Grundwasser im Nebengebirge des Salzstockteils Gorleben modelliert (s. 4.3.3). Dabei wurden zwei sehr spezielle hydrogeologische Modellprofile herangezogen, die offensichtlich durch die damaligen politische Grenzen beeinflusst wurden.

Nach diesen beiden Modellierungen wird Grundwasser mit horizontalen Geschwindigkeiten von cm pro Jahr bis dm pro Jahr an den Salzstock herangeführt und steigt an dessen Rand mit im Bereich von cm pro Jahr auf. Die Aquifere in den quartären und tertiären Schichten des Nebengebirges führen Grundwasser in der Größenordnung von m pro Jahr an den südwestlichen Salzstockrand heran (s. 4.3.3). Das Aufsteigen von Grundwasser aus tieferen Stockwerken am südwestlichen Salzstockrand ist mit den geothermischen Messungen gut korrelierbar (s. Abb. 4.-16).

Mit den Ergebnissen der genannten Modellierungen wurde der vertikal undurchlässige 3d-Modellraum am Standort Gorleben begründet (BGR 1990a). Da aber politische Gegebenheiten sinnvollere Modellprofile verhindert haben, sind die Modellergebnisse nur als Spezialfälle zu betrachten und nicht auf den gesamten Modellrand der 3d-Modellierung übertragbar.

Für die berechneten Grundwassergeschwindigkeiten kann zusammenfassend gesagt werden, daß sich danach das tiefere Grundwasser in den Gebieten mit Vorkommen von vorausseilender Subrosion mit vertikalen Geschwindigkeiten von cm bis dm pro Jahr und horizontal von m pro Jahr bewegt. Diese Feststellungen gelten nicht für das Hutgestein, für das keine gesicherten Werte vorliegen.

Die Untersuchungsergebnisse zur Grundwasserbewegung gelten nur für den Status quo. Klimaveränderungen, eine verstärkte Grundwasserförderung oder eine verstärkte Hebung des Salzstockdaches durch eingelagerte wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfälle können die jetzigen hydraulischen Verhältnisse gravierend verändern, so daß die hier getroffenen Aussagen an Gültigkeit verlieren. Besonders eine verstärkte Hebung kann in den tieferen Grundwas-

sersystemen, speziell im Bereich der Gorlebener Rinne, neue Wasserwegsamkeiten in tiefere Bereiche des Salzstockes schaffen oder reaktivieren.

Die bisher durchgeführten und ausgewerteten hydrochemischen Untersuchungen dienten im wesentlichen der Charakterisierung verschiedener hydrochemischer Grundwassertypen und der Ableitung des Chemismus der Grundwässer. Sie erlauben im wesentlichen jedoch keine Aussage über die zeitliche Änderung der Grundwasserbeschaffenheit und über die Dynamik der Grundwasserbewegung (s. 4.4.3). Genauere Aussagen über diesen Sachverhalt werden vermutlich erst nach Weiterführung der Grundwasseruntersuchungen entsprechend dem Konzept der BGR (1990b) möglich sein.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen jedoch erkennen, daß die verschiedenen Grundwasserleiter Kontakt miteinander haben. So gehört der Typ der alkalisierten Austauschwässer (NaHCO_3 -Wässer, NaSO_4 -Wässer) zu den Grundwässern in den Deckgebirgsschichten. Die Entstehung dieser Wässer beruht auf der Mischung eines hochkonzentrierten NaCl -Wassers mit einem schwachmineralisierten CaHCO_3 -Wasser. *Weiterhin weisen die Vorkommen lokaler Versalzungszone auf begrenzte vertikale Wegsamkeiten für Grundwasser im Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben hin.*

Nach wie vor unklar ist die Ursache für die Überschichtung von geringer mineralisiertem Grundwasser mit höher mineralisiertem (Salzwasserlinse). *Allein aus der Kenntnis der hydrochemischen Befunde läßt sich die Dynamik der Grundwasserbewegung bislang nicht ableiten. Bestimmte hydraulische Befunde (vertikale Grundwasserbewegungen) werden aber durch hydrochemische Befunde gestützt. Isotopenuntersuchungen zur Altersbestimmung des Grundwassers lassen zwar eine generelle Altersabfolge erkennen, ergeben aber auch, daß das tiefe Grundwasser relativ jung (ca. 10.000 Jahre) ist.*

Bewertung:

Werden die Befunde mit den Bewertungsmerkmalen von Kriterium 3.1 (s. 3.2.4.2.2) verglichen, dann führt dies zur **Bewertung "sehr ungünstig"**. Zu dieser Bewertung führen insbesondere die relativ hohen gemessenen und modellierten Grundwassergeschwindigkeiten, die hydrothermischen und hydrochemischen Befunde sowie das relativ junge Alter des tiefen Grundwassers.

Kriterium 3.2: Grundwasserlaufzeiten durch das Deckgebirge

Mit Simulationsmodellen sind für den Endlagerstandort Gorleben Laufzeiten von Grundwasserpunkten berechnet worden, die Hinweise auf die Ausbreitung von freigesetzten Radionukliden liefern (s. 4.3.2.4). *Berechnete Fließzeiten unter Einbeziehung der Dispersion, aber ohne Berücksichtigung der Sorption, betragen danach (unter Einbeziehung des Hutgesteins)*

4.000 - 17.000 Jahre von Startpunkten an der Rinnenbasis bis ins Vorflutgebiet nördlich der Elbe und 4.000 - 6.000 Jahre von Startpunkten in der westlichen Nebenrinne bis ins Vorflutgebiet der Lucie (s. 4.3.2.4). Vergleicht man diese Fließzeiten mit älteren Modellversuchen (BGR 1984b) oder mit alternativen Modellen (PSE 1985b), so können erhebliche Unterschiede festgestellt werden. *Bei diesen liegen die kürzesten Laufzeiten für vergleichbare Laufwege im Bereich von 1.000 Jahren und die längsten Laufzeiten im Bereich von 10.000 Jahren (s. 4.3.2.4).*

Ob damit die kürzesten Verbindungen des Grundwassers vom Salzspiegel und besonders von Gebieten mit vorausseilender Subrosion zur Oberfläche erfaßt wurden, ist nicht sicher. Der Abb. 4.-6 sind die Fließwege zu entnehmen, deren Länge zwischen ca. 4 km und ca. 10 km liegt. Die oberflächennahen Grundwasserversalzungen im Deckgebirge (s. Abb. 4.-16) lassen noch erheblich kürzere Wege vermuten. Wie groß Laufzeitschwankungen ausfallen können, auch wenn nur lokal geringe Startveränderungen vorgenommen werden, zeigen die Modellierungen bei PSE (1985b). Dort führten nur geringe Lageveränderungen der Partikelstartpunkte zu Laufzeitschwankungen von über 200 %. Auch Korrekturen an einzelnen Modellzellen lieferten Laufzeitschwankungen von ca. 300 % (s. 4.3.2.4). Es kann vermutet werden, daß weitere Modifizierungen an den numerischen Modellen zu weiteren ähnlich großen Laufzeitschwankungen führen werden. Abschließende und gesicherte Aussagen über die Grundwasserlaufzeiten im Deckgebirge sind damit nicht möglich, *allerdings ist erkennbar, daß die tatsächlichen Grundwasserlaufzeiten wahrscheinlich deutlich unterhalb der erforderlichen Isolationszeiten für langlebige Radionuklide liegen*. Damit ist nichts über die möglichen Mengen an radioaktiven Substanzen gesagt, die in die Biosphäre eintreten. Diese werden wesentlich bestimmt von der Freisetzungsmenge aus dem Salzstock sowie den Sorptionseigenschaften der Deckgebirgsschichten entlang der Grundwasserlaufwege.

Bewertung:

Werden die Befunde mit den Bewertungsmerkmalen für Kriterium 3.2 (s. 3.2.4.2.1) verglichen, dann führt dies zur **Bewertung "sehr ungünstig"**. Zu dieser Bewertung führen die kurzen modellierten Grundwasserlaufzeiten, die deutlich unter dem erforderlichen Isolationszeitraum liegen.

Zusammenfassend bleibt festzustellen: Wendet man die in Kap. 3.2.4.2.1 abgeleiteten und in Kap. 3.2.4.2.2 formulierten Kriterien auf die gegenwärtig bekannten geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Neben- und Deckgebirge des Teilsalzstockes Gorleben an, dann führen alle sechs Kriterien zu der Bewertung "sehr ungünstig". Der Standort Gorleben besitzt also nach gegenwärtiger Kenntnis weder eine potentielle Eignung noch eine wie auch immer gemeinte Eignungshöflichkeit. Weil diese Kriterien in der notwendigen Doppelfunktion des Barriereteils "Neben- und Deckgebirge" (s. 3.2.4.2.1) begründet liegen, gilt diese Bewertung - obwohl sie nur aus den Befunden zu Deck- und Nebengebirge abgeleitet wird - zwingend für den

"Gesamtstandort" (d.h. die gesamte aus Salzstock und Deck- bzw. Nebengebirge bestehende geologische Barriere). Die ungünstigen Eigenschaften eines Teils der geologischen Barriere können nicht durch mögliche günstige Eigenschaften des anderen Teils ausgeglichen werden (s. 3.2.4.2.1).

Die unzureichende Wirksamkeit des natürlichen Barriereteils Deck- und Nebengebirge führt dazu, daß längerlebige Radionuklide, die aus dem Salzstock freigesetzt werden, in jedem Fall in relativ kurzer Zeit (in Abhängigkeit von der tatsächlich wirksamen Sorption) die Biosphäre erreichen werden. Inwieweit zukünftige Veränderungen der Randbedingungen der Grundwasserbewegung (z.B. klimatischer Art) zu schnelleren oder deutlich langsameren Grundwasserlaufzeiten führen oder die potentielle Barrierewirkung des Salzstockes beeinflussen, kann auf der Grundlage der spärlichen Aussagen in BFS (1990) nicht sicher entschieden werden.

6. Quellen

- ALBRECHT, E. (1983): Interview mit dem niedersächsischen Ministerpräsidenten Ernst Albrecht über Atomstrom, Wiederaufarbeitung und Entsorgung.- Bonner Energiereport, 4. Jg., Nr. 10 vom 06.06.1983, S. 18-21, Bonn.
- ALBRECHT, I., APPEL, D., FINK von RABENHORST, U. & KREUSCH, J. (1989): Der Nachweis der Langzeitsicherheit bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle - Kurzer Prognosezeitraum garantiert keine Sicherheit.- 122 S.; Hannover (Gruppe Ökologie).
- APPEL, D. (1981): Zwischenergebnisse zum Thema Quartär, Tertiär und Grundwasser - Berechnungen von Salzaufstiegs- und Subrosionsraten am Salzstock Gorleben mit Hilfe geologischer Schnitte.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.): Entsorgung. Bericht von einer Informationsveranstaltung im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung - Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben, S. 254-259; Bonn.
- APPEL, D. (1982): Darstellung der geologischen Barriere "Deckgebirge" (Quartäranteil) und der Entwicklung des Salzstocks Gorleben im Quartär.- Entsorgung, Bd. 2 - Zwischenergebnisse zum Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE): S. 39-70; Bonn, Berlin.
- APPEL, D. (1983): Darstellung der geologischen Barriere "Deckgebirge" (Quartäranteil) und der Entwicklung des Salzstocks Gorleben im Quartär.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.): Entsorgung, Bd. 2. Bericht von einer Informationsveranstaltung am 23.10.1982 in Hitzacker im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung. Zwischenergebnisse zum Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), S. 39-70; Bonn.
- APPEL, D. (1992): Kann die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle zuverlässig nachgewiesen werden? - Methodische Probleme beim Umgang mit langen Zeiträumen.- In: GÖMMEL, R. (Hrsg.): Sicherheitstechnische Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Vorträge anlässlich eines zweitägigen Seminars der KTG-Fachgruppe Chemie und Entsorgung und des GSF-Instituts für Tieflagerung.- GSF-Bericht 6/92, S. 17-22; Neuherberg.
- APPEL, D. & KREUSCH, J. (1984): Gutachterliche Stellungnahme zum Zusammenfassenden Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.- 122 S.- In: Bundestagsdrucksache 10/327, Protokoll 31 (Anlage 4), Bonn.
- APPEL, D., DUPHORN, K., GIES, H., GRIMMEL, E., HERRMANN, A. G., JARITZ, W., KREUSCH, J. & VENZLAFF H. (1985): Endlagerung radioaktiver Abfälle im Salzstock Gorleben? Geowissenschaftliche Stellungnahmen für die öffentliche Anhörung im Innenausschuß des Deutschen Bundestages am 20. Juni 1984 (Auszüge aus Protokoll Nr. 31).- Werkstattreihe des Öko-Instituts, 16, 184 S.; Freiburg.

- ARBEITSKREIS (1991): Bericht des Arbeitskreises auf Staatssekretärebene zur Entsorgung der Kernkraftwerke in der Bundesrepublik Deutschland, Bericht (Entwurf) v. 17.07.1991, Bonn.
- BAUMANN, J. (1989): Geochemische Auswertung ausgewählter Wasseranalysen aus dem hydrogeologischen Untersuchungsprogramm Gorleben - Mischung von hochkonzentrierten Solen mit karbonatischen Süßwässern. - Bericht BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Februar 1989.
- BDG - Bundesverband Deutscher Geologen (1990): Höchstmengenwerte für Schadstoffe in Boden, Grundwasser und Luft - Dokumentation und Bewertung aus geowissenschaftlicher Sicht.- Schriftenreihe des BDG, Heft 5, 105 S.; Bonn (Bearbeiter: APPEL, D., KIERON, M., PÖPPELBAUM, M.).
- BESENECKER, H., KRIEGER, K., H., NEUSS, M. (1983): Zur Regeneration eines Aquifersystems im Bereich quartärer Stauchzonen (Höhbeck / NE-Niedersachsen).- Z. dt. geol. Ges., 134, 735-754, 12 Abb., 2 Tab; Hannover.
- BFS - Bundesamt für Strahlenschutz (1990): Fortschreibung des Zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben vom Mai 1983.- Bericht ET-2/90, April 1990, Salzgitter.
- BFS - Bundesamt für Strahlenschutz (1991): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen.- BfS-Schrift 4/91: 67 S.; Braunschweig.
- BFS - Bundesamt für Strahlenschutz (1992): Salzstock Gorleben - Als Endlager geeignet? Erkenntnisse aus der bisherigen Erkundung, Broschüre, 24 S., Salzgitter.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1981): Boden- und nutzungsspezifische Jahreswerte der Grundwasserneubildung im Raum Lüchow-Dannenberg, Abschlußbericht der bodenhydrologischen Untersuchungen (Teilprojekt des "Hydrogeologischen Untersuchungsprogrammes Gorleben") 1.3.1980 - 31.3.1981, Hannover - (unveröffentlicht).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1984a): Hydraulische Modelluntersuchungen zur tiefen Grundwasserbewegung an ausgewählten Profilen zwischen dem Elm und der südlichen Lüneburger Heide.- Hannover (Bearbeiter: G. SCHMIDT).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1984b): Hydraulische Modelluntersuchungen zum Fließverhalten des Grundwassers im Bereich des Salzstockes Gorleben; Stand Mai 1984, Hannover.

- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1987): Die Bewegung des Grundwassers im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben - Untersuchungen mit einem numerischen Modell, Stand Okt. 1987, Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1988): Hydrogeologische, geohydraulische und geotechnische Untersuchungen an geplanten Standorten für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Teilprojekt III Geothermik; Abschlußbericht. BMFT-Forschungsvorhaben KWA 53090, KWA 85050, KWA 95049/2, Stand Sept. 1988, Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1989): Geochemische Auswertung ausgewählter Wasseranalysen aus dem hydrogeologischen Untersuchungsprogramm Gorleben. Mischung von hochkonzentrierten Solen mit karbonatischen Süßwässern; Stand 1.2. 1989, Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990a): Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben - Zusammenfassender Bericht; Stand 1. 1. 1990, Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990b): Grobkonzept für die Beweissicherung: Grundwasserstand und Grundwasserbeschaffenheit, Stand 16.08.1990, Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990c): Begrenzung und Volumen des Salzstocks Gorleben, Stand 23. 02 1990, Hannover.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990d): Stellungnahme zur Standorterkundung Gorleben in bezug auf außerhalb Niedersachsens gelegene Gebiete.- 4 S.; Hannover (Bearbeiter: W. JARITZ).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1991a): Strukturgeologie der Umgebung des Salzstocks Gorleben.- 57 S.; Hannover (Bearbeiter: M. ZIRNGAST).
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1991b): Biostratigraphische Untersuchung paläogener Proben des Salzstocks Gorleben anhand von Dinoflagellaten und deren geologische Interpretation - Zwischenbericht zum Arbeitspaket 9G 411 110 00.- 42 S.; Hannover (Bearbeiter: A. KÖTHE).
- BLECK-NEUHAUS, J. (1983): Abschätzung der Wirkung freigesetzter Radionuklide auf das System Biosphäre/Mensch.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (1983, Hrsg.): Entsorgung Bd. 2. Bericht von einer Informationsveranstaltung am 23.10.1982 in Hitzacker im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung. Zwischenergebnisse zum Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), S. 217-229; Bonn.

- BMFT - Bundesminister für Forschung und Technologie, Hrsg. (1981): Entsorgung. Bericht von einer Informationsveranstaltung am 15./16. Mai 1981 in Lüchow im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung - Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben.- 561 S.; Bonn.
- BMFT - Bundesminister für Forschung und Technologie, Hrsg. (1983): Entsorgung Band 2. Bericht von einer Informationsveranstaltung am 23.10.1982 in Hitzacker im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung. Zwischenergebnisse zum Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE).- 313 S.; Bonn.
- BMFT - Bundesministerium für Forschung und Technologie (1983): Zur friedlichen Nutzung der Kernenergie, 3. veränd. Aufl., 458 S.; Bonn.
- BMFT - Bundesministerium für Forschung und Technologie, Hrsg. (1984): Entsorgung, Bd. 3. Bericht von einer Informationsveranstaltung des Bundes vor dem Schachtabteufen am 27./28. Mai 1983 in Hitzacker - Salzstock Gorleben.- 565 S.; Bonn.
- BROSE, F. & H. BRÜHL (1986): Versalzungszone des oberflächennahen Grundwassers im Raum Gorleben. - Z. dt. geol. Ges., 137, S. 97-104, Hannover.
- BROSE, F. (1991): Untersuchungen zu Auftreten örtlicher Versalzungen im oberflächennahen Grundwasser in der Umgebung des Salzstockes von Gorleben.- Dissertation, 127 S., 99 Abb. ; Berlin.
- BRÜHL, G., BÜTOW, E. & GÜLKER, M. (1983): Berechnung der Grundwasserbewegung im Raum Gorleben.- Z. dt. geol. Ges. 134, S. 807-820; Hannover.
- BRÜHL, G., FABER, P. (1983): Beobachtungen zur Versalzung oberflächennahen Grundwassers im Naturschutzgebiet Lucie (Kreis Lüchow-Dannenberg).- Z. dt. geol. Ges. 134, S. 1055-1067; Hannover.
- BUNDESREGIERUNG (1985): Bulletin der Bundesregierung Nr. 8 vom 26.01.1985, S. 66, Bonn.
- BUNDESREGIERUNG (1988): Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag zur Entsorgung der Kernkraftwerke und anderer kerntechnischer Einrichtungen, Dt. Bundestag, 11. Wahlperiode, Drucksache 11/1632 v. 13.01.1988, 60 S., Bonn.
- BULÄN (1979): Beschluß der Regierungschefs von Bund und Ländern zur Entsorgung der Kernkraftwerke vom 28. September 1979.- Bulletin der Bundesregierung, Nr. 122 (1979), S. 1133, Bonn.
- CEPEK, A. (1968): Tektonische Bewegungen im Quartär.- In: Grundriß der Geologie der Deutschen Demokratischen Republik, 1: 407-420; Berlin (Akademie-Verlag).

- CLOSS, K.D. (1990): Stand der Arbeiten zur Direkten Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland.- Statusbericht Direkte Endlagerung, Seminar am 16./17. Januar 1990, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- DAK - Deutsche Atomkommission (Hrsg. 1963): Zweites Atomprogramm für die Bundesrepublik Deutschland, Bonn.
- DBE - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern (1984a): Beschreibung und sicherheitstechnische Arbeiten zum Modell-Endlager bei der Integrierten Entsorgung.- Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, Technischer Anhang 15, KfK Karlsruhe.
- DBE - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern (1984b): Technische Beschreibung des Endlagers bei den Anderen Entsorgungstechniken.- Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, Technischer Anhang 6, KfK Karlsruhe.
- DBE - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern (1989): Einlagerung von Abfallgebinden.- Systemanalyse Mischkonzept, Technischer Anhang 3, KfK Karlsruhe.
- DIN 18130 Teil 1: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes, Laborversuche; Vornorm 1983.
- DUPHORN, K. (1981): Erste quartärgeologische Ergebnisse der hydrogeologischen Aufschlußbohrungen Gorleben.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (1981, Hrsg.): Entsorgung. Bericht von einer Informationsveranstaltung im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung am 15./16. Mai 1981 in Lüchow - Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben, S. 217-236; Bonn.
- DUPHORN, K. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben.- Abschlußbericht im Auftrag der PTB, 265 S.; Kiel-Wellington/Néuseeland.
- DUPHORN, K. (1984a): Quartäre Schichtenfolge im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben.- In: Bundesministerium für Forschung und Technologie (1984, Hrsg.): Entsorgung Band 3. Bericht von einer Informationsveranstaltung des Bundes vor dem Schachtabteufen am 27./28. Mai 1983 in Hitzacker - Salzstock Gorleben, S. 29-59; Bonn.
- DUPHORN, K. (1984b): Quartärgeologische Ergebnisse und Probleme bei der Endlagerforschung Gorleben.- Berichte - Reports, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel, Nr. 6, 47 S., Kiel.
- DUPHORN, K. (1987): Die quartäre Subrosion am Endlagersalzstock Gorleben.- Eine vergleichende Betrachtung der Arbeitsmethoden, Bohrbefunde, Deutungen und sicherheitsgeologischen Bewertungen.- Meyniana, 39, S. 41-69, Kiel.

- DUPHORN, K. (1988): Gorleben - Geologisches Gutachten zur Schacht- und Endlagerproblematik.- 141 S.; Kiel (im Auftrag der SPD-Fraktion im Niedersächsischen Landtag).
- DVWK (1987): Erkundung tiefer Grundwasser-Zirkulationssysteme - Grundlagen und Beispiele.- DVWK Schriften 81, Parey, Hamburg, Berlin.
- EHRlich, D., RÖTHEMEYER, H., STIER-FRIEDLAND, G. & THOMASKE, B. (1986): Langzeitsicherheit von Endlagern. Zeitrahmen für Sicherheitsbetrachtungen - Bewertung der Subrosion des Salzstocks Gorleben.- Atomwirtschaft-Atomtechnik, 31 (5), S. 231-136.
- GRIMMEL, E. (1979): Warum der Salzstock Gorleben als Atommülldeponie ungeeignet ist.- Öko-Bericht, 4; Freiburg.
- GSF - Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (1990): Endlagersicherheit in der Nachbetriebsphase (Rahmenplan für notwendige FE-Arbeiten).- GSF-Bericht 6/90, Neuherberg.
- HAHN, J. (1987): Anforderungen an zukünftige Abfallbehandlung und -lagerung.- IWS-Schriftenreihe, 2, S. 27-73; Berlin.
- HERRMANN, A.G. (1990): Lösungen im Salzstock.- In: BFS - Bundesamt für Strahlenschutz (1990): Fortschreibung des Zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standorterkundung Gorleben vom Mai 1983, ET-Bericht 2/90, S. 69-79, Salzgitter.
- HOFFMANN (1983): Planung und wissenschaftliche Auswertung der Pumpversuche im Raum Gorleben im Rahmen des Hydrogeologischen Untersuchungsprogramms Gorleben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig: Bericht zum 1. Pumpversuch im Weißen Moor.- Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover; Dez 1983, Hannover.
- HOFFMANN (1985): Planung und wissenschaftliche Auswertung der Pumpversuche im Raum Gorleben im Rahmen des Hydrogeologischen Untersuchungsprogramms Gorleben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig: Bericht zum 2. Pumpversuch im Weißen Moor.- Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover; Nov. 1985, Hannover.
- HOFFMANN (1986): Planung und wissenschaftliche Auswertung der Pumpversuche im Raum Gorleben im Rahmen des Hydrogeologischen Untersuchungsprogramms Gorleben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig: Bericht zum Pumpversuch "Meetschow" und "Gorlebener Tannen".- Inst. f. Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover; April 1986, Hannover.

- HOHLEFELDER, W. (1987): Das integrierte Entsorgungskonzept der Bundesrepublik Deutschland und die derzeitige Entsorgungssituation.- In: BAYER. STAATSMIN. F. LANDESENTW. U. UMWELTFRAGEN (Hrsg. 1987): Entsorgung von Kernkraftwerken - Symposiumsbericht, S. 34 - 47, Econ-Verlag, Düsseldorf, Wien, New York.
- HURTIG, E. (1965): Beziehungen zwischen Oberflächenmorphologie und Salzstrukturen.- Geophys. Geol., 7: 42-56; Leipzig.
- JARITZ, W. (1980): Bemerkungen zur Geologie des präquartären Untergrundes in der Umgebung von Gorleben.- Z. dt. geol. Ges., 131, S. 522-529; Hannover.
- JARITZ, W. (1981): Vorkenntnisse über den Salzstock Gorleben und Gründe für die Annahme als Untersuchungsobjekt durch den Bund.- In: BMFT (1981, Hrsg.): Entsorgung - Bericht von einer Informationsveranstaltung im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung am 15./16.05.1981 in Lüchow zu "Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben", S. 12-19, Bonn.
- JTK (1993): Feststellung in verschiedenen Beiträgen von Vertretern des BfS, der DBE und der NUKEM GmbH auf der Jahrestagung Kerntechnik '93 in Köln (25.-27. Mai 1993).- Tagungsbericht Jahrestagung Kerntechnik '93, Hrsg. v. Deutschen Atomforum u. d. Kerntechnischen Gesellschaft, 495 S.
- KEWA - Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungs-Gesellschaft (1975): Konzept für eine industrielle Kernbrennstoff-Wiederaufarbeitungsanlage.- Erstellt i.A. von Bayer AG, Gelsenberg AG, Hoechst AG, Nukem GmbH, Juli 1975, KEWA GmbH, Frankfurt/Main.
- KFK - Kernforschungszentrum Karlsruhe (1989): F + E - Programm Direkte Endlagerung. Entwicklungsstand der Direkten Endlagerung in der Bundesrepublik Deutschland.- Bericht AE Nr. 23, Juli 1989, Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken, Karlsruhe.
- KFK - Kernforschungszentrum Karlsruhe (1990): Direkte Endlagerung, Projektgruppe Andere Entsorgungstechniken, Stand Juli 1990, Karlsruhe.
- KIM, J.I. (1987-1989): Huminstoff-Untersuchungen an Gorleben-Grundwässern. - IfR - Institut für Radiochemie der technischen Universität München, Abschlußbericht: 1.1.1987 - 31.12.1989, im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der Bundesanstalt für Strahlenschutz.
- KLINGE, H. & WIPPERMANN, T. (1993): Auswertung von Vergleichsanalysen an Grundwässern aus dem Bereich des Salzstocks Gorleben.- Bericht der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) v. März 1993, Hannover.

- KREUSCH, J. & HIRSCH, H. (1984): Sicherheitsprobleme radioaktiver Abfälle im Salz - Beschreibung der Konzepte, Mängel und Grenzen von Sicherheitsanalysen, Diskussion von Schutzziele und Kriterien.- Schriftenreihe der Max-Himmelheber-Stiftung, 9, 189 S.; Hannover.
- KREUSCH, J. (1983): Vorgehensweisen bei Sicherheitsanalysen des Endlagers für radioaktive Abfälle.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.): Entsorgung Band 2. Bericht von einer Informationsveranstaltung am 23.10.1982 in Hitzacker im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung. Zwischenergebnisse zum Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), S. 127-135; Bonn.
- KÜHN, K. (1976): Zur Endlagerung radioaktiver Abfälle - Stand, Ziele und Alternativen.- atomwirtschaft-atomtechnik, XXI Jg., Nr. 7, S. 357 - 362.
- KÜHN, K. (1980): Kurzstudie zu den Fragen "Welche Kriterien müssen für die Eignungsprüfung eines gegebenen Salzstocks für die Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle herangezogen werden, u.a. Fragen".- In: BMFT (Hrsg. 1980): Kriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle - Diskussionsbeiträge, S. 10 - 24, Bonn.
- KÜHN, K. (1987): Endlagerung radioaktiver Abfälle.- In: BAYER. STAATSMIN. F. LANDES-ENTW. U. UMWELTFRAGEN (Hrsg. 1987): Entsorgung von Kernkraftwerken - Symposiumsbericht, S. 79 - 92, Econ-Verlag, Düsseldorf, Wien, New York.
- MARTINI, H.J. (1963): Bericht zur Frage der Möglichkeit der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Untergrund.- Bericht der Bundesanstalt für Bodenforschung, unveröff., Hannover [zit. nach KÜHN 1980].
- MAUTHE, F. (1979): Probleme und Risiken bei der geplanten Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem nordwestdeutschen Salzstock.- Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, 18, 60 S.; Hannover.
- MAUTHE, F. (1981): Wertung von Zwischenergebnissen des Untersuchungsprogramms Gorleben im Hinblick auf die Eignung des Salzstocks Gorleben als Endlager für radioaktive Abfälle.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (1981, Hrsg.): Entsorgung. Bericht von einer Informationsveranstaltung im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung am 15./16. Mai 1981 in Lüchow - Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben, S. 411-417; Bonn.
- MAUTHE, F. (1983): Funktion der Barriere Salzstock.- In: Bundesminister für Forschung und Technologie (1983, Hrsg.): Entsorgung Band 2. Bericht von einer Informationsveranstaltung am 23.10.1982 in Hitzacker im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung. Zwischenergebnisse zum Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), S. 23-31; Bonn.

MEINHOLD, R. & REINHARDT, H.-G. (1967): Halokinese im Nordostdeutschen Tiefland.- Ber. dt. Ges. geol. Wiss., A., 12(3/4), S. 329-353; Berlin.

MEINHOLD, R., UNGER, E. & WIENHOLZ, R. (1961): Neue Erkenntnisse über den prätertiären Untergrund des Flachlandes der Deutschen Demokratischen Republik.- Z. angew. Geol., 1961(2), S. 74-75; Berlin.

MÜLLER, H. (1986): Altquartäre Sedimente im Deckgebirge des Salzstockes Gorleben.- Z. dt. geol. Ges., 137, S. 85-95, Hannover.

NAS - National Academy of Sciences/National Research Council (1957): The Disposal of Radioactive Waste on Land.- Publication 519, Washington D.C.

NL - Rijks Geologische Dienst (1980): Schreiben vom 20.3.1980 an die Gemeinsame Informationsstelle Bund - Land (Beauftragter des Landes, Dr. Becker-Platen); Haarlem, Niederlande (Bearbeiter: H. M. Harsveldt).

PAGIS (1988): Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste - Disposal in Salt formations.- GSF-Report Nr. 23/88, 786 S. (Bearbeiter: STORCK, R., ASCHENBACH, J., HIRSEKORN, R.P., NIES, A., STELTE, N.).

PICKEL (1979-1986): Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben, Abschlußbericht Teil 1, Erläuterungen.- Ing.-Büro Dr. Pickel, Fuldata.

PICKEL (1982): Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben. Abschlußbericht. Teil 3: Technischer Ergebnisbericht.- 218 S., Berichtsstand Febr. 1982.- Ing.-Büro Dr. Pickel, Fuldata.

PLEIN, E. (1978): Rotliegend-Ablagerungen im Norddeutschen Becken.- Z. dt. geol. Ges., 129, S. 71-97; Hannover.

PSE - Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (1985a): Grundwasserbewegung im Deckgebirge über dem Salzstock Gorleben. Datenermittlung, Interpretation und Modellrechnungen.- Abschlußbericht, Fachband 17, Bearbeiter: BOEHME, J., DELISLE, G., FIELITZ, K., GIESEL, W., KELLER, S., LUDWIG, R., SCHELKES, K., SCHILDKNECHT, F., SCHMIDT, G., VIERHUFF, H., Berlin.

PSE - Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (1985b): Modellrechnungen zur Ausbreitung von Radionukliden im Deckgebirge.- Abschlußbericht, Fachband 18, Bearbeiter: BÜTOW, E., BRÜHL, G., GÜLKER, M., HEREDIA, L., LÜTKEMEIER-HOSSEINIPOUR, R., NAFF, R., STRUCK, S., Berlin.

- PSE - Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (1985c): Zusammenfassender Abschlußbericht. Kapitel 4: Entwicklung eines sicherheitsanalytischen Instrumentariums für das geologische Endlager für radioaktive Abfälle in einem Salzstock.- 106 S.; Berlin.
- PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (1983): Zusammenfassender Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben.- 151 S.; Braunschweig.
- PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (1986): Plan Endlager für radioaktive Abfälle, Schachanlage Konrad.- Braunschweig.
- RANDL (1981): Diskussionsbeitrag.- In: BMFT (1981, Hrsg.): Entsorgung - Bericht von einer Informationsveranstaltung im Rahmen des Energiedialogs der Bundesregierung am 15./16.05.1981 in Lüchow zu "Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben", S. 61-62, Bonn.
- REINHARDT, H.-G. (1967): Hinweise der Prospektionsseismik auf rezente Salzbewegungen im Norden der DDR.- Geologie, 16, S. 95-100; Berlin.
- RÖHLING, H.-G. (1991): A Lithostratigraphic Subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German Sector of the North Sea, Based on Gamma-Ray and Sonic Logs.- Geol. Jb., A 119, S. 3-24; Hannover.
- RÖTHEMEYER, H. (1987): Endlagerung radioaktiver Abfälle in der BR Deutschland - Projekte, Mengen, Sicherheit.- In PTB (Hrsg. 1987): Fachbeiträge zur Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle, Nr. 1/87, S. 8 - 12, Braunschweig.
- RSK - Reaktor-Sicherheitskommission (1983): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk.- Bundesanzeiger, 2 (1983), S. 45-46; Köln.
- RSK/SSK - Reaktor-Sicherheitskommission/Strahlenschutzkommission (1988): Zeitrahmen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Gemeinsame Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) und der Strahlenschutzkommission (SSK).- Ergebnisprotokoll der 233. RSK-Sitzung am 22.6.1988, Anlage 1.
- SCHEFFLER, K. & TEPEL, C. (1992): Vergleichende Untersuchung zur zentralen und dezentralen Konditionierung abgebrannter Brennelemente für die Direkte Endlagerung.- KfK-Bericht 5107, Dez. 1992, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- SCHELKES, K. & H. VIERHUFF (1983): Über den Einfluß undichter Aufsatzverrohrungen bei Grundwasser-Meßstellen auf hydrogeologische Untersuchungen. - Z. dt. geol. Ges., 134, S. 789-805.

- SCHMIDT-KÜSTER, W.-J. (1982): Was hat die Bundesregierung für die nukleare Entsorgung getan?.- Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 2, 1982, S. 3 - 8, Bonn.
- SCHOTT, W. (1967): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland.- BGR (Hrsg.); Hannover.
- SCHRÖDER, P. (1988): Aufbau und Untergliederung des Niederterrassenkörpers der Unterelbe.- Diss. Univ. Hannover: 133 S.; Hannover.
- STICHLER, W. (1981): Bericht über Messungen des ^2H - und ^{18}O -Gehaltes in Grundwässern aus dem Raum Gorleben.- Bericht d. Instituts für Radiohydrometrie der GSF v. 20.11.981, Neuherberg.
- STORK, R. (1992): Methodik des Nachweises der Langzeitsicherheit eines Endlagers in einem Salzstock vor dem Hintergrund bestehender Unsicherheiten.- In: GÖMMEL, R. (Hrsg.): Sicherheitstechnische Aspekte bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Vorträge anläßlich eines zweitägigen Seminars der KTG-Fachgruppe Chemie und Entsorgung und des GSF-Instituts für Tieflagerung.- GSF-Bericht 6/92, S. 23-29; Neuherberg.
- TITTEL, G. & WARNECKE, E. (1991): Radioaktive Abfälle.- In: RÖTHEMEYER, H. (Hrsg. 1991): Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wegweiser für eine verantwortungsbewußte Entsorgung in der Industriegesellschaft, S. 100 - 104.
- VIEHL, E. (1981a): Deutsche Konzeption der Endlagerung radioaktiver Abfälle.- In: BANCK et al. (1981): Entsorgung von Kernkraftwerken, S. 117 - 127, Verlag TÜV Rheinland, Köln.
- VIEHL, E. (1981b): Standorterkundung und Anlagenplanung für die im Raum Gorleben geplante Endlagerung radioaktiver Abfälle.- Bericht PTB-SE-4, 34 S., März 1981, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.
- WAGENBRETH, O. & STEINER, W. (1982): Geologische Streifzüge.- 204 S.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- WALLBRECHER E. (1986): Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen.- Enke-Verlag.
- WESSELOW, T. (1992): Projekt Gorleben - Handbuch zur Probennahme für Hydrogeologische Untersuchungen. - Bericht DBE - Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH, im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Gorleben, 15.06.1992.
- WIENHOLZ, R. (1965): Über den geologischen Bau des Untergrundes im Nordostdeutschen Flachland.- Jb. Geol., 1, S. 1-87; Berlin.

WILHELM F. (1987): Hydrogeographie.- Das Geographische Seminar, Höller und Zwick; Braunschweig.

WOLDSTEDT, P. & DUPHORN, K. (1974): Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter, 3. Aufl., 500 S., Stuttgart.

WOSNIK, G. (1991): Planung des Endlagerbergwerks.- In: RÖTHEMEYER, H. (Hrsg. 1991): Endlagerung radioaktiver Abfälle - Wegweiser für eine verantwortungsbewußte Entsorgung in der Industriegesellschaft, S. 126 - 134.