



Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten
für den Salzstock Gorleben anhand von Lageveränderungen
holsteinzeitlicher Ablagerungen

Auftraggeber: Niedersächsisches Umweltministerium

Auftragnehmer: PanGeo - Geowissenschaftliches Büro

Bearbeiter: Dr. D. Appel
Dr. W. Habler

Hannover, Dezember 1993

Anschriften der Autoren:

Dr. Detlef Appel

PanGeo
Geowissenschaftliches Büro
Schleiermacherstraße 20
30 625 Hannover
Telefon: 0511-55 76 66

Dr. Walter Habler

Dr. Habler & Partner
Jakobistraße 25
30 163 Hannover
Telefon: 0511-39 27 21

**Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten
für den Salzstock Gorleben anhand von Lageveränderungen
holsteinzeitlicher Ablagerungen**

von

Detlef Appel & Walter Habler

Inhalt	Seite
0. Zusammenfassung	1
1. Vorgang und Aufgabenstellung	4
2. Beschreibung der Vorgehensweise	6
2.1 Begriffe	6
2.2 Geologische Grundlagen für die Berechnung von Subrosionsraten	7
2.3 Generelle Vorgehensweise	9
3. Informationsgrundlagen für die Berechnung nachholsteinszeitlicher Subrosionsraten	11
3.1 Datenbasis, Datenauswertung und Ergebnisdarstellung	11
3.2 Beschreibung der zur Berechnung von Subrosionsraten benutzten Schichten	17
3.2.1 Schichtfolge im Überblick	17
3.2.2 Elster-Eiszeit	20
3.2.2.1 Verbreitung der elsterzeitlichen Ablagerungen am Standort Gorleben	20
3.2.2.2 Mächtigkeit der elsterzeitlichen Ablagerungen	20
3.2.2.3 Entwicklung der Elster-Eiszeit	21
3.2.2.4 Petrographie der elsterzeitlichen Ablagerungen	22
3.2.3 Holstein-Interglazial	22
3.2.3.1 Verbreitung der holsteinzeitlichen Ablagerungen am Standort Gorleben	22
3.2.3.2 Mächtigkeit der Holstein-Ablagerungen	23
3.2.3.3 Höhenniveau der Holstein-Ablagerungen	24
3.2.3.4 Entwicklung der Holstein-Warmzeit	24
3.2.3.5 Petrographie der Holstein-Ablagerungen	26
3.2.3.6 Lagerungsverhältnisse der Holstein-Vorkommen	26

3.2.4	Gesteine über den holsteinzeitlichen Ablagerungen	28
3.2.4.1	Saale-Eiszeit	28
3.2.4.1.1	Verbreitung der saalezeitlichen Ablagerungen am Standort Gorleben	28
3.2.4.1.2	Mächtigkeit der saalezeitlichen Ablagerungen	28
3.2.4.1.3	Entwicklung der Saale-Eiszeit	29
3.2.4.1.4	Petrographie der Saale-Ablagerungen	30
3.2.4.1.5	Lagerungsverhältnisse der Saale-Ablagerungen	30
3.2.4.2	Weichsel-Eiszeit	31
4.	Bestimmung der nachholsteinszeitlichen Subrosionsraten	33
4.1	Lage- und Mächtigkeitsverhältnisse neben und über dem Salzstock	33
4.2	Beurteilung des Einflusses von Störfaktoren auf die heutige Position der Holstein-Basis	40
4.2.1	Relief des Ablagerungsraums	40
4.2.1.1	Grundlagen zur Beurteilung des Reliefeinflusses	40
4.2.1.2	Beurteilung des Reliefeinflusses	44
4.2.2	Setzung feinkörniger Gesteine des Lauenburger-Ton-Komplexes	57
4.2.3	Eisstauchung	63
4.3.	Statistische Auswertung der Niveau- und Mächtigkeitsdaten	66
4.3.1	Modellannahmen	66
4.3.2	Ergebnisse der statistischen Auswertung	68
4.3.2.1	Korrelationskoeffizienten	68
4.3.2.2	Faktorenanalyse	70
4.4	Berechnung von Subrosionsraten	80
4.5	Plausibilitätsbetrachtung	85
4.6	Vergleich der Subrosionsraten mit den Ergebnissen anderer Berechnungen	86
5.	Bedeutung nachholsteinzeitlicher Subrosion für das geplante Endlager	91
5.1	Bewertung der Subrosionsraten	91
5.2	Ursachen der Subrosion und Prognose	94
6.	Zitierte Schriften	98

Verzeichnis der Abbildungen

Seite

Abb. 1	Lageplan der hydrogeologischen Erkundungsbohrungen im Bereich des Standortes Gorleben	15
Abb. 2	Lageplan der hydrogeologischen Erkundungsbohrungen über dem Teilsalzstock Gorleben im Bereich der Gorlebener Rinne	16
Abb. 3	Kumulative Häufigkeitsverteilung der Elster-Basis und der Elster-Mächtigkeit in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	36
Abb. 4	Kumulative Häufigkeitsverteilung der Holstein-Basis und der Holstein-Mächtigkeit in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	37
Abb. 5	Kumulative Häufigkeitsverteilung der Saale-Basis und der Saale-Mächtigkeit in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	38
Abb. 6	Kumulative Häufigkeitsverteilung der Weichsel-Basis und der Weichsel-Mächtigkeit in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	39
Abb. 7	Mögliche sedimentationsabhängige Beziehungen zwischen den Mächtigkeiten und Basispositionen der Holstein- und Elster-Serien in Bohrprofilen in der Gorlebener Rinne (Prinzipschnitte und mathematische Beziehungen zwischen diesen Größen)	42
Abb. 8	Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Elster-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	45
Abb. 9	Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Holstein-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	46
Abb. 10	Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Saale-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	47

Abb. 11	Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Weichsel-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	48
Abb. 12	Beziehung zwischen der Basisposition der Elster-Serien und der Basisposition der Holstein-Serien in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	52
Abb. 13	Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Elster-Serien und der Basisposition der Holstein-Serien in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	52
Abb. 14	Basispositionen der Elster-, Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien in den hydrogeologischen Erkundungsbohrungen in der Gorlebener Rinne	55
Abb. 15	Abhängigkeit der Basisposition der Holstein-Serien von der Gesamtmächtigkeit von Tonfolgen in den Elster-Serien	61
Abb. 16	Beziehung zwischen den setzungskorrigierten rechnerischen Absenkungs- bzw. Hebungsbeiträgen der Holstein-Basis und der Gesamtmächtigkeit von Tonfolgen in den Elster-Serien	62
Abb. 17	Beziehung zwischen der Basis von Schuppen aus Holstein-Serien und der Basisposition autochthoner Holstein-Vorkommen in Bohrungen über dem Salzstock	65
Abb. 18	Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen den vier wichtigsten Faktoren des ersten Rechenganges der Faktorenanalyse und den Ausgangsparametern	72
Abb. 19	Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen den vier wichtigsten Faktoren des ersten Rechenganges der Faktorenanalyse und wichtigen petrographischen Parametern der Elster-Serien	73

Abb. 20	Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen "Sedimentationsfaktor" bzw. "Subrosionsfaktor" des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse und den Ausgangsparametern	74
Abb. 21	Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen "Sedimentationsfaktor" bzw. "Subrosionsfaktor" des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse und wichtigen petrographischen Parametern der Elster-Serien	75
Abb. 22	Kumulative Häufigkeitsverteilung des "Subrosionsfaktors" für Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	78
Abb. 23	Kumulative Häufigkeitsverteilung der setzungsbereinigten rechnerischen Werte für nachholsteinzeitliche Aufwärts- bzw. Abwärtsbewegung für Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben	78
Abb. 24	Lageplan der Bohrungen mit hohen Werten für die Faktoren "Subrosion" und "Sedimentation" im Bereich der Gorlebener Rinne über dem Salzstock	79
Abb. 25	Heutige Basispositionen der Elster-, Holstein- und Weichsel-Serien in der Gorlebener Rinne über dem Salzstock in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Elster-Serien	81
Abb. 26	Subrosions- und setzungskorrigierte Basispositionen der Elster- und Holstein-Serien sowie der heutigen Basispositionen der Weichsel-Serien in der Gorlebener Rinne über dem Salzstock in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Elster-Serien	82
Abb. 27	Beziehung zwischen der Mächtigkeit und der Basisposition der Elster-Serien bei acht Zufallsdatensätzen und Mittelwerten von sieben Clustern von Bohrungen über dem Teilsalzstock Gorleben	87
Abb. 28	Beziehung zwischen rechnerischer Absenkung bzw. Hebung der Holstein-Basis und Mächtigkeit der Tertiär-Schichten über dem Salzstock	96

Abb. 29	Beziehung zwischen der heutigen Position des Salzspiegels und der aus der Absenkung der Holstein-Serien errechneten Position des Salzspiegels vor Subrosionsbeginn	96
---------	--	----

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1	Statistische Kennwerte für die Datensätze von Bohrungen neben und über dem Salzstock Gorleben	34
Tab. 2	Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Basispositionen und Mächtigkeiten der Schichten in der Gorlebener (und Gartower) Rinne sowie die Ton- und Schluff- bzw. Sand- und Kiesgehalte (Gesamtmächtigkeiten) in den Elster-Serien getrennt nach Bohrungen über und neben dem Salzstock	69
Tab. 3	Ergebnisse der Faktorenanalyse: Komponentenladungen (Kovarianzen) der fünf wichtigsten Faktoren des ersten Rechenganges	77
Tab. 4	Ergebnisse der Faktorenanalyse: Komponentenladungen (Kovarianzen) der beiden Faktoren des zweiten Rechenganges	77
Tab. 5	Absenkungsbeträge und Geschwindigkeiten nachholsteinzeitlicher Subrosion an den Orten einzelner Bohrungen	84

Anhang

Kurzfassungen der zur Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten herangezogenen Schichtenverzeichnisse

0. Zusammenfassung

Im Rahmen der ergänzenden Begutachtung des Teilsalzstocks Gorleben der Salzstruktur Gorleben-Rambow sind im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums nachholsteinzeitliche Subrosionsraten berechnet worden. Dabei ist ein von APPEL & KREUSCH (1984) beschriebenes Verfahren weiterentwickelt und angewendet worden. Die erforderlichen Ausgangsdaten sind im wesentlichen den Schichtenverzeichnissen der hydrogeologischen Bohrungen der Standorterkundung Gorleben entnommen worden.

Zunächst sind die Höhenlagen und Mächtigkeiten der Holstein-Serien sowie der sie unter- und überlagernden Gesteine in den elstereiszeitlichen Rinnen, insbesondere der Gorlebener Rinne, neben und über dem Salzstock miteinander verglichen worden. Dieser Vergleich bestätigt prinzipiell die seit langem bekannte Beobachtung, wonach die Holstein- und Saale-Basis über dem Salzstock teilweise erheblich tiefere (aber kaum höhere) Positionen aufweisen als neben dem Salzstock. Da die Lagerungsverhältnisse neben dem Salzstock durch Subrosion zweifelsfrei unbeeinflusst sind, müssen tiefe Positionen über dem Salzstock auf Subrosion zurückgeführt werden.

Das setzt allerdings voraus, daß mögliche andere Ursachen für Tieflagen der Holstein-Basis über dem Salzstock, wie das Relief des Ablagerungsraumes zu Beginn der Holstein-Warmzeit, die Setzung der Tone im unterlagernden Lauenburger-Ton-Komplex und die Stauchung der Elster- und Holstein-Serien durch vorrückendes Inlandeis der Saale-Eiszeit, ausgeschlossen oder quantifiziert werden können. Die Auswirkungen dieser Störfaktoren auf die Lage der Holstein-Serien werden beschrieben, soweit möglich auch quantitativ beurteilt. Dazu sind die zu den Basispositionen und Mächtigkeiten der Quartärserien vorliegenden Daten statistisch ausgewertet worden (Korrelationsrechnungen, Faktorenanalyse).

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Das Relief der Gorlebener Rinne war zu Beginn der Holstein-Warmzeit zwar nicht vollständig, jedoch bis auf ein weitgehend einheitliches Niveau aufgefüllt. Reliefunterschiede sind für die tiefen Positionen der Holstein-Basis über dem Salzstock nicht verantwortlich.
- Setzung der Tone des Lauenburger-Ton-Komplexes hat die heutige Position der Holstein-Basis erkennbar beeinflußt. Das

Ausmaß der Setzung kann quantitativ erfaßt werden. Es reicht bei weitem nicht aus, um die tiefen Positionen der Holstein-Serien über dem Salzstock zu erklären.

- Eisstauchung war über dem Salzstock wirksam, kann jedoch grundsätzlich nicht zur Absenkung der Holstein-Basis geführt haben. Sie ist allerdings für deren besonders hohe Position bei einigen Bohrungen verantwortlich.
- Für die weichselzeitlichen Ablagerungen ist mit dem hier angewendeten Verfahren eine Beeinflussung durch Subrosion nicht mehr nachzuweisen. Der für die Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten heranzuziehende Subrosionszeitraum wird dadurch auf die Dauer der Saale-Eiszeit, wofür 105.000 Jahre angenommen werden, eingeengt.
- Die Absenkung der Holstein-Basis über dem Salzstock ist weitgehend subrosionsbedingt. Gegenüber der Untergrenze der Ausgangsbandbreite der Positionen der Holstein-Basis beträgt sie maximal 91 m. Darin ist die Absenkung als Folge von Setzung im Lauenburger-Ton-Komplex nicht enthalten. Der mittlere Absenkungsbetrag für alle Bohrungen, an denen Absenkung überhaupt erkennbar ist, liegt bei 33 m. Aus diesen Beträgen und der angenommenen Subrosionsdauer lassen sich Subrosionsraten von maximal 0,9 mm/Jahr und im Mittel von 0,3 mm/Jahr berechnen.
- Die Ursachen für besonders starke nachholsteinzeitliche Subrosion sind im einzelnen nicht bekannt. Offensichtlich sind aber kaltzeitliche Klima- und Bodenverhältnisse während der Saale-Eiszeit (mit)verantwortlich gewesen.

Diese weitgehend statistisch abgesicherten Aussagen zum Ausmaß nachholsteinzeitlicher Subrosion stehen in Einklang mit allen uns vom Standort Gorleben vorliegenden Befunden. Sie bestätigen generell die bereits früher aus der unterschiedlichen Position der Holstein-Basis abgeleiteten Subrosionsraten (DUPHORN 1983, 1986, 1987; APPEL & KREUSCH 1984). Für die Zukunft muß auf jeden Fall mit Subrosionsraten in derselben Größenordnung gerechnet werden. Sie können mit tiefgreifenden Veränderungen im Grenzbereich Salzstock/Deckgebirge verbunden sein und die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen.

Die potentielle Eignung des Standortes Gorleben ist daher gegenüber Standorten ohne Subrosion oder mit nachweislich unbe-

deutender Subrosion in der jüngeren geologischen Vergangenheit deutlich eingeschränkt. Schon aus diesem Grund müssen die möglichen Folgen künftiger Subrosion für die Langzeitsicherheit eines etwaigen Endlagers am Standort Gorleben sorgfältigst geprüft werden. Im Rahmen der Standorterkundung und der Beurteilung bislang vorliegender Befunde durch die verantwortlichen Institutionen, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), ist das bisher nicht geschehen (BFS 1990, BGR 1990):

Die genannten Subrosionsraten passen nicht zu von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) aus der Mächtigkeit eines bestimmten Gesteinstyps im Gorlebener Gipshut abgeleiteten (deutlich kleineren) Subrosionsraten. Sie werden von BfS und BGR offensichtlich für besonders verlässlich gehalten, obwohl eine für diese Ableitung unerläßliche Voraussetzung, nämlich die Kenntnis der Gesteinsgenese, nicht gegeben ist. Bei der Beurteilung der möglichen Subrosionsfolgen legen die verantwortlichen Institutionen zudem vor allem über lange Zeiträume gemittelte (und daher niedrige) Subrosionsraten zugrunde. Damit wird lediglich die langfristige flächenhafte Verringerung des Abstandes zwischen Salzspiegel und Endlager berücksichtigt - eine Einschränkung die den tatsächlich von Subrosion ausgehenden Gefahren nicht Rechnung trägt.

1. Vorgang und Aufgabenstellung

Seit 1979 wird der Teilsalzstock Gorleben der Salzstruktur Gorleben-Rambow unter Federführung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS; früher: Physikalisch-Technische Bundesanstalt - PTB) auf seine Eignung als Standort für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erkundet. Die Untersuchungen werden im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums vom Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung begleitend begutachtet. In Ergänzung dazu läßt das Niedersächsische Umweltministerium gegenwärtig die von den offiziellen Untersuchungsinstanzen immer wieder beschworene sogenannte Eignungshöflichkeit des Teilsalzstocks Gorleben als Standort für die Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle von einer Gutachtergruppe prüfen. Grundlage dafür sind die im Rahmen der Standorterkundung bisher erhobenen Informationen, soweit sie dem Niedersächsischen Umweltministerium zur Verfügung stehen.

Im Rahmen dieser Prüfung ist PanGeo - Geowissenschaftliches Büro vom Niedersächsischen Umweltministerium mit Vertrag vom 3.8.1992 beauftragt worden, Ausmaß und Geschwindigkeit nachholsteinzeitlicher Subrosion, also der Auflösung von Salz durch Grundwasser, zu bestimmen und im Hinblick auf die Bedeutung für die potentielle Eignung des Standortes Gorleben zu beurteilen. Zuverlässige Kenntnisse über den Ablauf der Subrosion in der jüngeren geologischen Vergangenheit, insbesondere im Quartär, sind Voraussetzung für die Prognose künftiger Subrosionsraten, die ihrerseits einen wichtigen Aspekt bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers darstellen: Durch Subrosion verringert sich der Abstand zwischen Abfall und oberflächennahem Grundwasser und außerdem die Konfiguration der Gesteine im Salzspiegelbereich. Dadurch kann das Grundwasser in Kontakt mit potentiell grundwasserleitenden Gesteinen des Salzstocks geraten, die wasserwegsame Zonen zwischen Salzspiegel und Endlagertiefe darstellen können.

Das Ausmaß nachholsteinzeitlicher bzw. nachholsteinzeitlicher Subrosion am Salzstock Gorleben ist in der Vergangenheit wiederholt Gegenstand kontroverser Diskussion gewesen. Den Berechnungen von Subrosionsraten durch verschiedene Autoren (z.B. APPEL 1981, APPEL & KREUSCH 1984, DUPHORN 1983, 1986 u. 1987, EHRLICH et al. 1986, BORNEMANN & FISCHBECK 1986) lagen dabei teilweise noch vorläufige Informationen des Erkundungsprogrammes Gorleben und/oder umstrittene Interpretationen einzelner Untersuchungsbefunde zugrunde.

Die in den folgenden Abschnitten vorgestellte Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten beruht auf der Weiterentwicklung eines bereits 1984 von APPEL & KREUSCH entwickelten Ansatzes, mit dem die Subrosionsgeschwindigkeiten aus den unterschiedlichen Positionen der holsteinzeitlichen Ablagerungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben abgeleitet werden.

Wichtigste Informationsgrundlage für die Berechnungen sind die Schichtenverzeichnisse der im Rahmen der (vor allem) hydrogeologischen Standorterkundung niedergebrachten Bohrungen. Sie sind von den für das BfS tätigen Gutachtern, im wesentlichen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Büro Pickel, aufgestellt und sind in HARRES-PICKEL (1992; "Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben - Abschlußbericht) dokumentiert.

Die für die Fragestellung wichtigsten Informationen der Schichtenverzeichnisse sind auf Datenträger übernommen und mit Hilfe - im wesentlichen - einfacher statistischer Verfahren ausgewertet worden¹⁾. Störfaktoren, die subrosionsbedingte Lagerveränderungen der Holstein-Schichten lediglich vortäuschen können, werden - soweit irgend möglich ebenfalls mit Hilfe statistischer Ansätze - berücksichtigt.

1) Das BfS hat die Übergabe der bei der BGR digitalisiert vorliegenden Daten abgelehnt.

2. Beschreibung der Vorgehensweise

2.1 Begriffe

Subrosion ist die Auflösung von Salzgestein, im vorliegenden Fall eines Salzstocks, durch strömendes Grundwasser. Die gut wasserlöslichen Gesteinsbestandteile (Steinsalz und Kalisalze) werden dabei durch das Grundwasser weitgehend oder sogar vollständig abtransportiert. Schwer wasserlösliche oder nicht wasserlösliche Gesteinskomponenten oder Gesteinskörper, insbesondere Anhydrit und sogenannter Salzton, werden dagegen unvollständig oder überhaupt nicht weggeführt. Verbleibender Anhydrit wird außer in sehr salzhaltigem Grundwasser unter Wasseraufnahme und Volumenzunahme um ca. 60 % in Gips umgewandelt. Die mit dem Grundwasser nicht abtransportierten Gesteinsreste reichern sich im sogenannten Gipshut (engl. caprock) an. Der Gipshut wächst dabei nach unten.

Die Kontaktfläche zwischen Salz und Gipshut wird wegen ihrer relativ ruhigen Morphologie als Salzspiegel bezeichnet. Der Salzspiegel wird durch Subrosion allmählich tiefer gelegt - es sei denn, der Subrosion stünde Salzaufstieg in demselben oder größerem Ausmaß entgegen. Der Absenkungsbetrag ist ein Maß für die Mächtigkeit der aufgelösten Gesteinssäule.

Unter Subrosionsgeschwindigkeit oder Subrosionsrate wird üblicherweise das Ausmaß der Absenkung des Salzspiegels pro Zeiteinheit verstanden. Die Subrosionsgeschwindigkeit ist außer von der Wasserlöslichkeit des betroffenen Gesteins von der Strömungsgeschwindigkeit und vom Lösungsinhalt des Grundwassers abhängig. Diese Größen nehmen mit zunehmender Tiefe ab bzw. zu, so daß sich die Subrosionsgeschwindigkeit in demselben Sinne verringert. In welcher Tiefe die Subrosion zum Stillstand kommt, hängt von den regionalen bzw. lokalen hydrogeologischen Verhältnissen ab.

Innerhalb einer Subrosionszone, also der über einen längeren Zeitraum von Subrosion betroffenen Fläche, kann das Ausmaß von Subrosion in Abhängigkeit von den hydraulischen und hydrochemischen Grundwasserverhältnissen im Salzspiegelbereich sowie von der Art der aufgelösten Gesteine räumlich und zeitlich erheblich variieren. Subrosion findet also weder überall am Salzspiegel gleichzeitig statt noch erreicht sie dort, wo sie stattfindet, überall dasselbe Ausmaß. Nach den Untersuchungen von BATSCHE & KLARR (1980) in der Asse kann aktuelle Subrosion vielmehr auf schmale "Gerinne" beschränkt sein, die sich im

Laufe der Zeit verlagern und so zu flächenhafter Subrosion führen.

In Abhängigkeit von den hydrochemischen und hydraulischen Bedingungen im Salzspiegelbereich und der Art der subrodierten Gesteine kann es zu sehr unterschiedlichen Subrosionsgeschwindigkeiten und zur Ausbildung sehr unterschiedlicher Gesteinstypen im Gipshut kommen. So ist vom Salzstock Gorleben bekannt, daß es dort, wo besonders gut wasserlösliche Kalisalze den Salzspiegel treffen, zu sogenannter **vorausseilender Subrosion** kommt. In solchen Zonen reicht die "Subrosionsfront" weit über die normale Position des Salzspiegels hinaus nach unten in den Salzgesteinskörper hinein (BORNEMANN & FISCHBECK 1986, DUPHORN 1987, BGR 1990). Der Gipshut des Salzstocks Gorleben weist außerdem eine deutliche vertikale und horizontale petrographische Differenzierung und erhebliche Mächtigkeitsschwankungen auf (BORNEMANN & FISCHBECK 1986). Einen interessanten Sonderfall der Gipshutbildung stellt die sogenannte Hutgesteinsbrekzie dar, deren Entstehung mit der Anlage der Gorlebener Rinne in Verbindung gebracht wird. Zu Entstehung und Alter der anderen Gesteinstypen im Gipshut des Gorlebener Salzstocks liegen dagegen keine gesicherten Erkenntnisse vor.

2.2 Geologische Grundlagen für die Berechnung von Subrosionsraten

Subrosion ist nur ausnahmsweise direkt beobachtbar. Sie erzeugt jedoch Effekte, aus denen indirekt auf Ausmaß und Geschwindigkeit geschlossen werden kann. Dazu gehören die hydrochemische Veränderung des Grundwassers sowie Lageveränderungen der Gesteine über der Subrosionszone oder sogar morphologische Veränderungen der Erdoberfläche. Dabei sind generell folgende Situationen zu unterscheiden:

- Ist die Subrosionsgeschwindigkeit flächenhaft größer als die Aufstiegsrate des Salzes im Salzstock, so sinken im betroffenen Bereich die Schichten des Salzstockdeckgebirges oberhalb des Gipshutes ab. Dieser Vorgang äußert sich in einer entsprechenden Verbiegung von Gesteinshorizonten bzw. Schichtgrenzen zwischen den Horizonten. Das Ausmaß der Absenkung entspricht der Differenz zwischen Subrosions- und Aufstiegs- geschwindigkeit.

Es kann zudem eine an der Erdoberfläche sichtbare Subrosions-

senke entstehen, in der es typischerweise zur Bildung von Stillwassersedimenten, z.B. Mudde oder Torf als Seeablagerungen, kommen kann. Entspricht die Sedimentationsrate solcher Sedimente der Subrosionsrate oder übersteigt sie diese sogar, so ist die Subrosionssenke nicht morphologisch, sondern nur an der im Vergleich zu Nachbargebieten erhöhten Mächtigkeit der neu gebildeten Gesteine zu erkennen. Lokale Ausnahmen von diesen Gesetzmäßigkeiten können dort bestehen, wo mächtige Anhydritkörper im Salzgestein nicht vollständig aufgelöst, sondern nur unter Volumenzunahme in Gips umgewandelt werden.

- Entspricht die Subrosionsrate der Aufstiegsrate nimmt lediglich die Gipshutmächtigkeit zu.
- Bleibt die Subrosionsrate hinter der Aufstiegsrate zurück, kommt es zur Aufwölbung des Deckgebirges über dem Salzstock. Sofern zugleich über und neben dem Salzstock Ablagerungen entstehen, so weisen sie neben dem Salzstock größere Mächtigkeiten auf als über ihm. Wenn die Salzgesteine in oberflächennahes strömendes Grundwasser hineinreichen, kann es trotz Überwiegen von Salzaufstieg zu lokalen Subrosionsereignissen kommen.

Diese Gesetzmäßigkeiten können unter günstigen Voraussetzungen benutzt werden, um aus den Niveauunterschieden einer bestimmten Schicht bzw. Schichtgrenze oder der Mächtigkeitsvariation einer Schicht neben und über dem Salzstock Subrosionsraten für die Vergangenheit zu berechnen. Im folgenden werden nachholsteinzeitliche Subrosionsraten aus den subrosionsbedingten Lagerveränderungen der Ablagerungen des Holstein-Interglazial berechnet. Die Holstein-Serien sind für eine solche Bestimmung von Subrosionsraten besonders geeignet, weil bei ihnen Mächtigkeitsunterschiede und Niveauunterschiede aus folgenden Gründen gut zu erkennen sind:

- Sie weisen von Ausnahmen abgesehen nur relativ geringe, dabei weitgehend einheitliche Mächtigkeit von allenfalls einigen Zehnermetern auf. Die Mächtigkeitsunterscheide sind um ein Vielfaches geringer als die Unterschiede ihrer Lage zu NN.
- Sie sind auf Grund ihrer petrographischen Ausbildung klar von den unter- und überlagernden Schichten zu trennen und (auch anhand ihres Fossilbestandes) - zumindest teilweise - zeitlich genau einzustufen.

Die anderen Gesteinseinheiten des Raumes Gorleben kommen für solche Berechnungen nicht oder nur bedingt in Frage. Sie weisen bereits entstehungsbedingt so große und unregelmäßige Niveauunterschiede und Mächtigkeitsschwankungen auf, daß subrosionsbedingte Veränderungen nicht oder allenfalls ausnahmsweise erkennbar sind. Das gilt insbesondere für die im Raum Gorleben weit verbreiteten glazigenen Gesteine der Elster- und Saale-Eiszeit, die durch die geologische Tätigkeit von Inland-eismassen entstanden sind. Die flächenhaft verbreiteten Flußablagerungen der Weichsel-Eiszeit (Niederterrasse) kommen mit Einschränkungen für die Auswertung in Frage. Sie werden daher im folgenden ebenfalls betrachtet.

2.3 Generelle Vorgehensweise

Die Identifizierung und Quantifizierung nachholsteinzeitlicher Subrosion aus subrosionsbedingten Lagerungsveränderungen holsteinzeitlicher Gesteine erfolgt in zwei Arbeitsschritten:

Zunächst werden die potentiell durch Subrosion veränderten Lagerungsverhältnisse in der Gorlebener (und Gartower) Rinne über dem Salzstock mit den zweifelsfrei von Subrosion nicht beeinflussten Verhältnissen neben dem Salzstock verglichen. Aus den Unterschieden werden Hinweise auf das Ausmaß von Subrosion abgeleitet. Die Berechtigung zu dieser Vorgehensweise ergibt sich aus den prinzipiell übereinstimmenden Bildungsbedingungen für die Elster- und Holstein-Serien in der Gorlebener (und Gartower) Rinne neben und über dem Salzstock (s. 3.2 u. 4.1). Abgesehen von den mit der Entstehung der Hutgesteinsbrekzie zu Beginn der Rinnenbildung verbundenen Ereignissen (s. 2.2) und Subrosion stimmen auch die Vorgänge, die zur späteren Deformation der Rinnenfüllung geführt haben können, neben und über dem Salzstock generell überein. Ohne Subrosion müßten daher neben und über dem Salzstock auch prinzipiell dieselben Lagebeziehungen bei den an der Rinnenfüllung beteiligten Gesteinen zu beobachten sein. Umgekehrt müßten deutliche Unterschiede zwischen beiden Bereichen auf Subrosion zurückgeführt werden.

Die subrosionsbedingte Absenkung von Schichten stellt allerdings nur eine der potentiellen Ursachen für deren unterschiedliche Lage- und Mächtigkeitsverhältnisse dar, die neben und/oder über dem Salzstock wirksam gewesen sein können. Zusätzlich kommen folgende mögliche Ursachen in Frage, durch die Subrosionseffekte möglicherweise nur vorgetäuscht werden:

-
- Durch unregelmäßiges Relief des Ablagerungsraums (Gorlebener und Gartower Rinne) hervorgerufene primäre Unterschiede im Ablagerungsniveau und in der Mächtigkeit der Holstein-Serien,
 - durch Setzung von Tonserien des unterlagernden Lauenburger-Ton-Komplexes verursachte Absenkung der Holstein-Schichten gegenüber dem ursprünglichen Ablagerungsniveau,
 - durch glaziale Ereignisse (insbesondere Eisstauchung) hervorgerufene sekundäre Niveauunterschiede und Schwankungen der wahren und scheinbaren Mächtigkeiten.

Die Einflüsse dieser Vorgänge auf die heutige Position der Holstein-Serien müssen daher entweder ausgeschlossen oder gegebenenfalls quantifiziert werden (s. 4.2).

In einem zweiten Arbeitsschritt werden die zur Tiefenlage bestimmter Schichtgrenzen und Schichtmächtigkeiten neben und über dem Salzstock vorhandenen Daten statistisch ausgewertet. Es wird versucht, statistisch signifikante Ähnlichkeiten bzw. Unterschiede zwischen verschiedenen Bohrungen bzw. den Bohrungen verschiedener Teilgebiete des Untersuchungsraumes auf konkrete Ursachen zurückzuführen.

3. Informationsgrundlagen für die Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten

3.1 Datenbasis, Datenauswertung und Ergebnisdarstellung

Datenbasis

Die Ableitung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten stützt sich im wesentlichen auf die im Rahmen der Standorterkundung erarbeiteten Basisdaten zu Tiefenlage und Mächtigkeit der Quartär-Schichten, wie sie den Schichtenverzeichnissen der im Raum Gorleben durchgeführten (überwiegend hydrogeologischen) Bohrungen zu entnehmen sind (HARRES-PICKEL 1992). In Einzelfällen werden die Ergebnisse gezielter petrographischer und stratigraphischer Untersuchungen zur Prüfung der erzielten Ergebnisse herangezogen. Eine ausführliche Beschreibung der für die Berechnung und zum Verständnis der Standortverhältnisse wichtigen Gesteine findet sich in 3.2.

Aus den Schichtenverzeichnissen wurden die formalen Angaben zur Lage der Bohrungen sowie die Tiefenangaben für die Unterheiten des Quartär, das Tertiär und die Kreide sowie für Gipshut und Salzspiegel übernommen. Die in den Schichtenverzeichnissen enthaltenen Bohrtiefenangaben wurden in Tiefenangaben zu NN umgerechnet. Sie dienen als Grundlage zur Berechnung der Mächtigkeiten der unterschiedenen Einheiten. Darüber hinaus wurden aus den Schichtenverzeichnissen wesentliche Informationen zur Zusammensetzung der elstereiszeitlichen Gesteine (namengebende Hauptbestandteile) entnommen.

Auf Datenträger liegen folgende aus den Schichtenverzeichnissen übernommene bzw. berechnete Daten vor:

BHRG	Nummer der Bohrung,
RECHTS	Rechtswert des Bohransatzpunktes,
HOCH	Hochwert des Bohransatzpunktes,
NN	Lage des Bohransatzpunktes über NN,
ETNN	Endteufe der Bohrung unter NN,
QHNN	Basis der holozänen Serien zu NN,
QWNN	Basis der weichseleiszeitlichen Serien (in der Regel Niederterrasse) zu NN,
QSNN	Basis der saaleeiszeitlichen Serien zu NN,
QHOLNN	Basis der holsteinzeitlichen Serien unter NN,
QENN	Basis der elstereiszeitlichen Serien unter NN,
QPENN	Basis der praelstereiszeitlichen (altquartären) Serien

	unter NN,
TNN	Basis der Tertiär-Schichten unter NN,
KRNN	Basis der Kreide-Schichten unter NN,
YTOPNN	Oberfläche des Gipshutes unter NN,
ZTOPNN	Salzspiegel unter NN,
HOLSCU	Basis von Holstein-Schuppen unter NN,
QLBASIS	Basis der Beckenablagerungen der Elster-Eiszeit (Lauenburger-Ton-Komplex) unter NN,
QLTOP	Oberfläche des Lauenburger-Ton-Komplexes unter NN.
MQH	Mächtigkeit der holozänen Serien,
MQW	Mächtigkeit der weichseleiszeitlichen Serien,
MQS	Mächtigkeit der saaleeiszeitlichen Serien,
MQHOL	Mächtigkeit der holsteinzeitlichen Serien,
MQE	Mächtigkeit der elstereiszeitlichen Serien,
MQPE	Mächtigkeit der präelstereiszeitlichen (altquartären) Serien,
MT	Mächtigkeit der Tertiär-Serien,
MK	Mächtigkeit der Kreide-Serien,
MY	Mächtigkeit des Gipshutes.
QL	Mächtigkeit des Lauenburger-Ton-Komplexes,
QET	Gesamtmächtigkeit der Tonserien in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit (Lauenburger-Ton-Komplex),
QEU	Gesamtmächtigkeit der Schluffserien in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit (Lauenburger-Ton-Komplex),
QESG	Gesamtmächtigkeit der Sand- und Kiesserien in den Ablage- rungen der Elster-Eiszeit,
QELGMG	Gesamtmächtigkeit von Geschiebemergel und -lehm in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit.

Die wichtigsten dieser Daten sind im Anhang unter den hier angegebenen Kurzbezeichnungen dokumentiert und finden sich in einem Teil der Tabellen und Abbildungen wieder.

Beim Betrachten der Angaben im Anhang sowie der Tabellen und Abbildungen in den folgenden Abschnitten ist außerdem folgendes zu beachten:

- Die Bezeichnungen für die Bohrungen setzt sich in den Schichtenverzeichnissen aus den Buchstaben GoHy sowie der Bohrungsnummer zusammen. In Tabellen und Abbildungen werden jeweils nur die Bohrungsnummern verwendet (aus GoHy 1212 wird 1212).
- Alle Höhen- und Tiefenangaben sind auf einen Meter genau auf-

oder abgerundet und so in die graphischen Darstellungen der folgenden Kapitel eingeflossen. Die Rundungsfehler gehen auch in die berechneten Mächtigkeiten ein.

- Die Lage einer Schichtgrenze **unter NN** wird durch **positive Zahlen** gekennzeichnet, die Lage einer Schichtgrenze **über NN** dagegen **durch negative Zahlen**. Diese Darstellung wurde gewählt, weil die Schichtgrenzen weit überwiegend unter NN liegen.
- Bei den Mächtigkeitsangaben handelt es sich um **scheinbare Mächtigkeiten**. Sie können bei starker Neigung der betreffenden Schicht deutlich über den wahren Mächtigkeiten (senkrecht zu den Schichtgrenzen) liegen. Der mögliche Fehler ist bei den weitgehend flach lagernden autochthonen Gesteinsvorkommen deutlich geringer als bei durch Subrosion oder Eistektonik verstellten Vorkommen. Bei den übrigen Einheiten spielen die Unterschiede zwischen scheinbarer und wahrer Mächtigkeit wegen ihrer primär großen Mächtigkeitsschwankungen keine Rolle.
- Bei der Festlegung des Salzstockrandes (zur Erkennung der Unterschiede zwischen den Lagerungsverhältnissen über und neben dem Salzstock) wurde den Darstellungen in BGR (1990) gefolgt. Auf diese Weise werden allerdings auch solche Bohrungen noch dem Datensatz zur Beschreibung der Verhältnisse über dem Salzstock zugeordnet, die bereits im Bereich des sogenannten Tertiär-Ringwalls (s. 3.2.1) am Salzstockrand liegen, wo die Tertiär-Schichten bereits große Mächtigkeiten aufweisen; zugleich liegt der Salzspiegel sehr tief. Es ist daher fraglich, ob dort überhaupt noch Subrosion in größerem Ausmaß stattgefunden haben kann. Betroffen sind insbesondere die Bohrungen 50 und 1020.
- Es wurden nur solche Bohrungen in die Berechnungen und Darstellungen einbezogen, in denen die Holstein-Serien durchbohrt worden sind. Diese Bedingung wird von 90 Bohrungen erfüllt. Soweit die Auswertungen sich auch auf die Basisposition und Mächtigkeit der Elster-Serien erstrecken, wurden nur solche Bohrungen verwendet, in denen Holstein- und Elster-Serien vollständig durchbohrt worden sind.
- Bei Auswertungen, in die Mächtigkeitsangaben eingeflossen sind, fanden solche Bohrungen keine Berücksichtigung, bei denen die Schichtenverzeichnisse Hinweise auf Eisstauchung (nicht Schuppen) enthielten. Das war bei den Bohrungen 2320 bis 2326 und 2329 der Fall.

Datenauswertung und Ergebnisdarstellung

Die Lage der im Rahmen des Untersuchungsprogrammes Gorleben niedergebrachten Bohrungen geht aus Abb. 1 hervor. Den für die hier durchgeführten Untersuchungen wichtigen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes mit der Gorlebener und (Teilen der) Gartower Rinne südlich neben und über dem Salzstock zeigt Abb. 2. Beide Abbildungen enthalten aus Gründen der Übersichtlichkeit keine Bohrungsnummern und keine topographischen Informationen. Diese Informationen sind zur Beurteilung der Ergebnisse der Berechnungen nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten nicht erforderlich. Die topographische Lage der Bohrungen ist am besten der Anlage 14 in BGR (1990) zu entnehmen.

Alle statistischen Auswertungen und graphischen Darstellungen wurden mit dem Programmpaket SYSTAT (Version 5.0) durchgeführt. Die Quellen für die eingesetzten Algorithmen sind in den SYSTAT-Handbüchern angegeben und werden im folgenden nicht zitiert.

Die mathematischen Beziehungen zwischen der Lage einer Schicht zu NN und ihrer Mächtigkeit oder anderen geologischen Parametern (z.B. Tonanteil), die Grundlage der Auswertung sind (s. 2.3), werden in der Regel als **X-Y-Diagramme** dargestellt. Darin sind die Werte für die Position einer Schicht zu NN fast immer auf der Y-Achse abgetragen, und zwar so, daß - analog den Verhältnissen im Gelände - tiefe Positionen einer Schicht hohen Y-Werten (in Metern unter NN) entsprechen.

Die Werte für Bohrungen neben und über dem Salzstock sind in den meisten Diagrammen mit jeweils denselben, voneinander abweichenden Symbolen gekennzeichnet. In der Regel enthalten die Diagramme zusätzlich die Regressionsgerade für die Werte der Bohrungen neben dem Salzstock sowie die Ränder des zugehörigen 95-Prozent-Vertrauensintervalls.

Zur Veranschaulichung der mathematischen Beziehungen zwischen mehreren Parametern dienen sogenannte **Diagramm-Matrizes** (z.B. Abb. 18). Jedes Feld einer solchen Matrix besteht aus einem eigenständigen X-Y-Diagramm. Die jeweils dargestellten Parameter sind an den Rändern der Matrix verzeichnet. Die Achsen weisen keine Skalierung auf. Die Werte der Achsenabschnitte steigen jedoch von links nach rechts (X-Achse) bzw. von unten nach oben (Y-Achse). Die Maßstäbe der Diagramme innerhalb einer Matrix können unterschiedlich sein.

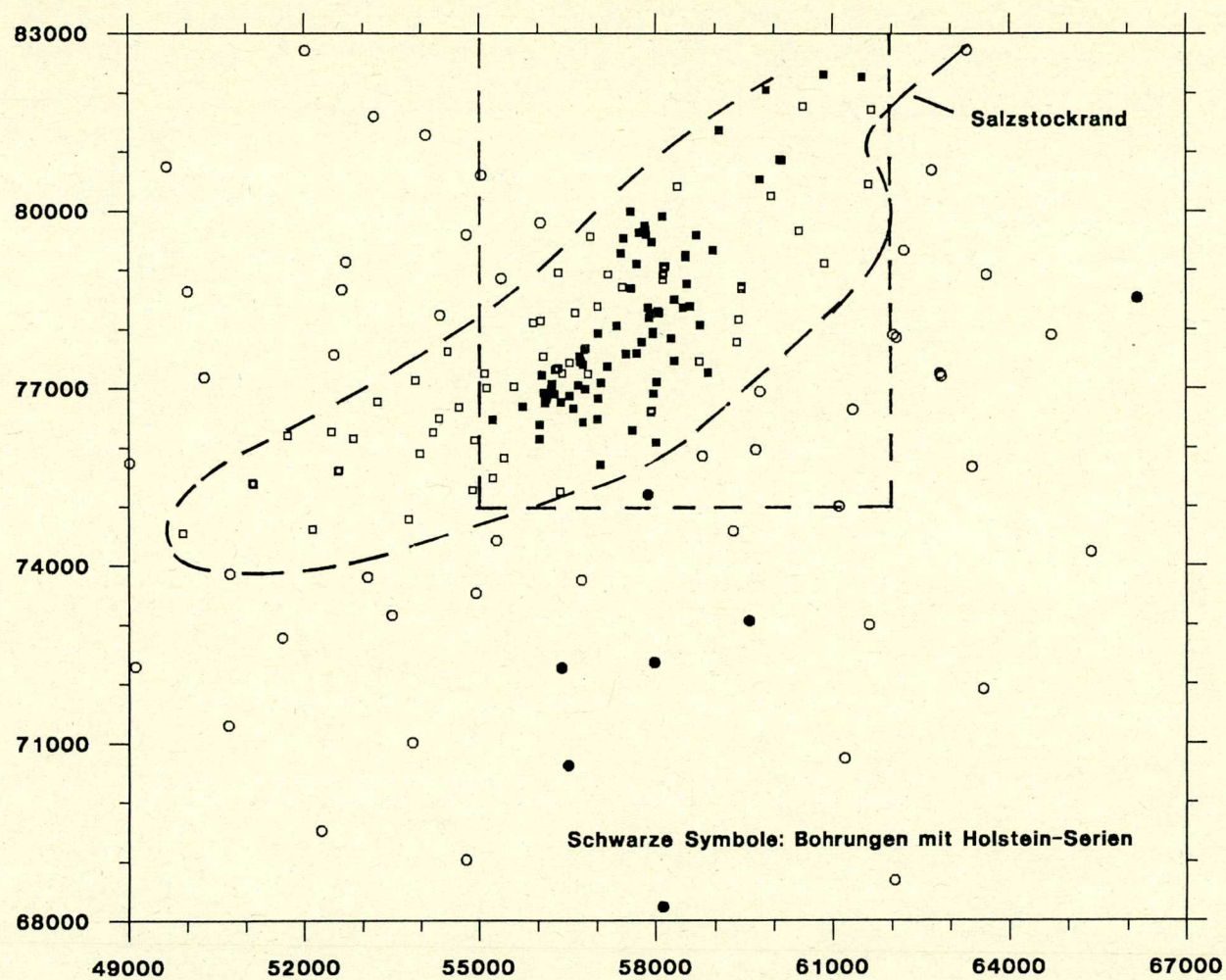


Abb. 1 Lageplan der hydrogeologischen Erkundungsbohrungen im Bereich des Standortes Gorleben

Salzstockumriß nach BGR (1990); Ausschnitt s. Abb. 2 u. 24

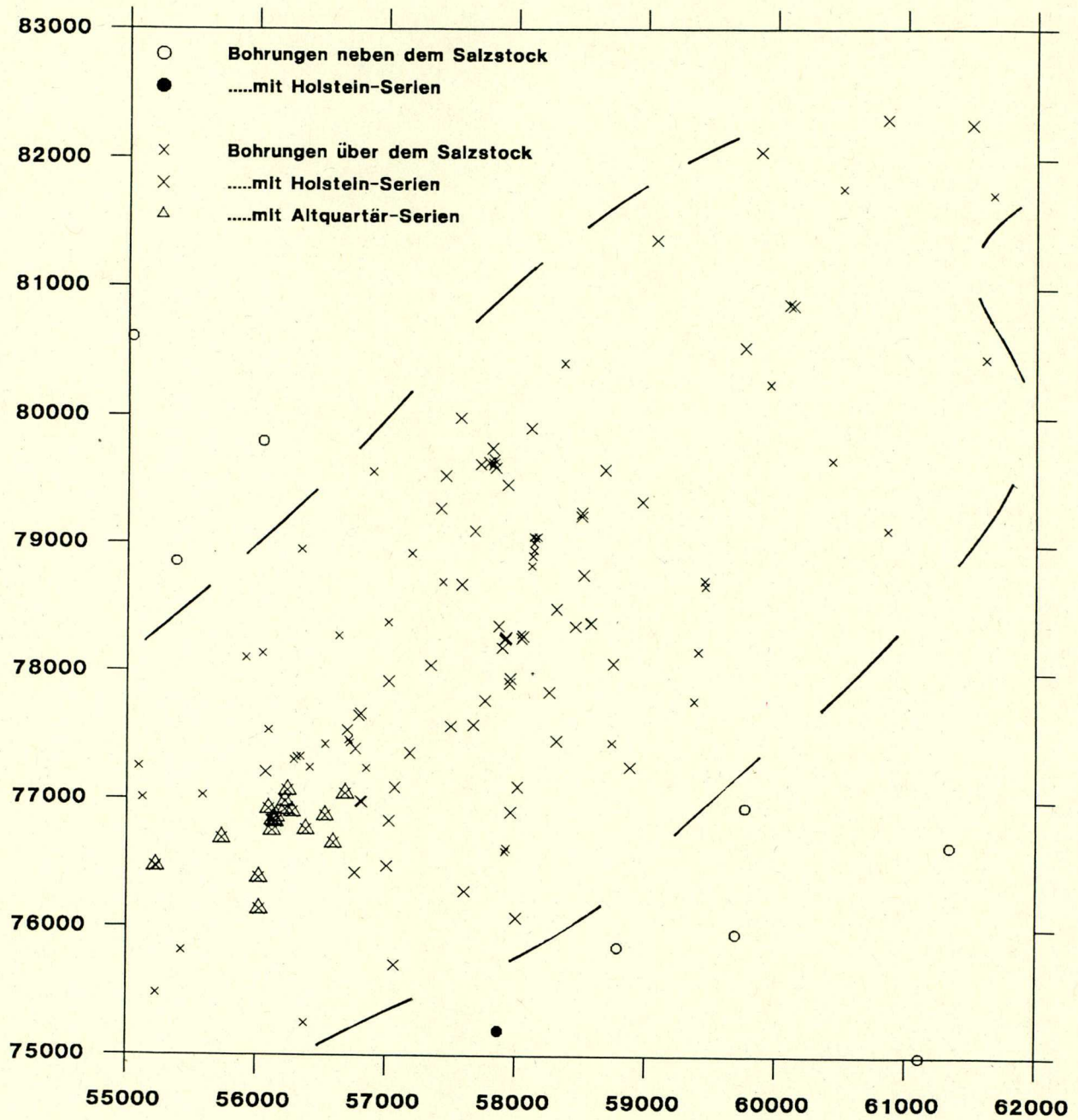


Abb. 2 Lageplan der hydrogeologischen Erkundungsbohrungen über dem Teilsalzstock Gorleben im Bereich der Gorlebener Rinne (Ausschnitt von Abb. 1)

3.2 Beschreibung der zur Berechnung von Subrosionsraten benutzten Schichten

Eine wesentliche Grundlage für die angestrebte Berechnung von Subrosionsraten ist das Verständnis der an Entstehung und Veränderung der Deckschichten über dem Salzstockteil Gorleben beteiligten geologischen Vorgänge. Deren Rekonstruktion muß sich auf die detaillierte Kenntnis der Schichtfolge des Deckgebirges über dem Salzstockteil Gorleben stützen. In 3.2.1 wird daher zunächst ein Überblick über Verbreitung, Zusammensetzung und Lagerungsformen der Deckgebirgseinheiten gegeben. Eine detaillierte Darstellung der für die Subrosionsberechnungen besonders wichtigen Einheiten folgt in 3.2.2 bis 3.2.4.

3.2.1 Schichtfolge im Überblick

Die mesozoische Schichtfolge am Standort Gorleben wird neben der großräumigen paläogeographischen Entwicklung von der lokalen halokinetischen Geschichte des Salzstocks Gorleben-Rambow geprägt. Über dem aufsteigendem Zechsteinsalz ist die Mächtigkeit der Ablagerungen in Hochlagen und durch Erosion reduziert, während es in den sich gleichzeitig bildenden Salzstockrandsenken zu starken Mächtigkeitszunahmen kam. Zusätzlich differenzierten lokale Subrosionssenken und Erdfälle über dem Salzstock den Ablagerungsraum noch weiter. Die erosiven, kumulativen und tektonischen Formen der glaziären Ereignisse überprägten im Quartär alle mit dem Salz in Zusammenhang stehenden Vorgänge.

Kreide

Die ältesten auf dem Salzstockdach erbohrten Schichten gehören der höheren Oberkreide an (BGR 1990: S. 200). Sie weisen Mächtigkeiten um 5 m auf (maximal 15 m in Bohrung 3110 und 11 m in Bohrung 800) und sind nur im Salzstockrandbereich entwickelt (KÖTHE 1991: Abb 1). In der nördlichen Randsenke werden die Oberkreide-Schichten 700 m und in der südlichen Randsenke bis zu 900 m mächtig. Die Abfolge setzt sich lithologisch aus einer Wechselfolge aus Kalksteinen und Mergelsteinen mit geringmächtigen Tonsteineinschaltungen zusammen.

Tertiär

Als Folge von Hebungen und Subrosion ist die tertiäre Schichtabfolge über dem Salzstock uneinheitlich ausgebildet. Sie weist Schichtlücken und Schichtverstellungen auf. Im Salzstockdach erreichen die tertiären Ablagerungen Mächtigkeiten von unter 100 m, teilweise sind sie nicht erhalten geblieben. In der nordwestlichen Randsenke dagegen werden sie ca. 1150 m und in der südöstlichen Randsenke ca. 780 m mächtig (BFS 1990: S. 93).

Überwiegend setzt die tertiärzeitliche Sedimentation auf dem Salzstock mit der oberpaläozänen (Thanet-)Transgression ein (KÖTHE 1991). Das Untere Paläozän ist nur in der Bohrung 133 (westlich von Marleben) angetroffen worden.

Paläozäne und eozäne Ablagerungen zusammen erreichen in der nördlichen Randsenke eine Mächtigkeit von 300 m, in der südlichen Randsenke von 200 m. Im Deckgebirge ist der paläozäne Tonstein mit Einschaltungen von Feinsandstein bis zu 80 m mächtig. Eozäner Schluff bis toniger Schluff mit Sandeinschaltungen wird über dem Salzstock bis zu 200 m mächtig. In die ebenfalls vorwiegend tonigen und schluffigen Ablagerungen des Oligozän ist an der Basis des Rupel ein glaukonitischer Feinsand (Neuengammer Gassand) mit Mächtigkeiten bis über 15 m eingeschaltet. Miozäne Ablagerungen fehlen auf dem Salzstockdach, in den Randsenken erreichen sie dagegen Mächtigkeiten bis zu 250 m (nordwestliche Senke) und 175 m (südöstliche Senke). Der im unteren Miozän eingeschaltete Braunkohlensand erreicht eine Mächtigkeit von maximal 130 m. Obermiozäne und pliozäne Sedimente sind am Standort Gorleben nicht gefunden worden.

Insgesamt sind die tertiärzeitlichen Ablagerungen über dem Salzstock vorwiegend im halokinetischen Hebungsgraben ("Ringwall") erhalten geblieben. Nur über dem westlichen Salzstockbereich sind paläozäne und eozäne Sedimente in geringer Mächtigkeit über den gesamten Dachbereich erhalten. Über dem östlichen Salzstockteil Gorleben sind die tertiären Schichten dagegen teilweise oder ganz erodiert (KÖTHE 1991: Mächtigkeitspläne). Störungen mit Versätzen sind an der nordwestlichen und im mittleren Teil der südöstlichen Salzstockschulter und im Bereich der Schachtvorbohrungen Gorleben 5001 und 5002 bekannt (BGR 1990: S. 201).

Pleistozän

Die pleistozäne Schichtfolge in den Deckschichten beginnt mit Sand, wenigen Kieslagen und geringmächtigen feingeschichteten Schlufflagen der Menap-Kaltzeit, die eine maximale Mächtigkeit von 55 m erreichen (BGR 1990). Aus dem Bavel-Komplex sind Mudde-, Torf- und Schluffablagerungen erhalten geblieben. Eine Wechselfolge des Cromer-Komplexes mit Schluff/Mudde und Sand beendet die prälsterzeitliche (altquartäre) Sedimentation.

Die Verbreitung der prälsterzeitlichen Schichtfolge über dem Teilsalzstock ist auf den zentralen und südwestlichen Bereich beschränkt (BGR 1990: Abb 46 und Anl. 27). In einer 3 km langen und bis zu 1,5 km breiten Subrosionssenke, lagerten sich dort überwiegend limnische warm- und kaltzeitliche Sedimente ab. Die Braunfärbung der Sand- und Schlufflagen deutet auf eingeschwemmtes Material aus dem miozänen Braunkohlensand hin (DUPHORN 1983).

Harnische, Schichtverstellungen und Versturzbrekzien sind in einer 98 m mächtigen Abfolge des Bavel- und Cromer-Komplexes in den Bohrungen 940/944 im Bereich Gorlebener Tannen entwickelt. Sie werden als ein fossiler Erdfall gedeutet (BGR 1990). In der Bohrung 1171 nördlich des Laascher Sees wurden bavel- und cromerzeitliche Versturzsedimente erbohrt, die mit prälsterzeitlicher Subrosion eines Staßfurt-Kaliflözes in Zusammenhang stehen (BGR 1990).

Die Hauptmasse der pleistozänen Ablagerungen am Standort Gorleben stammt aus der Zeit der elster- und saaleeiszeitlichen Inlandeisüberdeckung. Die Gletscher der Weichsel-Eiszeit haben den Standort Gorleben nicht mehr erreicht. Vier Eisvorstöße (Elster, Drenthe-1, Drenthe-2 und Warthe) haben den Standort Gorleben überfahren und Geschiebemergel, glazifluviatilen Sand und Kies, Beckenton und Schluff hinterlassen. Die Sedimente der Elster-Eiszeit sind mit einer maximalen Mächtigkeit von ca. 250 m (DUPHORN 1983) vorwiegend in den Randsenken und in den subglaziär entstandenen Gorlebener- und Gartower-Rinnen verbreitet. Die Ablagerungen der drei saaleeiszeitlichen Stadiale zeigen dagegen Arbeitsgebiet eine flächenhafte Verbreitung. Kleinere Rinnensysteme sind aber auch an der Basis dieser Sedimente entwickelt und haben z. T. den Lauenburger Ton im Liegenden durchschnitten (DUPHORN 1983: S. 115).

Aus den Interglazialen Holstein-Warmzeit und Eem-Warmzeit sind nur die holsteinzeitlichen Ablagerungen flächenhaft verbrei-

tet. Die vorwiegend limnischen bis marinen Ton- und Schluffserien erreichen dabei eine maximale Mächtigkeit von 33 m (Bohrung 1251). Eemzeitliche Sedimente sind nur lokal, außerhalb des Salzstockes, erbohrt worden.

Im Periglaziärbereich der weichselzeitlichen Vereisung sind Niederterrassensand und Kies, Flugsanddecken, Dünen und Mudde entstanden. Der Ablagerungsraum ist heute noch morphologisch als Elbe-Urstromtal erkennbar.

Holozän

Die jüngsten quartären Ablagerungen stammen aus dem Holozän, das vor ca. 10 000 Jahren einsetzte. Flugsanddecken, Einzeldünen und Dünenfelder, Auelehm, Fließerde, Mudde und Torf sind seine charakteristischen Ablagerungen.

3.2.2 Elster-Eiszeit

3.2.2.1 Verbreitung der elsterzeitlichen Ablagerungen am Standort Gorleben

Die elsterzeitlichen Schmelzwasser- und Moränenablagerungen sind auf die nördliche Randsenke, die südliche Randsenke mit der Gartower Rinne und auf die Gorlebener Rinne mit einem Nebenzweig nach Westen beschränkt (BGR 1990: Abb. 47). Eine ähnliche Verbreitung besitzt der Lauenburger-Ton-Komplex, nur ist er im Bereich der praelsterzeitlichen Quartärvorkommen lückenhaft; wo der Nebenzweig der Gorlebener Rinne den tertiären Ringwall durchschneidet ist der Lauenburger-Ton-Komplex gar nicht vorhanden (BGR 1990: Abb 46).

3.2.2.2 Mächtigkeit der elsterzeitlichen Ablagerungen

Die größten Mächtigkeiten der glaziären elsterzeitlichen Sedimente treten in der Gorlebener Rinne auf. In der Bohrung 484, südwestlich von Meetschow, ist eine 239 m mächtige Elster-Abfolge erbohrt worden. An den hohen Mächtigkeiten in der Gorlebener Rinne sind vorwiegend (mit ca. 100 m) die glazifluviatilen Sandschichten beteiligt. Große Tonmächtigkeiten wurden östlich von Gorleben (Bohrung 2321 mit 115 m Ton) und südlich

vom Weißen Moor (Bohrung 1110 mit 99 m Ton) angetroffen. Der Lauenburger-Ton-Komplex erreicht in der Bohrung 550 südlich vom Weißen Moor in der Gorlebener Rinne mit 121 m Ton, Schluff und geringmächtigen Sandeinschaltungen (DUPHORN 1983), seine größte Mächtigkeit. Die elsterzeitlichen Geschiebemergel werden im Bereich Gorlebener Tannen bis zu 69 m mächtig (Bohrung 2225), die Gesamtmächtigkeiten schwanken dort zwischen 80 m und 100 m.

3.2.2.3 Entwicklung der Elster-Eiszeit

In der Elster-Eiszeit (Beginn vor ca. 400 000 bis 350 000 Jahren) wurde der Standort Gorleben zum erstenmal von Inlandeismassen bedeckt. Glazifluviatiler Sand und Kies, Geschiebemergel und kaltzeitliche Beckensedimente aus Schluff und Ton mit Fein- bis Mittelsand sind die typischen Ablagerungen aus dieser Zeit. Der Geschiebemergel tritt in mehreren, von glazifluviatilen Sandlagen und Beckenablagerungen unterteilt Horizonten auf. Eine Zuordnung dieser "Geschiebemergel-Horizonte" zu verschiedenen Eisvorstößen ist aber nicht möglich (BGR 1990: S. 182).

Während der Abschmelzphase des Elster-Eises kam es, noch unter Eisbedeckung, zur Bildung von Rinnen. Die Gorlebener Rinne über dem Salzstock schnitt sich dabei bis über 300 m unter NN (im Bereich zwischen Gorleben und Meetschow östlich von Vietze) in ältere Schichten ein. Bei Gorlebener Tannen und bei Marleben im Nebenzweig der Gorlebener Rinne werden Tiefen von mehr als 150 m unter NN erreicht. In weiten Bereichen der Gorlebener Rinne wurden durch die erosiven Vorgänge auch die tertiären Sedimente erodiert. Nördlich vom Weißen Moor (Bohrungen 1141, 1301 und 1291), im Bereich Weißes Moor bei Bohrung 841 und südöstlich vom Weißen Moor bei Bohrung 1121 fehlt auch das Hutgestein an der Rinnenbasis (BGR 1990: Anl. 27).

Bei nachlassender Strömungsgeschwindigkeit wurden in der Gorlebener Rinne Sand und Kies mit Linsen und Schollen von Geschiebemergel sedimentiert. An der Basis des nördlichen Randsenkentiefs und in der Gartower Rinne ist stellenweise ein mehrere Meter mächtiger Geschiebemergel entwickelt.

Darüber folgen kaltzeitliche Beckenablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes mit Ton und Schluff, in die Sand- und Kiesablagerungen eingeschaltet sind. Entlang der Gorlebener Rinne

können diese gröberen Lagen mehrere Kilometer durchhalten, haben aber eine nur geringe Quererstreckung. Normalerweise bildet der Lauenburger-Ton-Komplex den Abschluß der elsterzeitlichen Sedimentation; nur im südlichen Bereich der Gorlebener Rinne sind über den Beckenablagerungen noch bis zu 83 m mächtige Nachschüttsande entwickelt (DUPHORN 1983).

3.2.2.4 Petrographie der elsterzeitlichen Ablagerungen

Typisch für den elsterzeitlichen Geschiebemergel sind ein erhöhter Glimmeranteil, niedriger Kalkgehalt und Braunfärbung, die aus einer Aufarbeitung von miozänem Braunkohlensand stammt. In die tonreichen und schluffreichen Partien sind unregelmäßig sandreiche Partien mit Mächtigkeiten im Meter- bis Dezimeterbereich eingeschaltet.

Die glazifluviatilen Sand- und Kiesvorkommen enthalten lagenweise Braunkohlebröckchen. Sie stammen aus aufgearbeiteter miozäner Braunkohle der näheren Salzstockumgebung. Gegenüber den präglazialen Ablagerungen sind frische nordische Gerölle charakteristisch.

Auch in den kaltzeitlichen Beckenablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes ist besonders im unteren Teil häufig eine Braunfärbung durch umgelagerte organische Substanz aus miozäner Braunkohle anzutreffen. Insgesamt besteht die Schichtfolge aus Ton und Schluff in die geringmächtige bis maximal mehrere Meter mächtige Sandlagen eingeschaltet sind. Teilweise fehlender Kalkgehalt kann auf begrenzte Wasserzirkulation zurückgeführt werden.

3.2.3 Holstein-Interglazial

3.2.3.1 Verbreitung der holsteinzeitlichen Ablagerungen am Standort Gorleben

Am Standort Gorleben sind die warmzeitlichen Holstein-Ablagerungen nur im Bereich der elsterzeitlich angelegten Rinnen angetroffen worden. Das Hauptverbreitungsgebiet ist dabei die Gorlebener Rinne mit ihrer Fortsetzung nach Süden. Weitere Holstein-Vorkommen sind über einem Nebenzweig der Gorlebener Rinne, bei Gorlebener Tannen, erbohrt worden. In der Gartower

Rinne sind nur in einer Bohrung (470 südlich der Elbe) 3 m mächtige holsteinzeitliche Ablagerungen festgestellt worden (BGR 1990: Abb 46). Im südwestlichen Salzstockbereich bei Liepe wurde in der Bohrung 140/143 ein isoliertes Holstein-Vorkommen angetroffen.

3.2.3.2 Mächtigkeit der Holstein-Ablagerungen

Die größten Mächtigkeiten der Holstein-Schichten werden im Einzugsbereich der Gorlebener Rinne über dem Teilsalzstock erreicht:

- 33 m in Bohrung 1251, südöstlich Gorlebener Tannen (östlicher Rinnenrand);
- 25 m in Bohrung 650, südlich Vietze;
- 24 m in Bohrung 1260, westlich Weißes Moor (westlicher Rinnenrand);
- 21 m in Bohrung 1220, östlich Gorlebener Tannen;
- 18 m in Bohrung 550, östlicher Rinnenrand.

Im Gebiet Gorlebener Tannen schwanken die Mächtigkeiten zwischen 2 m und 10 m. In der südlichen Fortsetzung der Gorlebener Rinne außerhalb des Salzstockes liegen die Mächtigkeiten zwischen 6 m und 17 m.

Zwischen benachbarten Bohrungen, die nur wenige hundert Meter voneinander entfernt liegen, kommt es häufiger zu großen Mächtigkeitsunterschieden der Holstein-Serien, z.B.:

- 20 m zwischen Bohrung 520 und Bohrung 1260, am westlichen Rinnenrand;
- 18 m zwischen Bohrung 650 und Bohrung 1180, südlich von Vietze;
- 10 m zwischen Bohrung 1110 und Bohrung 550, am südöstlichen Rinnenrand;
- 8 m zwischen Bohrung 1270 und Bohrung 2223, bei Gorlebener Tannen;
- 8 m zwischen Bohrung 2327 und Bohrung 2322, bei Gorleben am nördlichen Rinnenrand.

Bei drei Bohrungen wurden große Mächtigkeiten gemessen, die auf allochthone Hostein-Schuppen über autochthonem Holstein

zurückzuführen sind:

- Bohrung 1130, nordöstlich Weißes Moor; dort liegt eine 22,5 m mächtige Schuppe auf 11 m mächtigen autochthonen Holstein-Serien;
- Bohrung 1210, östlich Gorlebener Tannen am westlichen Rinnenrand; eine 27 m mächtige Schuppe liegt dort auf 5 m autochthonen Holstein-Serien;
- Bohrung 560, südöstlich Gorlebener Tannen im Rinnenbereich; eine 4 m mächtige Schuppe aus Schluff überlagert autochthone Holstein-Sedimente aus 8 m Sand und 5 m Ton.

3.2.3.3 Höhenniveau der Holstein-Ablagerungen

Außerhalb des Salzstocks in der südlichen Randsenke liegt das Höhenniveau der Holstein-Basis von ungestörten Vorkommen zwischen 31 m und 44 m unter NN (Bohrungen 180, 190, 200, 410, 470 und 630, s. auch 4.1 u. Tab. 1). Ausgenommen von einer epirogenetischen Absenkung seit der Holstein-Zeit von ca. 30 m (DUPHORN 1983: S. 120) und Setzungen aufgrund von Tonkompaktion im Liegenden entsprechen diese Werte dem ursprünglichem Ablagerungsniveau.

Im Salzstockdach liegt die Holstein-Basis bei glazitektonisch ungestörten Vorkommen zwischen 137 m unter NN (Bohrung 840, Weißes Moor) und 26 m unter NN (Bohrungen 1270 und 3010, zwischen Weißem Moor und Gorlebener Tannen).

In den Gebieten, wo präelsterzeitliche Ablagerungen im Salzstockdach vorhanden sind, schwankt die Tiefenlage der Holstein-Basis zwischen 26 m unter NN (Bohrung 1270) und 71 m unter NN (Bohrung 2225).

3.2.3.4 Entwicklung der Holstein-Warmzeit

Die limnischen, brackischen und marinen Ablagerungen der Holstein-Warmzeit bilden einen wichtigen Leithorizont zwischen der Elster-Kaltzeit und der Saale-Kaltzeit. Die Holstein-Warmzeit begann vor etwa 320 000 Jahren (unsicherer Wert) und endete mit dem Einsetzen der Saale-Kaltzeit vor ca. 230 000 Jahren.

Biostratigraphisch werden die Holstein-Sedimente in Pollenzonen eingeteilt. Der Übergang von den Ablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes bis zur Pollenzone III ist gekennzeichnet durch Schluffmudden mit geringem organischem Anteil (BGR 1990). Die ältesten sicher eingestuften Ablagerungen im Untersuchungsgebiet gehören der Pollenzone III an. In mehreren Bohrungen konnten Ablagerungen aus dem Zeitraum vor dem Klimaoptimum (älter als Pollenzone X) nachgewiesen werden (DUPHORN 1983):

- Bohrung 180, südwestlicher Rinnenrand außerhalb des Salzstocks: 6 m dunkelgrüner Schluff;
- Bohrung 200, südöstlicher Rinnenrand außerhalb des Salzstocks: 13 m grünlichgrauer Schluff;
- Bohrung 640/642, bei Gorleben über dem nördlichen Salzstockrand: 7 m dunkelgrauer Schluff mit einem 0,3 m mächtigen Vorkommen der Pollenzone VIII (marine Transgression der Holstein-See entlang des Elbetales);
- Bohrung 650, südlich Vietze innerhalb der Rinne: 25 m bläulichgrüner bis olivgrüner Ton, lagenweise mittelsandig, lagenweise Schluff;
- Bohrung 840, im Bereich Weißes Moor: 5 m Ton;
- Bohrung 940, bei Gorlebener Tannen am westlichen Rinnenrand: 6 m grüner Ton;
- Bohrung 2127, östlich weißes Moor: 4 m grüner Schluff und 10 m grüner Ton.

In der Spätphase des Klimaoptimums (Pollenzone XII) sind marine Flachwasser-Ablagerungen verbreitet, die in den meisten, der erbohrten Holstein-Vorkommen nachgewiesen werden konnten. Gleichzeitig bestanden in manchen Gebieten limnische Seen mit vertorfenden Verlandungszonen (Bohrung 20, nördlich Weißes Moor am westlichen Rinnenrand). Typisch für diese Pollenzone ist der laterale und vertikale Wechsel von limnischen, brackischen und marinen Schluff- und Tonbildungen.

Die jüngsten pollenanalytisch eingestuften Holstein-Ablagerungen gehören den Pollenzonen XIV, XV und XVII mit limnischen Sedimenten an. Ein fragliches Vorkommen der Dömitz-Warmzeit ist in Bohrung 970 zwischen Gorlebener Tannen und Weißem Moor erhalten. Vermutlich wurden durch die marine Transgression in der Pollenzone VIII Teile der älteren Holstein-Ablagerungen und durch den Drenthe-1-Eisvorstoß Teile der jüngsten Holstein-Bildungen erodiert.

Nach Angaben aus den Bohrprotokollen, zieht sich ein Streifen von marinen Holstein-Sedimenten, umgeben von brackischen und limnischen Serien, entlang dem westlichen Rinnenrand knapp östlich von Gorleben bis in den Bereich Gorlebener Tannen.

3.2.3.5 Petrographie der Holstein-Ablagerungen

Die Ablagerungen der Holstein-Warmzeit bestehen überwiegend aus Schluff und Ton. Teilweise sind Schillagen entwickelt. In der Bohrung 670 wurde Lamellibranchiaten-Schill und in der Bohrung 1150 Mollusken-Schill gefunden. Nach ihren Faunen- und Floreninventar können die Schluff- und Tonvorkommen einem limnischen, brackischem oder marinem Ablagerungsmilieu zugeordnet werden. In der Bohrung 20 ist in Schlufflagen ein geringmächtiges Braunkohlelager eingeschaltet.

Die Tonschichten können lagenweise Feinsand und Mittelsand enthalten. Sie sind kalkig oder kalkfrei. Ihre Farbe ist graugrün bis olivgrün. In die Schlufflagen sind vereinzelt Tonschichten eingeschalten. Auch der Schluff ist kalkig oder kalkfrei, teilweise treten Glimmerpartikel auf. Die Farbe ist graugrün bis olivgrün.

Eine Reihe von Holstein-Vorkommen im Deckgebirge und im südlichen Nebengebirge enthalten Sandlagen:

- Bohrung 1070, östlich Vietze: 2 m Feinsand, limnisch;
- Bohrung 980, westlich Vietze: 6 m Mittelsand, (?) brackisch,
- Bohrung 2322 und 2323, östlich Gorleben: 6 m bzw. 2 m Mittelsand;
- Bohrung 480, südwestlich Meetschow: 5 m Feinsand, limnisch;
- Bohrung 1150, südlich Meetschow: 2 m Mittelsand;
- Bohrung 2229, Gorlebener Tannen: 3 m Mittelsand, limnisch;
- Bohrung 1220, Gorlebener Tannen: 17 m Feinsand, lagenweise Grobsand;
- Bohrung 560, südöstlich Gorlebener Tannen: 8 m Feinsand bis Mittelsand;
- Bohrung 410, südliches Nebengebirge: 2 m Mittelsand.

3.2.3.6 Lagerungsverhältnisse der Holstein-Vorkommen

Tektonisch können die Holstein-Vorkommen in autochthone und

allochthone Einheiten unterteilt werden. Überwiegend bilden die elsterzeitlichen Ablagerungen mit dem Lauenburger-Ton-Komplex die Liegendschichten der autochthonen Holstein-Vorkommen. Nur in der Bohrung 2225 (Gorlebener Tannen) sind prälsterzeitliche Quartär-Sedimente im Liegenden entwickelt. Im Hangenden folgen meist die glazifluviatilen Sedimente des Drenthe-1-Stadiums der Saale-Kaltzeit. Durch die saalezeitlichen Eisvorstöße wurden Teile der Holstein-Vorkommen verschuppt. Teils liegen diese Schuppen noch auf autochthonen Holstein-Bildungen (s. 3.2.3.6), teils sind sie in die saalezeitlichen Sedimente eingeschuppt:

- Bohrung 60, westlich Gorlebener Tannen: Einschaltung von 4 m Holstein-Ton zwischen saalezeitlichem Glazifluviatil im Hangenden und Geschiebemergel im Liegenden;
- Bohrung 750, Gorlebener Tannen: Einschaltung von 2 m Holstein-Ton zwischen saalezeitlichem Beckensand mit Braunkohle im Hangenden und Beckenton im Liegenden;
- Bohrung 840/41, Weißes Moor: Einschaltung von 8 m und 6 m Holstein-Ton zwischen saalezeitlichem Glazifluviatil im Hangenden und Beckenton im Liegenden;
- Bohrung 850, Gorlebener Tannen: Einschaltung von 5,5 m Holstein-Ton zwischen fluviatilem Sand der Weichsel-Kaltzeit im Hangenden und saalezeitlichem Beckenablagerungen im Liegenden;
- Bohrung 1120, südöstlich Weißes Moor: Einschaltung von 13 m Holstein-Ton und 4 m Schluff zwischen saalezeitlichem Glazifluviatil im Hangenden und Liegendem;
- Bohrung 2124, Weißes Moor: Einschaltung von 9 m Holstein-Ton zwischen saalezeitlichem Glazifluviatil im Hangenden und Beckenton im Liegenden;
- Bohrung 2310, östlich von Gorleben: 4,5 m Holstein-Ton zwischen saalezeitlichem Glazifluviatil.

Am nordwestlichen Rinnenrand östlich von Gorleben treten in den Bohrungen 2320 bis 2326 und 2329 gestauchte Holstein-Ablagerungen auf. Damit beschränken sich die gestörten Holstein-Ablagerungen auf die Gebiete Gorlebener Tannen, Weißes Moor und auf einen Bereich knapp östlich von Gorleben.

3.2.4 Gesteine über den holsteinzeitlichen Ablagerungen

3.2.4.1 Saale-Eiszeit

3.2.4.1.1 Verbreitung der saalezeitlichen Ablagerungen am Standort Gorleben

Drei Vorstöße des saalezeitlichen Inlandeises haben am Standort Gorleben ihre Ablagerungen hinterlassen. Im Gegensatz zu den elsterzeitlichen Sedimenten sind die glaziären Ablagerungen der Saale-Eiszeit flächenhaft verbreitet, wenn auch die verschiedenen Geschiebemergel nicht überall erbohrt wurden. In geringerem Ausmaß als in der Elster-Eiszeit sind auch subglaziäre Rinnen entwickelt. DUPHORN (1983: S. 115, Anl. 41) beschreibt eine Rinne südwestlich des Höhbeck, die möglicherweise bis ins Liegende des Lauenburger-Ton-Komplexes eingeschnitten ist.

Der Drenthe-1-Geschiebemergel ist rinnenartig in den Randsenken am südwestlichen Salzstockrand und nur vereinzelt im Deckgebirge verbreitet (DUPHORN 1983: Anl. 18). Der Drenthe-2-Geschiebemergel zeigt eine lückenhafte Verbreitung über dem Teilsalzstock und in einem Gebiet südöstlich davon (DUPHORN 1983: Anl. 19). Der Warthe-Geschiebemergel ist in ungestörter Lagerung lückenhaft über dem gesamten Standort Gorleben verbreitet (DUPHORN 1983: Anl. 20). Zwischen den Geschiebemergeln, insbesondere zwischen den Ablagerungen des Drenthe-2- und des Warthe-Stadiums, sind Beckenschluffe eingeschaltet (DUPHORN 1983: S. 37). Die glazifluviatilen Sand- und Kiesvorkommen sind flächenhaft im Untersuchungsgebiet erhalten und können dort, wo die Ablagerungen der drei Stadiale übereinander liegen auch einzelnen Eisvorstößen zugeordnet werden (BGR 1990: S. 186).

Oberflächennah aufgeschlossen sind die saalezeitlichen Sedimente über dem Salzstock im Bereich der Stauchmoräne des Höhbeck und im Nebengebirge in der Langendorfer Geestinsel am nördlichen Untersuchungsrand.

3.2.4.1.2 Mächtigkeit der saalezeitlichen Sedimente

Im Bereich Weißes Moor bis ca. 1 km nördlich bis nordwestlich davon erreichen die saalezeitlichen Ablagerungen über dem Salzstock ihre größte Mächtigkeit (Bohrung 840: 131 m, Bohrung

1305: 128 m, Bohrung 500/503: 123 m). Nach BGR (1990: S 206) werden diese Mächtigkeitszunahmen lokaler saalezeitlicher Subrosion zugeschrieben. Auch in der Umgebung der Bohrung 5001 bei Gorlebener Tannen werden in einem kleinen Gebiet höhere Mächtigkeiten erreicht (Bohrung 5001: 125 m, Bohrung 950: 94 m).

Im Gebiet des Hühbeck schwanken die Gesamtmächtigkeiten zwischen 65 m (Bohrung 680) und 112 m (Bohrung 1240). Im südwestlichen Salzstockdach erreichen die Mächtigkeiten Werte zwischen 25 m (Bohrung 590) und 83 m (Bohrung 930).

Die größten erbohrten Mächtigkeiten der Saale-Serien wurden in der südöstlichen Randsenke mit 149 m ermittelt (Bohrung 210). In der nordwestlichen Randsenke sind dagegen die Mächtigkeiten geringer (Bohrung 780: 84 m, Bohrung 100: 35 m, Bohrung 90: 87 m).

Der rinnenartig verbreitete Drenthe-1-Geschiebemergel wird bis zu 104 m mächtig (Bohrung 370, im südwestlichem Nebengebirge) und weist mittleren Mächtigkeiten zwischen 5 m und 30 m auf. Meist geringmächtiger ist der Drenthe-2-Geschiebemergel entwickelt (Bohrung 750: 4 m, Bohrung 950: 3 m, Bohrung 1050: 32 m). Eine wenige Meter mächtige Lokalmoräne ist in den oberen Bereichen bei den Bohrungen 750, 950, 1050 3050 und 3060 angetroffen worden (DUPHORN 1983: S. 35). Zusätzlich lassen sich in den Bohrungen 750 und 3060 verschuppte Holstein-Ablagerungen nachweisen. Der Warthe-Geschiebemergel ist zwischen 2 und 30 m mächtig.

3.2.4.1.3 Entwicklung der Saale-Eiszeit

In der Saale-Eiszeit stießen die Gletscher in drei Phasen bis südlich des Standorts Gorleben vor (Drenthe-1-, Drenthe-2- und Warthe-Stadial). Die Haupteisrandlagen der Drenthe-Stadiale reichten bis südlich des Harzes, die des Warthe-Stadials nur noch bis wenige Zehnerkilometer südlich des Untersuchungsgebietes (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974).

In den Interstadialen zwischen diesen Phasen war das Gebiet wahrscheinlich eisfrei. Milchquarzführende glazifluviatile/fluviatile Sande an der Saale-Basis und zwischen den Stadialen belegen durch einen erhöhten Anteil südlicher Gerölle und stärkere chemische Verwitterung der Kalkgerölle ein wärmeres

interstadiales Klima (BGR 1990: S. 188).

Das auf die Saale-Eiszeit folgende Eem-Interglazial ist im Arbeitsgebiet nur in einer einzigen Bohrung angetroffen worden: In Bohrung 620 in der südöstlichen Randsenke wurden 4 m feinsandiger Schluff der Eem-Warmzeit erbohrt.

3.2.4.1.4 Petrographie der Saale-Ablagerungen

Der saaleeiszeitliche Schmelzwassersand und -kies hat schichtparallel kleine Braunkohlenbröckchen eingelagert, die entweder aus aufgearbeiteten miozänen Braunkohlevorkommen oder aus aufgearbeiteten elsterzeitlichen Sedimenten stammen. Glazifluviale Bildungen werden durch ihren geringeren Kornrundungsgrad von den fluviatilen Ablagerungen unterschieden. Neben den drei, den einzelnen Stadialen zugehörigen glazifluviatilen Sedimentenserien kann ein weiterer Sedimenttyp mit erhöhtem Milchquarzgehalt, niedrigen Anteilen an paläozoischen Kalken und chemisch angewitterten Kalkgeröllen als glazifluviale/fluviatile Mischfazies unterschieden werden (BGR 1990: S. 186).

Kalkhaltiger, ungeschichteter und schlecht sortierter Schluff und Sand mit eingelagerten Geschieben bilden den typischen Geschiebemergel. Einzelne Dezimeter bis wenige Meter mächtige Linsen und röhrenähnliche Gebilde aus sandigen Partien sind in die Geschiebemergel eingeschaltet (BGR 1990: S. 187).

Über dem Salzstock ist der Drenthe-2-Geschiebemergel stellenweise mit einer im oberen Teil entwickelten Lokalmoräne versehen, die durch Aufarbeitung von holsteinwarmzeitlichem Material eine grünliche Färbung aufweist.

3.2.4.1.5 Lagerungsverhältnisse der Saale-Ablagerungen

Am südwestlichen Salzstockrand hat der Drente-1-Eisvorstoß eine Hohlform erodiert (Woltersdorfer Rinne). Die Saale-Basis erreicht dort eine Tiefe von 153 unter NN (Bohrung 370). In der Gorlebener Rinne südöstlich Salzstocks wurde der Lauenburger Ton von der erosiven Wirkung des Eises zerschnitten.

Der Drenthe-1-Geschiebemergel ist durch den Drenthe-2-Eisvor-

stoß und seine Schmelzwässer ganz oder teilweise erodiert worden. Stauchungen und Schichtverstellungen sind vom Höhbeck, der nordwestlichen Randsenke und vom Westrand der südlichen Gorlebener Rinne bekannt. Das Fehlen glazitektonischer Deformationen und nur geringe Eintiefung in den Untergrund sind dagegen die typischen Merkmale der warthestadialen Moräne (DUPHORN 1983: S. 121).

Eine spezielle Stellung nimmt die bis zu 76 m über NN aufragende Geestinsel des Höhbeck ein. Dort sind saaleeiszeitliche Geschiebemergel und Schmelzwassersande staffelartig aufgestaucht. Die einzelnen Schuppen streichen etwa Ost-West und fallen steil nach Norden ein.

3.2.4.2 Weichsel-Eiszeit

Der Salzstockteil Gorleben liegt quer zur heute noch erkennbaren NW-SE-Erstreckung des Elbe-Urstromtals. Zwischen den 30 bis 35 km auseinanderliegenden, und von saalezeitlichem Geschiebelehm und Schmelzwassersand aufgebauten Geest-Rändern, bestehen die weichselzeitlichen Ablagerungen des Elbe-Urstromtals vorwiegend aus Niederterrassensand, mit Flugsanddecken, Dünen und Mudden. Die Mudden sind in ausgeblasenen Wannen (z.B. Weißes Moor) im Spätglazial mit nur geringen Mächtigkeiten im Zentimeter- bis Dezimeterbereich abgelagert worden.

Aufgrund von geröllpetrographischen Untersuchungen kann die Niederterrasse in eine jüngere und eine ältere Niederterrasse gegliedert werden (SCHRÖDER 1988).

Im Elbe-Urstromtal ist die ältere Niederterrasse außer auf den Geestinseln flächenhaft anzutreffen. Über dem Salzstockteil Gorleben ist im Bereich des Höhbeck, auf zwei Gebieten nordöstlich und südöstlich von Gorleben und auf ein Gebiet bei Marleben keine ältere Niederterrasse abgelagert worden. Die durchschnittliche Höhenlage der Basisfläche liegt bei 6 m unter NN, die Oberfläche erreicht eine Höhe von 10-2 m über NN. Südlich des Höhbeck sind lokal Basislagen bis 10 m unter NN entwickelt. Sie werden als Abflußrinnen der Elbe zwischen Geschiebemergelauftragungen gedeutet (SCHRÖDER 1988).

Die ältere Niederterrasse besteht aus Grobsand- und Kieskörpern. Sand und Kies sind besser sortiert als die glaziären Schmelzwassersande. Die Sandkörner der älteren Niederterrasse

zeigen eine geringe Reife und der Kalkgehalt nimmt meist vom Liegenden zum Hangenden ab.

Die über der älteren Niederterrasse liegende jüngeren Niederterrasse ist im Urstromtal weit verbreitet. Bis auf die Geestinsel Hühbeck sind die Geschiebelehmaufragungen der Saale-Eiszeit durch sie überschüttet worden. Die Basisfläche liegt zwischen 2 m und über 12 m über NN. Das Geröllspektrum zeigt für die jüngere Niederterrasse einen höheren Anteil an südlichen Komponenten.

Über den Niederterrassenkörpern sind noch innerhalb des Spätglazials bis ins Holozän hinein äolische Bildungen entstanden. Das belegen kryoturbat deformierte Steinsohlen, die noch durch die frostdynamischen Vorgänge in den periglaziären Einflußzonen gebildet worden sind. Außerhalb des Untersuchungsgebietes sind Abgrenzungen vom Holozän durch das Alleröd-Bodenprofil möglich.

4. Bestimmung der nachholsteinzeitlichen Subrosionsraten

4.1 Lage- und Mächtigkeitsverhältnisse neben und über dem Salzstock

In Tab. 1 sind ausgewählte statistische Kenndaten zu Lage und Mächtigkeit der elstereiszeitlichen, holsteinzeitlichen, saaleeiszeitlichen und weichseleiszeitlichen Serien im Raum Gorleben zusammengestellt, und zwar getrennt nach Bohrungen über und neben dem Salzstock. Der Vergleich der Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Größen zeigt folgendes Bild:

- Die Elster-, Holstein- und Saale-Serien können über dem Salzstock durchaus ähnliche Basispositionen und Mächtigkeiten aufweisen wie daneben.
- Über dem Salzstock treten jedoch zusätzlich z.T. deutlich tiefere Basispositionen auf; bei den Elster-Serien auch höhere Positionen.
- Elster- und Saale-Serien sind über dem Salzstock durch deutlich höhere Mächtigkeiten gekennzeichnet als daneben.
- Bei den weichseleiszeitlichen Serien sind solche Tendenzen nicht zu erkennen.

Vergleicht man nur die Mittelwerte der Größen (arithmetisches Mittel bzw. Medianwert) miteinander, so bestätigt sich dieses Bild weitgehend. Allerdings sind die mittleren Mächtigkeiten der Elster- und Holstein-Serien über dem Salzstock bemerkenswerterweise kleiner als daneben.

In den Bohrungen in der Gorlebener und Gartower Rinne südlich des Salzstocks liegt die Basis der Holstein-Serien zwischen 31 m unter NN (Bohrung 180) und 44 m unter NN (Bohrung 200; s. 3.2.3.3). Das entspricht etwa den aus anderen Bereichen Norddeutschlands bekannten Tiefenverhältnissen (KUSTER & MEYER 1979, DUPHORN 1983 u. 1987). Es liegt also nahe, in diesem Tiefenbereich das durch differenzierte Vertikalbewegungen in regionaler oder lokaler Dimension unbeeinflusste Niveau der Holstein-Basis zu sehen.

Die Ausgangsposition zum Zeitpunkt der Ablagerung kann wegen des isostatischen Aufstiegs Norddeutschlands nach Ende der Weichsel-Eiszeit durchaus noch tiefer gelegen haben (DUPHORN 1987: rund 50 m unter NN). Für den Vergleich der Lageverhältnisse neben und über dem Salzstock ist das tatsächliche Ausgangsniveau jedoch unerheblich, da der Raum Gorleben von über

		Min	Max	X	Med	Var	SD	N
ELSTER-SERIEN								
Basis	neben	94	206	154	148	1250	35	7
	über	62	292	174	167	3761	61	64
Mächt.	neben	55	165	115	117	1186	34	7
	über	24	239	111	103	2533	50	64
HOLSTEIN-SERIEN								
Basis	neben	31	44	38	39	21	5	7
	über	26	137	68	62	986	31	75
Mächt.	neben	3	18	12	13	33	6	7
	über	2	33	8	6	31	6	74
SAALE-SERIEN								
Basis	neben	17	36	27	27	37	6	7
	über	16	132	59	49	1064	33	75
Mächt.	neben	14	47	29	27	154	12	7
	über	12	131	65	55	1105	33	75
WEICHSEL-SERIEN								
Basis	neben	-10	9	-2	-4	63	8	6
	über	-17	8	-6	-6	32	6	71
Mächt.	neben	5	35	22	23	102	10	6
	über	3	33	16	15	45	7	71

Tab. 1 Statistische Kennwerte für die Datensätze von Bohrungen neben und über dem Salzstock Gorleben

Nur Bohrungen mit vollständigem Profil der Elster- und Holstein-Serien, ohne Hinweise auf Eisstauchung in den Schichtenverzeichnissen; Werte gerundet.

Basis Lage der Schichtbasis in Metern unter NN

Mächt. Mächtigkeit der Serien in Metern

Min Minimum

Max Maximum

X Arithmet. Mittel

Med Medianwert

Var Varianz

SD Standardabweichung

N Anzahl der Fälle

regionalen Veränderungen zweifellos gleichmäßig erfaßt worden ist.

Die kumulative Häufigkeitsverteilung der Werte für die Lage der Holstein-Basis unter NN in Abb. 4 zeigt noch deutlicher, daß über dem Salzstock zwar teilweise ähnliche Positionen wie daneben auftreten, überwiegend aber deutlich tiefere. Dasselbe gilt für die Basis der saaleeiszeitlichen und - weniger ausgeprägt - für die Basis der elstereiszeitlichen Serien (s. Abb. 3, 5).

Die Häufigkeitsverteilung der Mächtigkeiten der Holstein-Serien läßt dagegen neben und über dem Salzstock keine gravierenden Unterschiede erkennen (s. Abb. 4). Da Teile der Holstein-Serien und damit möglicherweise auch Mächtigkeitsunterschiede durch das vorrückende Inlandeis der Saale-Eiszeit beseitigt sein können (s. 3.2.3.6), kann das Fehlen unterschiedlicher Werte für die Mächtigkeit der Holstein-Serien nicht in dem Sinne gedeutet werden, daß es keine subrosionsbedingten Unterschiede zwischen den Bereichen neben und über dem Salzstock gegeben hat. Es wird jedoch deutlich, daß die Mächtigkeit der Holstein-Serien zur Identifizierung von Subrosion offensichtlich nicht geeignet ist.

Die statistischen Kennwerte und die kumulativen Häufigkeitsverteilungen für die Mächtigkeit der Saale- und Elster-Serien lassen wiederum deutliche Unterschiede, zwischen den beiden Bereichen erkennen, und zwar besonders auffällig bei den Saale-Serien (s. Tab 1., Abb. 5 u. 10). Zu den Werten der Saale-Serien muß betont werden, daß die Werte neben dem Salzstock nur von Bohrungen mit Holstein-Serien stammen. Bei Bohrungen ohne Holstein-Serien kann die Basis der saaleeiszeitlichen Ablagerungen erheblich tiefer liegen. An diesen Stellen hat das vorrückende Eis der Saale-Eiszeit die Holstein-Serien vor Ablagerung der Saale-Serien beseitigt.

Die Kenndaten für die weichseleiszeitlichen Serien stimmen im Gegensatz zu den anderen Einheiten neben und über dem Salzstock weitgehend überein (s. Tab. 1). Auch die kumulativen Häufigkeitsverteilungen lassen keine Differenzierung erkennen (s. Abb. 6).

Zusammenfassend ist festzustellen daß zwischen den Positionen der Elster-, Holstein- und Saale-Serien in der Gorlebener (und Gartower) Rinne neben und über dem Salzstock auffällige Unterschiede bestehen. Dasselbe gilt für die Mächtigkeit der Saale-

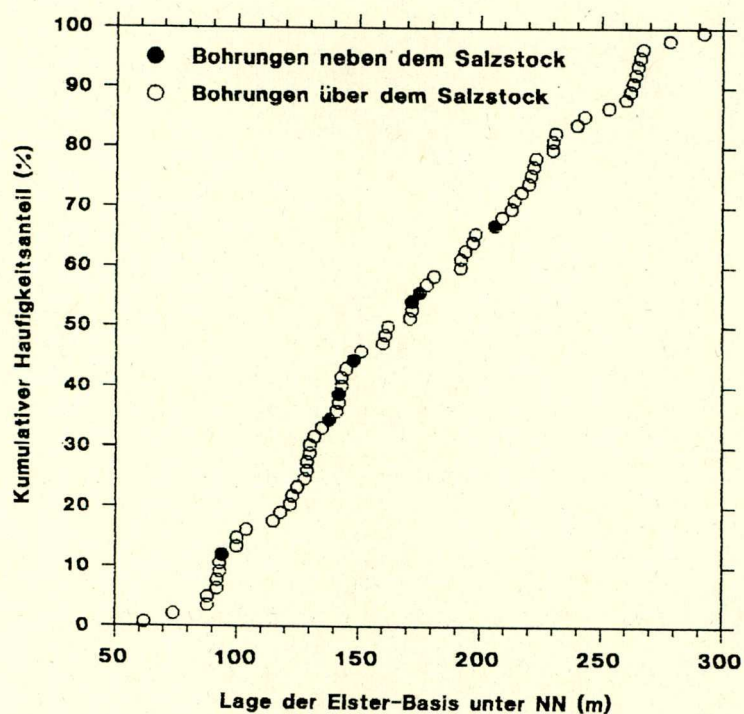
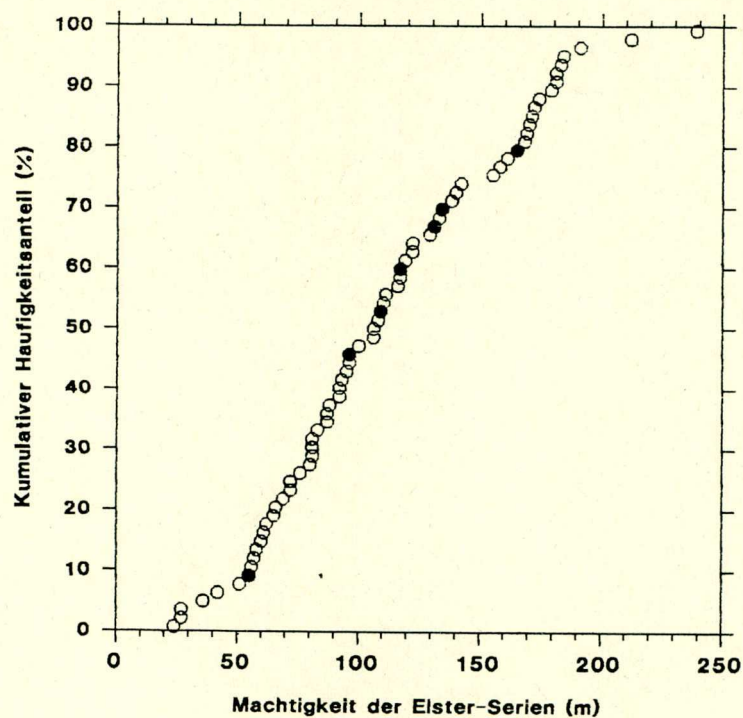


Abb. 3 Kumulative Häufigkeitsverteilung der Elster-Basis (unten) und der Elster-Mächtigkeit (oben) in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

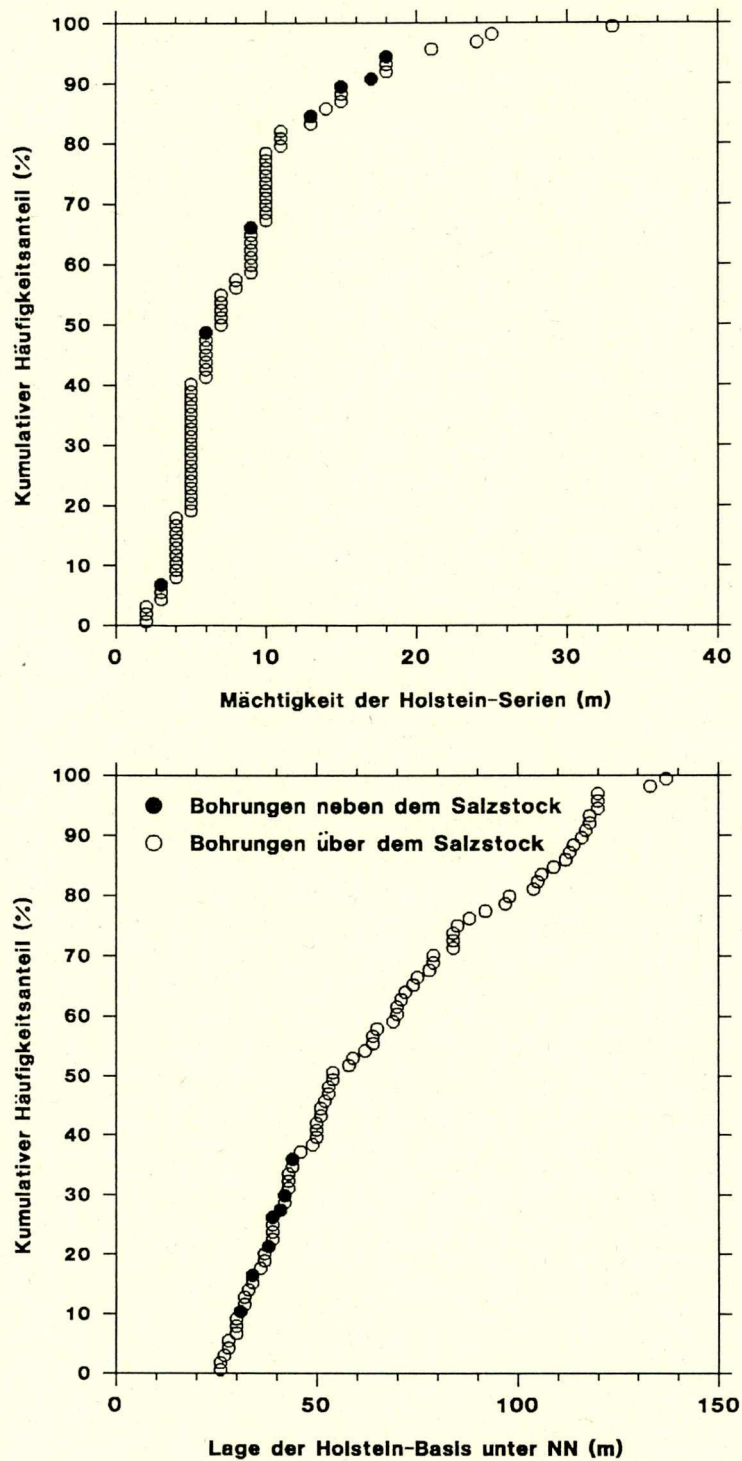


Abb. 4 Kumulative Häufigkeitsverteilung der Holstein-Basis (unten) und der Holstein-Mächtigkeit (oben) in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

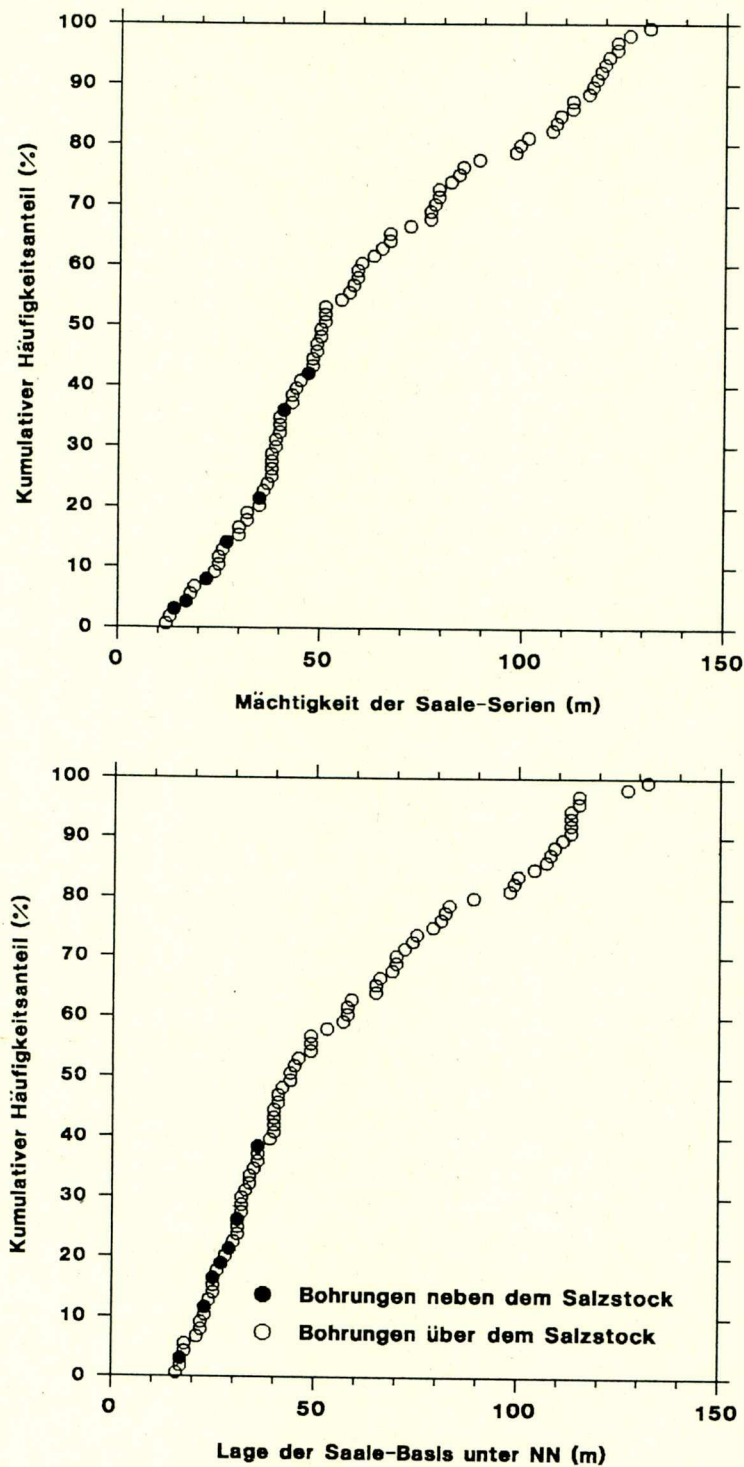


Abb. 5 Kumulative Häufigkeitsverteilung der Saale-Basis (unten) und der Saale-Mächtigkeit (oben) in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

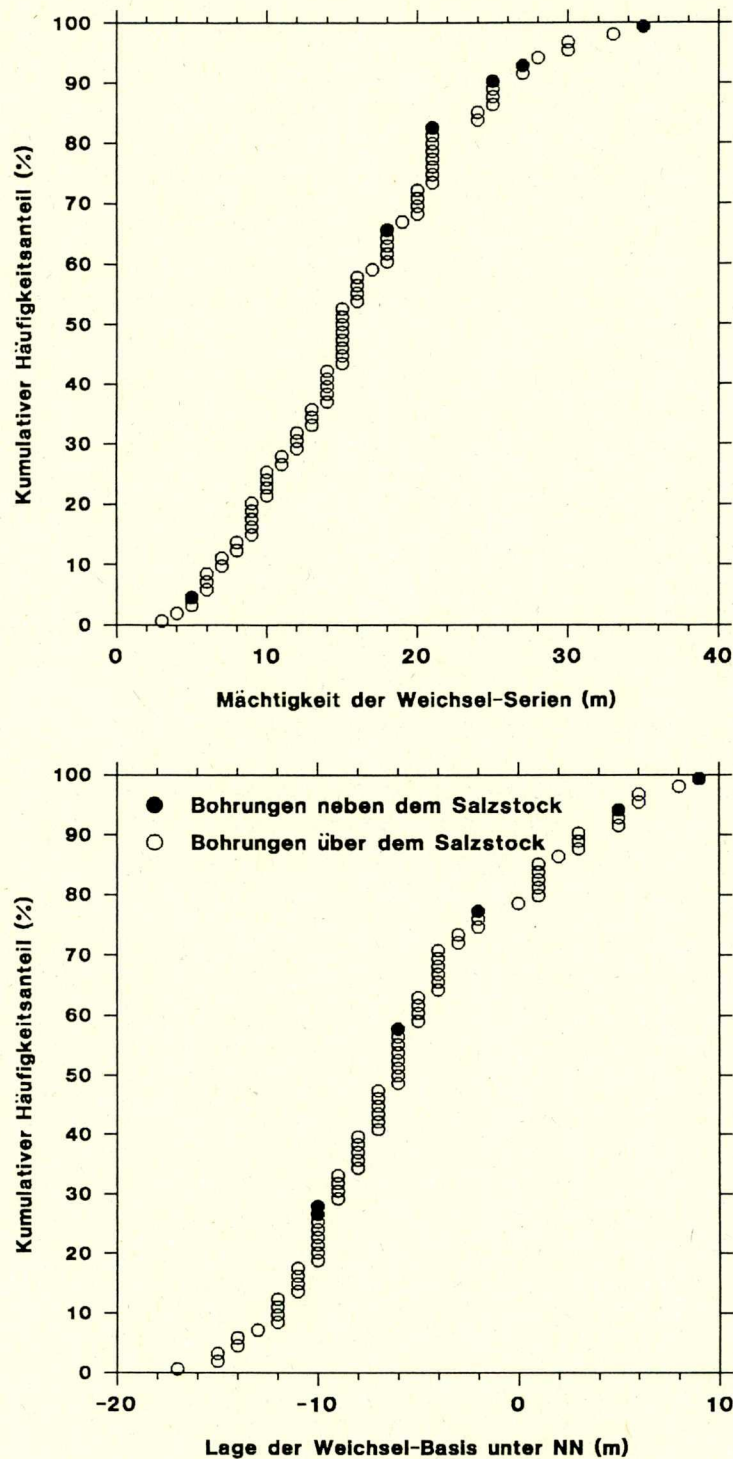


Abb. 6 Kumulative Häufigkeitsverteilung der Weichsel-Basis (unten) und der Weichsel-Mächtigkeit (oben) in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

Serien. Soweit die genannten Unterschiede tatsächlich auf Subrosion zurückgeführt werden können, entfällt zumindest der Hauptanteil der Subrosion auf die Saale-Eiszeit. Das ergibt sich aus dem Sachverhalt, daß sich die Mächtigkeiten der Elster- und Holstein-Serien über und neben dem Salzstock im Gegensatz zu denen der Saale-Serien nicht gravierend unterscheiden. Wegen der übereinstimmenden Lagerungsverhältnisse der Weichsel-Serien neben und über dem Salzstock muß sie bereits vor der Weichsel-Eiszeit abgeklungen gewesen sein. Zumindest kann weichseleiszeitliche Subrosion anhand des Vergleiches der Lagerungsverhältnisse neben und über dem Salzstock nicht nachgewiesen werden.

Angesichts dieser bei oberflächlicher Betrachtung deutlichen Hinweise auf Subrosion während der Saale-Eiszeit muß einschränkend darauf hingewiesen werden, daß die (statistische) Aussagekraft der Daten - abgesehen von den noch zu prüfenden Störfaktoren (s. 4.2) - eingeschränkt ist. Insgesamt deuten nämlich die statistischen Kennwerte in Tab. 1 daraufhin, daß zwischen den Bohrungen neben und über dem Salzstock zwar deutliche Unterschiede bestehen, daß jedoch über dem Salzstock Zonen vorhanden sind, in denen die Lagerungs- und Mächtigkeitsverhältnisse mit denen neben dem Salzstock übereinstimmen. Es liegt deswegen nahe, die Werte aus allen Bohrungen zu einer statischen Population zusammenzufassen und mit Hilfe geeigneter Verfahren in signifikant unterschiedliche Gruppen aufzulösen.

4.2 Beurteilung des Einflusses von Störfaktoren auf die heutige Position der Holstein-Basis

4.2.1 Relief des Ablagerungsraums

4.2.1.1 Grundlagen zur Beurteilung der Reliefeinflusses

Der Einfluß der morphologischen Differenzierung des Ablagerungsraumes (Gorlebener bzw. Gartower Rinne) vor Beginn der Ablagerung der Holstein-Serien auf deren heutiges Niveau wird auf Grundlage der nach allgemeiner geologischer Erfahrung zu erwartenden regelmäßigen Beziehung zwischen der Tiefe des Ablagerungsraumes bzw. dem Ablagerungsniveau einer Schicht und deren Mächtigkeit und Korngrößenzusammensetzung beurteilt:

- Wird eine bestimmte Schicht innerhalb eines einheitlichen Ablagerungsraumes in tiefen Zonen abgelagert, so ergeben sich daraus grundsätzlich größere Schichtmächtigkeiten als bei Ablagerung in flacheren Zonen. Solange der Ablagerungsraum nicht vollständig oder einheitlich bis zu einem bestimmten Niveau aufgefüllt worden ist, resultiert daraus eine proportionale Beziehung zwischen der Position der Basis und der Deckfläche einer bestimmten Sedimenteinheit und damit auch ihrer Mächtigkeit (s. Abb. 7: rechts).
- Ablagerungen in tiefen (randfernen) Zonen eines Ablagerungsraumes sind zudem in der Regel feinkörniger entwickelt als solche in flachem Wasser.

Diese Aussagen gelten unabhängig davon, ob die Ablagerung einer Schicht in einer zuvor geschaffenen Geländedepression erfolgt oder in einer Zone, deren Boden sich während der Ablagerung noch absenkt. Der erste Fall trafe auf die Ablagerungen des Lauenburger-Ton-Komplexes und der Holstein-Warmzeit in der durch Erosion unter dem Elster-Eis entstandenen Gorlebener und Gartower Rinne zu, der zweite auf die Sedimentation in einer Subrosionssenke (s. 2.2), z.B. während der Elster-Eiszeit. Elstereiszeitliche Subrosion ist daher mit dem hier angewendeten Verfahren allein nicht nachzuweisen.

Wenn eine Schicht dagegen **nach ihrer Entstehung** durch Subrosion abgesenkt worden ist, wird die ursprüngliche Beziehung zwischen Position und Mächtigkeit einer Schicht gestört: Es ergibt sich durch die Absenkung eine - gemessen an der durch Subrosion unveränderten Mächtigkeit - zu tiefe Position der Schichtbasis und der Schichtoberfläche. Für die Fragestellung ist dabei von Bedeutung, daß durch spätere (flächenhafte) Absenkung einer Schicht ihre wahre Mächtigkeit praktisch überhaupt nicht und die scheinbare Mächtigkeit nur unwesentlich verändert werden²⁾. Die Mächtigkeit einer Schicht ist also zugleich ein weitgehend unveränderbares Maß für die Ausgangsposition ihrer Basis und - unter den oben genannten Bedingungen - ihrer Deckfläche.

Auch für die ungestörte Beziehung zwischen den Positionen der Basis- bzw. Deckflächen verschiedener Einheiten und deren Mächtigkeiten innerhalb eines Ablagerungsraumes muß eine solche lineare Korrelation bestehen, vorausgesetzt sie weisen

2) Diese Aussage gilt nicht für engräumige Subrosionsphänomene, wie z.B. Erdfälle.

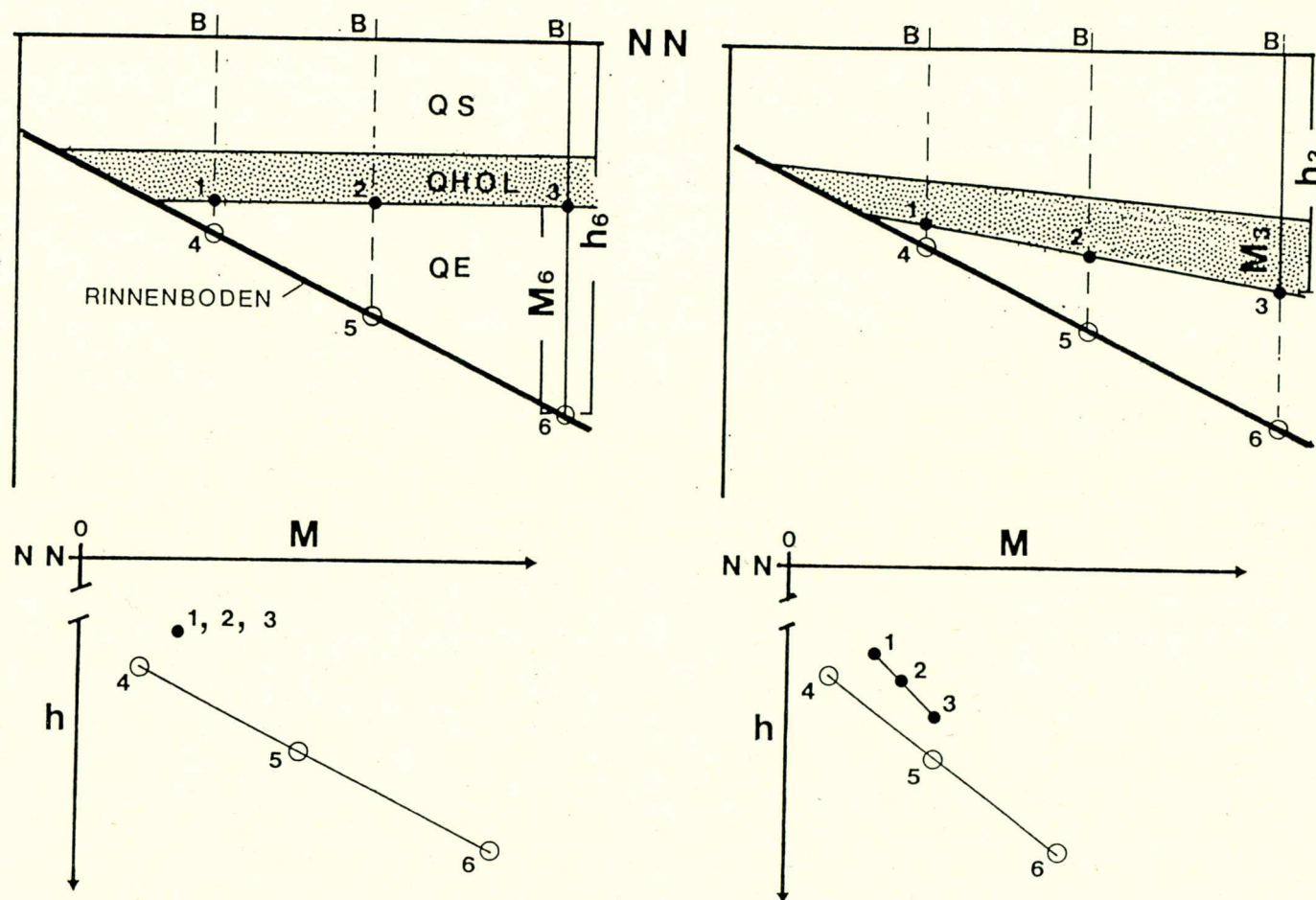


Abb. 7 Mögliche sedimentationsabhängige Beziehungen zwischen den Mächtigkeiten (M) und Basispositionen (h) der Holstein- und Elster-Serien in Bohrprofilen in der Gorlebeener Rinne (oben: Prinzipschnitte durch die Rinne; unten: resultierende mathematische Beziehungen zwischen diesen Größen [$h=f(M)$])

B: Bohrungen; M_{1-6} / h_{1-6} : Mächtigkeit / Basisposition unter NN der Schicht an den Punkten 1-6; QS, QHOL, QE: s. 3.1; weitere Erläuterungen: s. Text;

übereinstimmende Bildungsbedingungen auf und sind vollständig erhalten. In der Gorlebener und Gartower Rinne gilt das zweifelsfrei für die Basis der Elster-Serien bzw. des Lauenburger-Ton-Komplexes und deren Mächtigkeit sowie die Basis der Holstein-Serien, wie in Abb. 7 dargestellt. Auch die Beziehung zwischen Mächtigkeit der Elster-Serien und Position der Holstein-Basis kann also zur Rekonstruktion subrosionsbedingter Lagerungsstörungen der Holstein-Basis benutzt werden. Das ist deswegen wichtig, weil das vordringende Eis der Saale-Eiszeit Teile der Holstein-Serien beseitigt hat oder doch beseitigt haben kann (s. 3.2.3.6). Die ursprünglich möglicherweise vorhandenen Beziehung zwischen Basisposition und Mächtigkeit der Holstein-Serien und ihre subrosionsbedingte Störung über dem Salzstock sind dann möglicherweise nicht mehr zu erkennen.

Soweit saaleeiszeitliche oder weichseleiszeitliche Gesteine die Ablagerungen der Holstein-Warmzeit überlagern und sich damit zweifelsfrei im Bereich der Gorlebener oder Gartower Rinne befinden, können die geschilderten Beziehungen auch für diese Einheiten gelten - vorausgesetzt die Rinnen wären zur Zeit der Ablagerung der Saale- und Weichsel-Serien noch als Ablagerungsräume in Funktion gewesen. Da jedoch unklar ist, wie lange die Gorlebener und Gartower Rinne Bestand gehabt haben, muß diese Frage gezielt geprüft werden.

Die genannten Beziehungen zwischen der Mächtigkeit und der Position der Basis einer oder mehrerer Schichten werden umso undeutlicher je vollständiger der Ablagerungsraum mit Sedimenten aufgefüllt ist. Bei vollständiger Füllung mit Sediment oder Auffüllung auf ein weitgehend einheitliches Niveau besteht daher keine statistisch faßbare Beziehung zwischen Sedimentoberfläche (bzw. Basis der nächstfolgenden Schicht) und der Sedimentmächtigkeit mehr (s. Abb. 7).

Die geschilderten Gesetzmäßigkeiten gelten nur für Einheiten mit annähernd übereinstimmender Ablagerungsdauer und einheitlicher Zusammensetzung des abgelagerten Materials. Unterschiedliche Korngrößen des zur Ablagerung gelangenden Materials können sich dagegen in sehr unterschiedlichen Sedimentationsraten äußern und damit trotz übereinstimmender Bildungsdauer zu erheblichen Mächtigkeitsschwankungen innerhalb ein und derselben Einheit führen. Treten solche Unterschiede in den elsterzeitlichen Serien auf, kann das auch zur setzungsbedingten Differenzierung der Lage der Holstein-Basis führen (s. 4.2.2).

Die Bedingung einheitlicher Bildungsdauer innerhalb der gesamten Gorlebener Rinne ist für die Elster-Serien und Holstein-Serien näherungsweise erfüllt. Während die Holstein-Serien außerdem - abgesehen von einigen lokal begrenzten Sandeinschaltungen - weitgehend einheitlich aus feinkörnigen Ablagerungen mit hohen Anteilen an organischem Material bestehen, weisen die Elster-Serien eine vertikal und horizontal ausgeprägte Differenzierung in feinkörnigere und gröbere Lagen auf (s. 3.2.2 u. 3.2.3).

Auch der Lauenburger-Ton-Komplex, der die Abfolge der Elster-Serien beschließt, besteht nicht allein aus Ton und Schluff, sondern enthält weit durchhaltende Sandeinschaltungen (s. 3.2.2). Deren Ausdehnung parallel zur Längsachse der Gorlebener Rinne ist nach BGR (1990) erheblich größer als quer dazu. Das deutet darauf hin, daß sie im wesentlichen von den seitlichen Rändern der Rinne aus eingetragen worden sind. Besonders auffällig ist eine wechselnd mächtige Sandlage direkt unterhalb der Holstein-Basis, die insbesondere im Südteil der Rinne (über und neben dem Salzstock) entwickelt ist.

Bei den elstereiszeitlichen Ablagerungen kann also die Korrelation zwischen Basisposition und Mächtigkeit durch Wechsel in der Gesteinszusammensetzung überlagert werden. Davon wäre auch die Position der Holstein-Basis betroffen. Ein solcher Einfluß kann unter Beachtung der Zusammenhänge zwischen Korngrößenzusammensetzung von Ablagerungen und Wassertiefe (s.o.) über die Korngrößenzusammensetzung der elsterzeitlichen Ablagerungen berücksichtigt werden. Die entsprechenden Daten sind den Schichtenverzeichnissen entnommen worden.

Bei Bohrungen mit großen Mächtigkeiten und tiefen Positionen der Elster-Basis müßten die Ablagerungen also überwiegend feinkörnig entwickelt sein, bei Bohrungen mit geringen Mächtigkeiten und hohen Basispositionen dagegen relativ grobkörnig.

4.2.1.2 Beurteilung des Reliefeinflusses

Die Prüfung, welchem Modell im Hinblick auf die Bedeutung der Morphologie des Ablagerungsraumes die Sedimente in der Gorlebener (und Gartower) Rinne entsprechen (s. 4.2.1.1), erfolgt mit Hilfe der Abb. 8 bis 12 sowie 15. Die Ergebnisse werden anschließend zu einer Gesamtwertung zusammengeführt.

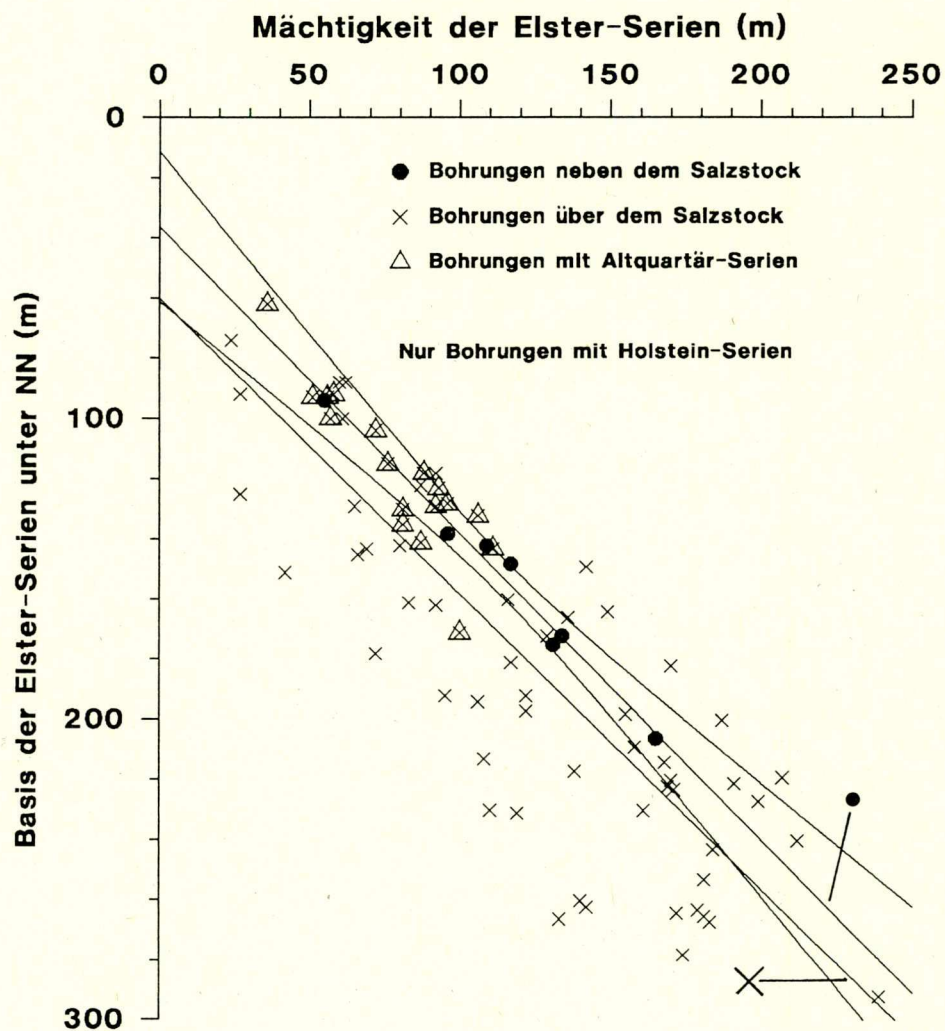


Abb. 8 Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Elster-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

mit den Regressionsgeraden für die Bohrungen neben (mit 95%-Vertrauensintervall) und über dem Salzstock

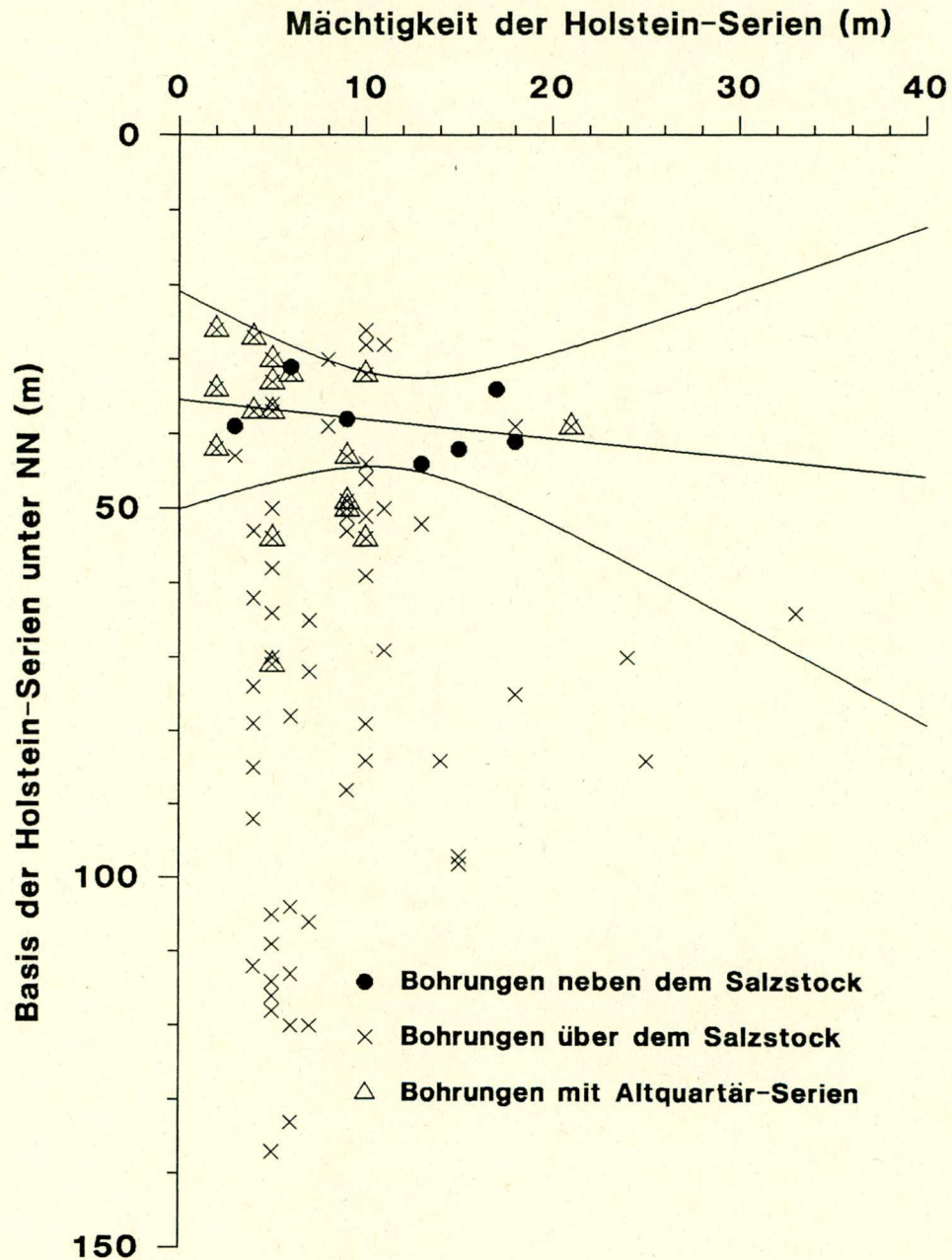


Abb. 9 Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Holstein-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

mit der Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensintervalls für die Bohrungen neben dem Salzstock

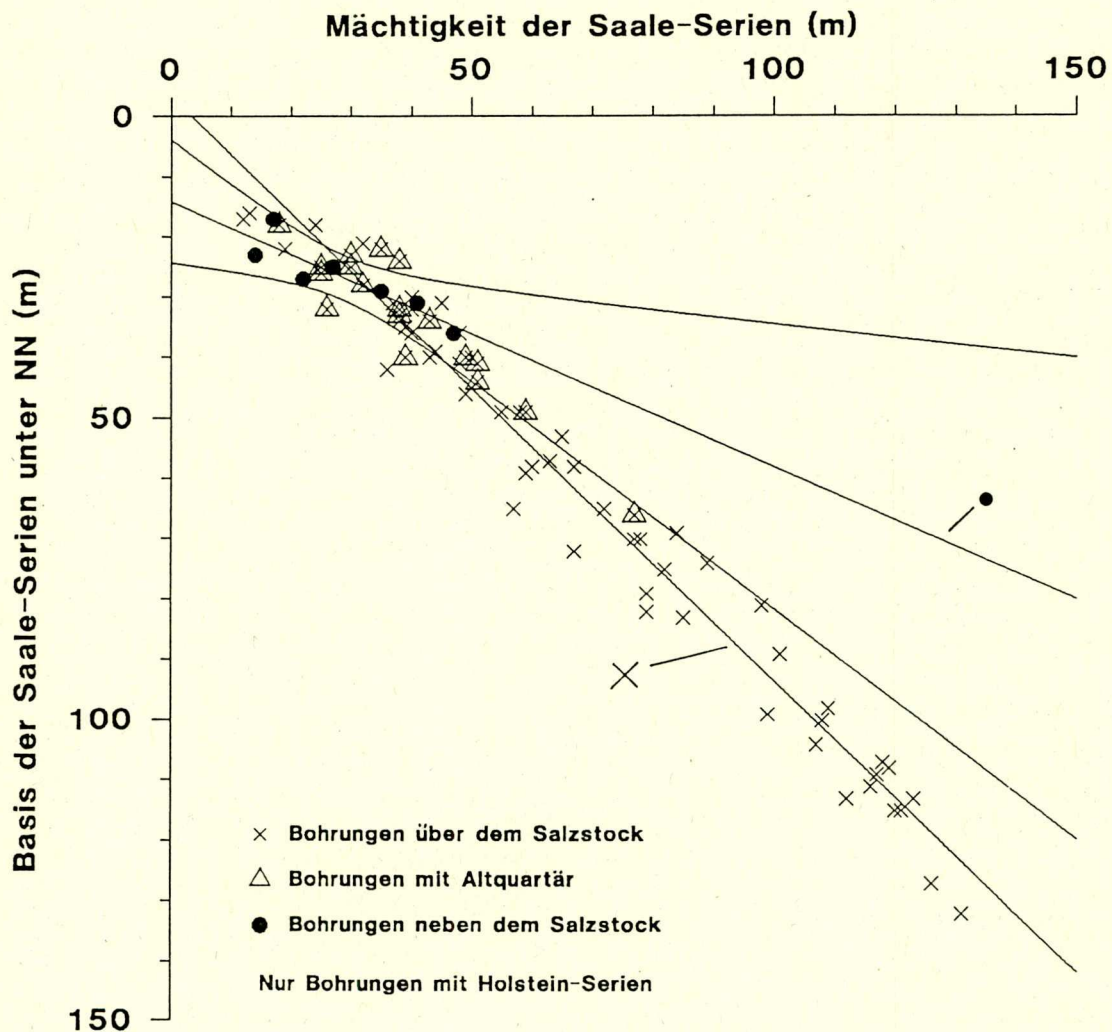


Abb. 10 Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Saale-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

mit den Regressionsgeraden für die Bohrungen neben (mit 95%-Vertrauensintervall) und über dem Salzstock

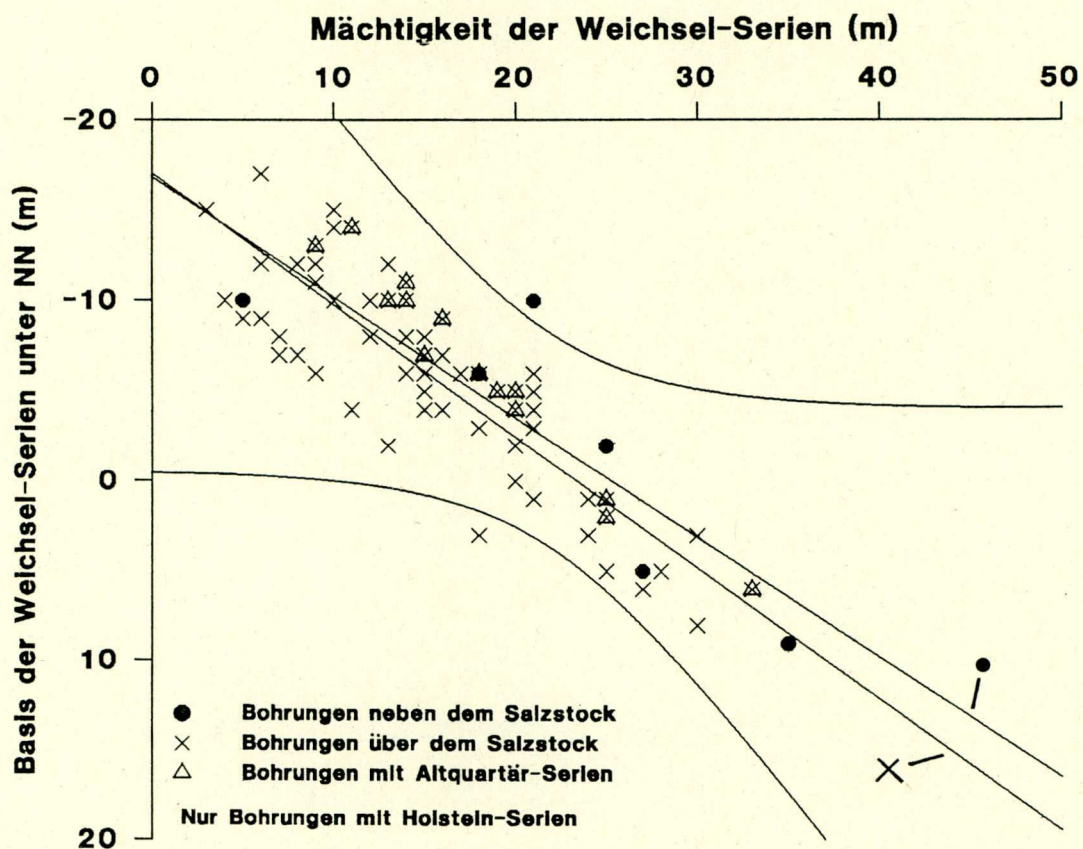


Abb. 11 Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Weichsel-Serien und ihrer Basisposition in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

mit den Regressionsgeraden für die Bohrungen neben (mit 95-%-Vertrauensintervall) und über dem Salzstock

Elstereiszeitliche Serien

Bei den Bohrungen in der Gorlebener Rinne besteht offensichtlich eine deutliche Abhängigkeit der Mächtigkeit der Elster-Serien von der Lage ihrer Basis (s. Abb. 8). Dieses Bild entspricht generell dem in 4.2.1.1 beschriebenen Zusammenhang zwischen der Tiefe eines Ablagerungsraumes und der Mächtigkeit der darin abgelagerten Sedimente. Im Detail ergeben sich jedoch deutliche Differenzierungen zwischen den Bereichen neben und über dem Salzstock:

Außerhalb des Salzstocks besteht für die Gesteine der Elster-Eiszeit eine - selbst angesichts der geringen Zahl von Bohrungen - deutliche proportionale Beziehung zwischen der Tiefenlage ihrer Basis und der jeweiligen Mächtigkeit. Das zeigt schon der schmale 95-Prozent-Vertrauensbereich um die Regressionsgerade für die Werte von Bohrungen außerhalb des Salzstocks. Über dem Salzstock fügen sich durchaus Bohrungen in dieses Bild ein. Dazu gehören auch die meisten Bohrungen aus dem Südwestteil des Salzstocks, in denen praelsterzeitliche Quartär-Ablagerungen angetroffen worden sind.

Bemerkenswerterweise gibt es über dem Salzstock jedoch keine Bohrungen, in denen die Elster-Serien gemessen an der Position ihrer Basis eine zu große Mächtigkeit aufwiesen. Ausgenommen von dieser Regel sind lediglich diejenigen Bohrungen, zu denen die Schichtenverzeichnisse Hinweise auf Stauchung, und damit sekundär erhöhte Mächtigkeit, liefern und die deswegen nicht in die Auswertung einbezogen und auch in Abb. 8 bis 12 nicht dargestellt worden sind.

Bei zahlreichen Bohrungen aus dem Salzstockbereich ist die Mächtigkeit gemessen an der Position der Elster-Basis dagegen auffällig gering. Die Abweichung des tatsächlichen Wertes vom - auf Grund der Verhältnisse neben dem Salzstock - erwarteten Wert kann mehrere Zehnermeter ausmachen. Ihr Ausmaß ist offensichtlich nicht von der heutigen Position der Elster-Basis abhängig.

Diese Befunde äußern sich auch darin, daß die nur für die Bohrungen über dem Salzstock berechnete Regressionsgerade deutlich tiefer liegt als die für die Werte außerhalb (s. Abb. 8). Beide Geraden verlaufen allerdings auch nahezu parallel zueinander. Allein aus diesem Grund kann das Relief des Ablagerungsraumes nicht allein für das heutige Verhältnis zwischen Elster-Basis und Mächtigkeit der Elster-Serien verantwortlich

sein. In diesem Falle müßten nämlich die stärksten Abweichungen bei den Bohrungen mit den größten Mächtigkeiten auftreten (s. 4.2.1.1). Die Regressionsgerade für die Werte von Bohrungen über dem Salzstock müßte deutlich steiler verlaufen als die für die Werte außerhalb des Salzstocks.

Holstein-Serien

Im Gegensatz zu den Elster-Serien ist für die holsteinzeitlichen Ablagerungen neben dem Salzstock keine deutliche Abhängigkeit der Mächtigkeit von Position ihrer Basis festzustellen (s. Abb. 9). Die geringe Neigung der Regressionsgeraden und die große Breite des 95-Prozent-Vertrauensintervalls für die Werte der Bohrungen neben dem Salzstock belegen die geringe Ausprägung dieser Beziehung. Über dem Salzstock fehlt sogar jegliche Beziehung zwischen Basisposition und Mächtigkeit der Holstein-Serien. Besonders auffällig ist die geringe Bandbreite der Tiefenlage der Holstein-Basis neben dem Salzstock. Vergleichbare Werte gelten auch für einige Bohrungen über dem Salzstock, und zwar insbesondere - wie bei den Elster-Serien - für solche mit praelsterzeitlichen Ablagerungen.

Aus diesen Befunden folgt, daß das Relief der Gorlebener und Gartower Rinne bereits zu Beginn der Ablagerung der holsteinzeitlichen Schichten durch Sedimente der Elster-Eiszeit weitgehend ausgeglichen war (s. 4.2.1.1). Diese Einschätzung steht im Einklang mit den Ergebnissen mikrofloristischer Untersuchungen, nach denen die Holstein-Serien in einem zunehmend flacher werdenden Ablagerungsraum entstanden sind (BGR 1990: S. 195).

Beide Befunde bedeuten allerdings nicht, daß die Gorlebener Rinne (und die Gartower Rinne) vollständig mit Sedimenten gefüllt war. Die Beschränkung von Holstein-Vorkommen auf die Rinne und die deutliche Korrelation zwischen der Basis der saaleeiszeitlichen Ablagerungen und deren Mächtigkeit belegen vielmehr die Existenz der Rinnen auch noch während der Holstein-Warmzeit.

Wie bei den Elster-Serien liegt die Position der Holstein-Basis über dem Salzstock nur bei wenigen Bohrungen oberhalb der Bandbreite der Werte neben dem Salzstock, und dann nur unbedeutend. Bei der Mehrzahl der Bohrungen über dem Salzstock wurde die Holstein-Basis in deutlich größerer Tiefe angetroffen als neben dem Salzstock. In auffälliger Weise korrespon-

dieren tiefe Positionen der Holstein-Basis in der Regel nicht mit erhöhten Mächtigkeiten.

Angesichts des Ausmaßes dieser Veränderungen kommen dafür vornehmlich zwei Vorgänge in Frage:

- Die Holstein-Serien sind durch Subrosion abgesenkt worden. In diesem Fall wären die heutigen Positionen der Holstein-Basis nachträglich entstanden (s. 4.2.1.1).
- Ablagerungsbedingte Mächtigkeitsunterschiede bei den Holstein-Serien sind durch vorrückendes Inlandeis während der Saale-Eiszeit beseitigt worden. In diesem Fall handelte es sich bei Holstein-Serien um Relikte von Vorkommen mit ursprünglich größerer Mächtigkeit.

Als alleinige Ursache scheidet die zweite Möglichkeit schon deswegen aus, weil damit nicht die besonders tiefen Positionen der Holstein-Basis über dem Salzstock erklärt werden können (s. dazu 4.2.3). Angesichts der sehr großen Bandbreite der Werte der Basispositionen im Vergleich zu den Mächtigkeitschwankungen müßte das vorrückende Eis zudem unabhängig von der Tieflage der Holstein-Serien immer gerade soviel von ihnen beseitigt haben, daß etwa gleiche Restmächtigkeiten verblieben wären. Da jedoch durchaus unterschiedliche Anteile der Holstein-Serien vom Eis der Saale-Eiszeit beseitigt worden sein können, darf die Beziehung zwischen Tieflage der Basis und Mächtigkeit der Holstein-Serien für die Rekonstruktion nachholsteinzeitlicher Lageveränderungen nicht herangezogen werden.

Der Einfluß der unterschiedlichen Tiefe des Ablagerungsraumes auf die Lage der Holstein-Basis müßte sich allerdings auch in einer mehr oder weniger deutlichen Abhängigkeit der Position der Holstein-Basis von der Basis und der Mächtigkeit der Elster-Serien äußern (s. 4.2.1.1); sie könnte ersatzweise zur Beurteilung des Einflusses der Rinnenmorphologie auf die heutige Position der Holstein-Serien benutzt werden. Abb. 12 und 13 zeigen aber deutlich, daß weder neben noch über dem Salzstock eine gerichtete Beziehung zwischen den Größen besteht (entsprechendes gilt für Saale- und Elster-Basis). Diese Befunde stützen die bereits aus dem Verhältnis zwischen Holstein-Basis und Holstein-Mächtigkeit abgeleitete Schlußfolgerungen (s.o.), wonach die Morphologie des Rinnenbodens für die heutige Position der Holstein-Serien ohne Bedeutung ist.

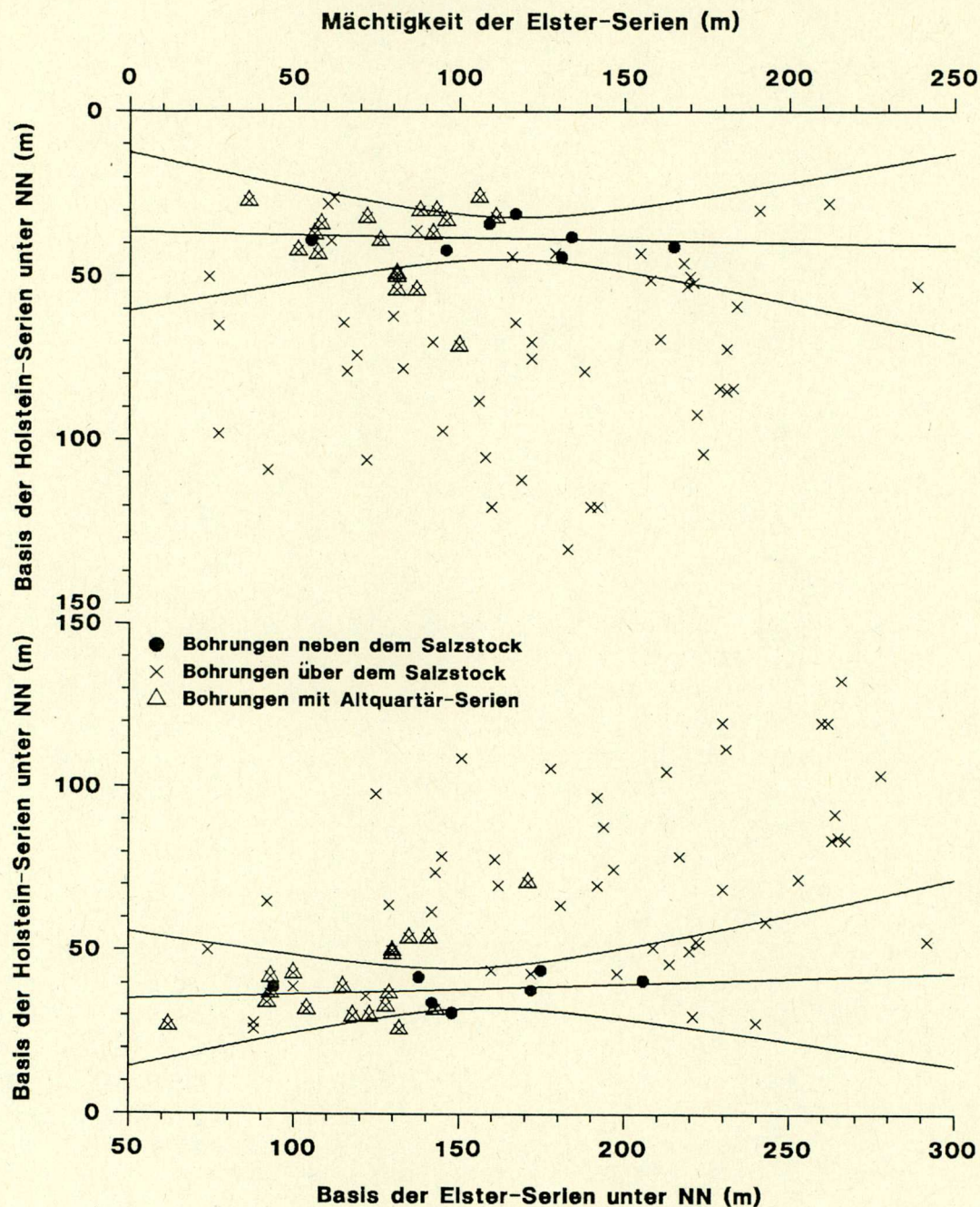


Abb. 13 Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Elster-Serien (oben) und der Basisposition der Holstein-Serien in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

Abb. 12 Beziehung zwischen der Basisposition der Elster-Serien (unten) und der Basisposition der Holstein-Serien in Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

beide Abbildungen mit den Regressionsgeraden und dem 95-%-Vertrauensintervall für die Bohrungen neben dem Salzstock

Zuverlässige Aussagen über die Beziehungen zwischen der Position der Holstein-Basis und dem (im allgemeinen hohen) Tonanteil der Holstein-Serien als Hinweis auf Ablagerung in tiefen Bereichen des Ablagerungsraumes sind nicht möglich. Angesichts der Möglichkeit nachträglicher Mächtigkeitsreduktion der Holstein-Serien (s.o.) wären sie ohnehin nicht sinnvoll, weil keine Informationen über die verlorengegangenen Abschnitte vorliegen. Abb. 15 zeigt, daß eine lineare Beziehung zwischen der heutigen Position der Holstein-Basis und dem ersatzweise heranzuziehenden Tonanteil in den Elster-Serien nur neben dem Salzstock vorhanden ist.

Saale-Serien

Bei den Gesteinen der Saale-Eiszeit besteht - wie bei den Elster-Serien - eine deutliche Korrelation zwischen der Position ihrer Basis und ihrer Mächtigkeit (s. Abb. 10), und zwar sowohl bei den Bohrungen neben dem Salzstock als auch bei denen darüber. Außerhalb des Salzstocks übersteigt die Bandbreite der Positionen der Saale-Basis nur geringfügig diejenige der Holstein-Basis.

Große Mächtigkeiten und tiefe Positionen der Saale-Basis sind auf den Salzstockbereich beschränkt. Anders als bei den Elster-Serien weichen die Datenpunkte mit zunehmender Mächtigkeit und Tiefe der Basis immer stärker von der Regressionsgeraden für die Werte von Bohrungen neben dem Salzstock ab, und zwar in Richtung größerer Tiefe der Basis. Diese Tendenz wird durch den in demselben Sinne zunehmenden Abstand zwischen den Regressionsgerade für die Bohrungen über und neben dem Salzstock veranschaulicht (s. Abb. 10). Die Regressionsgerade für die Bohrungen über dem Salzstock ist etwa doppelt so steil.

Die mit der Tiefe der Saale-Basis zunehmende Abweichung der Datenpunkte von Bohrungen über dem Salzstock von der Regressionsgeraden für die Bohrungen neben dem Salzstock ist nicht mit einer gleichzeitigen Erhöhung der Streubreite bzw. Bandbreite der Werte verbunden. Auch über dem Salzstock wird die Schichtmächtigkeit demnach deutlich vom Relief des Ablagerungsraumes beeinflußt.

Die hohe Korrelation zwischen Basispositionen und Mächtigkeiten der Saale-Serien geht allerdings keineswegs auf das Relief des Bodens der Gorlebener und Gartower Rinne zu Beginn der Elster-Eiszeit zurück. Ihre Ursache liegt zum einen darin, daß

eine im Bereich der Rinne fortbestehende Senke mit flachem Boden (s.o.: Holstein-Serien) vollständig aufgefüllt wird.

Aus Abb. 14 kann eine weitere Ursache abgeleitet werden: Auffällig tiefe Positionen der Saale-Basis (und Holstein-Basis) korrespondieren keineswegs mit tiefen Positionen der Elster-Basis. Diese Diskrepanz deutet zusammen mit der steilen Neigung der Regressionsgeraden für die Bohrungen über dem Salzstock darauf hin, daß es während der Ablagerung der Saale-Serien örtlich zu einer subrosionsbedingten Vertiefung des Ablagerungsraumes gekommen ist.

Weichsel-Serien

Die Mächtigkeit der Weichsel-Serien ist deutlich von der Position ihrer Basis abhängig. Signifikante Unterschiede zwischen den Bereichen neben und über dem Salzstock sind nicht zu erkennen (s. Abb. 11).

Zusammenfassende Wertung

Abb. 14 liefert einen zusammenfassenden Überblick über die Beziehungen zwischen den Basispositionen und Mächtigkeiten der besprochenen Serien. Darin sind für alle Bohrungen, in denen die Elster-, Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien vollständig durchbohrt worden sind, die Basispositionen dieser Schichten auf der Y-Achse abgetragen. Die Anordnung der Bohrungen auf der X-Achse folgt der zunehmenden Tiefe der Elster-Basis.

Die Verbindungslinie der Datenpunkte für die Elster-Basis kann als integraler Schnitt durch die Gorlebener (und Gartower) Rinne vom Rand bis in das Rinnentiefste aufgefaßt werden. Wenn die Mächtigkeit der Elster-Serien und die heutigen Basispositionen der jüngeren Gesteine, insbesondere der Holstein-Serien und Saale-Serien, maßgeblich vom Relief des Rinnenbodens abhängig wären, müßte die Verbindungslinie der Datenpunkte für die Basispositionen der Einheiten jünger als die Elster-Eiszeit zwar flacher verlaufen als die der Elster-Serien, jedoch ebenfalls in Richtung der tiefsten Positionen der Elster-Basis geneigt sein (s. auch Abb. 7).

Aus der weitgehend einheitlichen Neigung der Verbindungslinie der Werte für die Positionen der Elster-Basis wird zunächst deutlich, daß die Bohrungen - abgesehen von den flachsten und

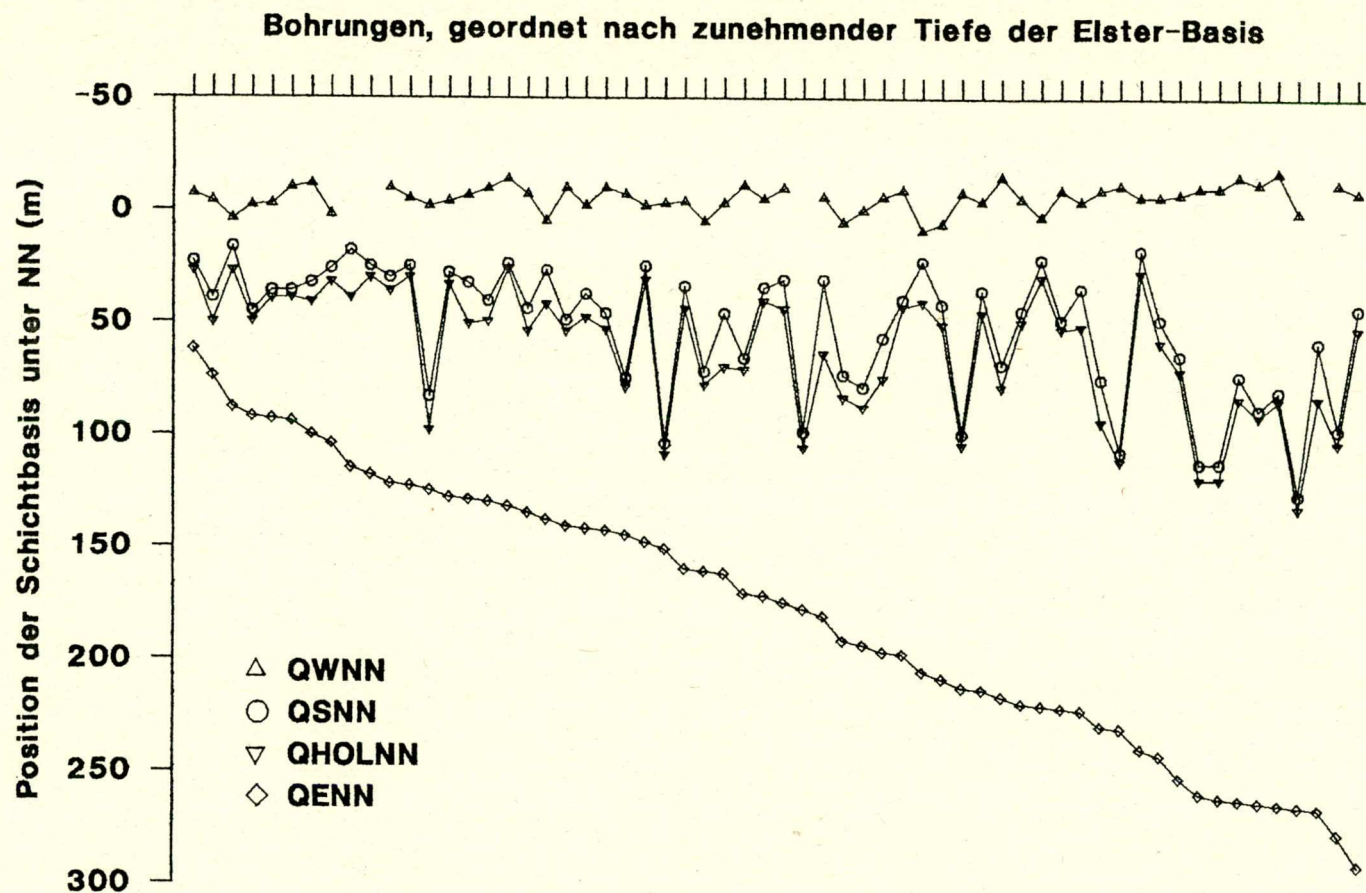


Abb. 14 Basispositionen der Elster-, Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien in den hydrogeologischen Erkundungsbohrungen in der Gorlebener Rinne

Durch Anordnung der Bohrungen nach zunehmender Tiefe der Elster-Basis ergibt sich ein generalisierter idealisierter Schnitt vom Rand der Gorlebener Rinne in das Rinnentiefste (Abkürzungen: s. 3.1)

den tiefsten Positionen - die überhaupt vorhandenen Basispositionen relativ gleichmäßig abdecken. Das steht in Einklang mit der in Abb. 3 dargestellten Häufigkeitsverteilung der Werte für die Elster-Basis.

Besonders deutlich wird bei dieser Art der Darstellung, daß die Basispositionen der Einheiten über den Elster-Serien mit zunehmender Tiefe der Elster-Basis keineswegs generell und deutlich absinken. Ein Einfluß des Reliefs des Rinnenbodens auf die Basispositionen der Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien ist also keineswegs zu erkennen.

Bei den Positionen der Holstein-Basis (und der Saale-Basis) lassen sich jedoch zwei Extremniveaus unterscheiden: Bei zahlreichen Bohrungen ist die Holstein-Basis in dem für den Bereich neben dem Salzstock charakteristischen Niveau angetroffen worden, also in Tiefen bis zu 50 m unter NN, mindestens etwa 20 m unter NN. Das tiefe Extremniveau liegt bei etwa 100 m unter NN und darunter. Bei den betreffenden Bohrungen liegt die Position der Holstein- und Saale-Basis teilweise erheblich tiefer als es auf Grund der Basisposition und Mächtigkeit der Elster-Serien erwartet werden kann.

In auffälliger Weise liegt bei einigen Bohrungen mit sehr tiefen Positionen der Elster-Basis die Holstein-Basis noch unterhalb des genannten tiefen Niveaus. Anders als bei den übrigen Teufenbereichen der Elster-Basis fehlen hier sogar Positionen der Holstein-Basis, die dem Niveau neben dem Salzstock entsprechen. Es handelt sich dabei um Bohrungen, in denen die Elster-Serien den Gipshut bzw. Gesteine des Salzstocks direkt überlagern. Nur bei diesen Bohrungen kann ein Zusammenhang zwischen dem Relief des Rinnenbodens und der Position der Holstein-Basis bestehen.

Zusammenfassend ist also auf Grund der Auswertung der Beziehungen zwischen den Mächtigkeiten einzelner Schichten in der Gorlebener und Gartower Rinne und den heutigen Positionen ihrer Basis sowie der Beziehung dieser Größen zum Ton- und Schluffgehalt in den Elster-Serien festzustellen:

- Das Relief des Bodens der Gorlebener und Gartower Rinne hat sich nur auf die Mächtigkeit der Elster-Serien deutlich erkennbar ausgewirkt. Gemessen an den aus der ausgeprägten Korrelation zwischen Mächtigkeit und Basisposition der Elster-Serien ableitbaren Erwartungswerten sind jedoch bei zahlreichen Bohrungen die Mächtigkeiten der Elster-Serien deutlich

zu gering (s. Abb. 8 u. 14). Die Elster-Basis muß also nach-elsterzeitlich abgesenkt worden sein.

- Die heutige Positionen der Elster- und der Holstein-Basis über dem Salzstock weisen keine so deutliche Beziehung zum Tonanteil in den Elster-Serien auf, daß sich daraus ein indirekter Hinweis auf einen signifikanten Einfluß des Rinnenreliefs auf die Basispositionen beider Einheiten ergäbe.
- Zu Beginn der Ablagerung der Holstein-Serien waren die Gorlebener (und Gartower) Rinne bis auf ein weitgehend einheitliches Niveau - jedoch nicht vollständig - aufgefüllt. Die heutigen Positionen der Holstein-Basis sind also nicht maßgeblich durch das Relief des Rinnenbodens beeinflußt. Dasselbe gilt auch für die Mächtigkeit der Holstein-Serien.
- Die bereits gegen Ende der Elster-Eiszeit bis auf ein weitgehend einheitliches Niveau aufgefüllte Gorlebener und Gartower Rinne wird von den Ablagerungen der Saale-Eiszeit vollständig zusedimentiert. Gleichzeitige Subrosion führt lokal zur Absenkung der Elster-, Holstein- und Saale-Basis und zur Erhöhung der Mächtigkeit der Saale-Serien.
- Subrosion nach der Saale-Eiszeit ist mit den hier benutzten Mitteln nicht nachzuweisen (s. Abb. 7, 11 u. 14). Sie kann allenfalls lokal wirksam und/oder unbedeutend gewesen sein.

4.2.2 Setzung feinkörniger Gesteine des Lauenburger-Ton-Komplexes

Lockersedimente neigen bei mechanischer Belastung zur Setzung, also zur Verringerung ihrer Mächtigkeit. Diese Volumenverminderung ist mit der Abgabe von Porenwasser verbunden. Das Ausmaß der Setzung ist im wesentlichen von der Höhe der Belastung und der Zusammensetzung des Materials abhängig. Für die Beurteilung der Einflüsse unterschiedlicher Setzung auf die heutige Position der Holstein-Basis sind nur die seit Ablagerung der Holstein-Serien erfolgte höchste Belastung der Rinnensedimente und Belastungsunterschiede zwischen den Zonen neben und über dem Salzstock von Bedeutung.

Die für die Fragestellung entscheidende Belastung der elster- und holsteinzeitlichen Sedimente in der Gorlebener und Gartower Rinne erfolgte zweifellos durch Eismassen, die den Raum

Gorleben nach der Holstein-Warmzeit dreimal erreicht haben - zwei Eisvorstöße während des Drenthe-Stadiums, ein Vorstoß während des Warthe-Stadiums der Saale-Eiszeit. Angesichts der geringen Größe des fraglichen Gebietes im Vergleich zur Gesamtausdehnung der Eismassen darf unterstellt werden, daß die Belastung der Rinnensedimente im Raum Gorleben näherungsweise überall gleich groß gewesen ist.

Setzungsbedingte Niveauunterschiede der Holstein-Basis können daher nur auf Unterschiede in der Zusammensetzung der elstereiszeitlichen Ablagerungen in der Gorlebener und Gartower Rinne zurückgeführt werden, wobei dem Tonanteil besondere Bedeutung zukommt. Setzung tonhaltiger Folgen in den Tertiär- und Altquartär-Serien ist dagegen zu vernachlässigen, da sie bereits spätestens während der Elster-Eiszeit komprimiert worden sind.

Die Setzungsanfälligkeit tonreicher Abschnitte des Lauenburger-Ton-Komplexes ist auf Grund vielfacher ungünstiger Erfahrungen bei Bauwerksgründungen gut bekannt. Sie wird sowohl durch den hohen Anteil der Tonfraktion als auch durch den relativ hohen Anteil quellfähiger Tonminerale verursacht. Es ist daher zu erwarten, daß die Holstein-Basis im Bereich hoher Gesamtmächtigkeit von Tonserien in den elstereiszeitlichen Gesteinen setzungsbedingt tiefer liegt als in Bereichen mit geringeren Tonmächtigkeit.

Bestimmung der Tonmächtigkeit in den Elster-Serien

Zur Bestimmung der Tonmächtigkeit in den Gesteinen des Lauenburger-Ton-Komplexes wurde wie folgt vorgegangen: Zum einen wurde mit Hilfe der in den Schichtenverzeichnissen der Erkundungsbohrungen enthaltenen Gesteinsbeschreibungen und Teufenangaben die Gesamtmächtigkeit der als Ton angesprochenen Gesteinsabschnitte innerhalb der Elster-Serien berechnet. Dasselbe gilt für die Schluffserien sowie sandig-kiesige Folgen und elstereiszeitlichen Geschiebemergel. Aus den Ton- und Schluffmächtigkeiten wurde zusätzlich die Gesamtmächtigkeit der entsprechenden Gesteine berechnet.

Zum anderen wurde zur Überprüfung dieser Daten der Ton- und Schluffanteil der elstereiszeitlichen Serien aus graphischen Tiefenprofilen der prozentualen Ton- und Schluffanteile von Gesteinen abgeleitet. Sie sind von FIELITZ (1983) aus geophysikalischen Bohrlochmessungen von Erkundungsbohrungen berech-

net worden und liegen auch für einige der Bohrungen, in denen Holstein-Serien angetroffen worden sind, als kontinuierliche tiefenabhängige Kurven vor. Die Ton- und Schluffanteile an den Elster-Serien wurden durch überschlägige Peakflächen-Integration an diesen Kurven abgeschätzt. Der sich aus der Summe der Peakflächen für den elsterzeitlichen Bohrlochabschnitt ergebende rechnerische Gesamtanteil von Ton und Schluff an durchteuften Gesteinen wurde in Bohrmeter umgerechnet. Diese Berechnung wurde nur für Bohrungen durchgeführt, mit denen die Holstein- und Elster-Serien vollständig durchteuft worden sind.

Beide Vorgehensweisen sind mit unvermeidlichen Fehlern behaftet: So wurden bei der Ableitung der Gesamtmächtigkeit der verschiedenen Gesteinstypen aus den Schichtenverzeichnissen nur die namengebenden Hauptbestandteile zur Kennzeichnung eines Gesteinsabschnittes herangezogen. Es wird damit unterstellt, daß alle unterschiedenen Einheiten jeweils übereinstimmendes Setzungsverhalten aufweisen. Das ist wegen der - trotz übereinstimmender Bezeichnung - heterogenen Zusammensetzung der Gesteine jedoch zweifellos nicht der Fall. Demgegenüber tragen zu der aus den Tiefenprofilen abgeleiteten rechnerischen Ton- und Schluff-Mächtigkeit alle elstereiszeitlichen Gesteine bei und nicht nur mehr oder weniger eindeutig als Ton- und Schluffserien ansprechbare Gesteinsabschnitte. Auch in diesem Fall wird unterstellt, daß jeder Ton- und Schluffanteil - und zwar unabhängig von seiner Größe - zur Setzung beiträgt.

Unbeschadet dieser Mängel führen beide Vorgehensweisen zu durchaus ähnlichen Ergebnissen. Unter Berücksichtigung der deutlich besseren Datenlage, erscheint es daher gerechtfertigt, für die Beurteilung des Einflusses der Setzung auf die Lage der Holstein-Basis als "Referenzfall" die Tonmächtigkeit innerhalb der Elster-Serien aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen zu berechnen.

Einfluß der Setzung auf die Position der Holstein-Basis

In Abb. 15 ist die Lage der Basis der Holstein-Serien in Abhängigkeit von der Gesamtmächtigkeit der Tonfolgen in den elstereiszeitlichen Gesteinen dargestellt. Auch hier fallen die deutlichen Unterschiede zwischen den Rinnenbereichen neben und über dem Salzstock auf (s. auch 4.1 u. 4.2.1):

Bei den Bohrungen neben dem Salzstock besteht tatsächlich eine deutliche proportionale Beziehung zwischen der Tonmächtigkeit in den Elster-Serien und der Position der Holstein-Basis. Aus der Neigung der Regressionsgeraden und der Ausdehnung des 95%-Vertrauensbereiches folgt, daß die Setzung des Lauenburger-Ton-Komplexes zu einer Absenkung der Holstein-Basis von maximal rund 20 m führen kann.

Bemerkenswerterweise fügen sich die Punkte für die Bohrungen mit Altquartär-Serien sowie einige andere Bohrungen über dem Salzstock näherungsweise in diesen Trend ein. Bei den übrigen Bohrungen über dem Salzstock fällt dagegen trotz annähernd übereinstimmender Tonmächtigkeiten die große Streuung der Werte für die Holstein-Basis auf.

Auch unter Verwendung der aus Tiefenprofilen abgeleiteten theoretischen Tonmächtigkeiten (s.o.) ergibt sich - abgesehen von der geringen Zahl der Datenpunkte - praktisch dasselbe Bild (s. Abb. 15).

Ein Zusammenhang zwischen der Tonmächtigkeit in den unterlagernden elstereiszeitlichen Gesteinen und der heutigen Position der Holstein-Basis ist über dem Salzstock also nicht zu erkennen. Da Setzung jedoch nicht auf den Bereich neben dem Salzstock beschränkt geblieben sein kann, muß der ursprünglich vorhandene Einfluß der Setzung auf die Holstein-Position nachträglich verloren gegangen sein.

Die deutliche Abhängigkeit der Lage der Holstein-Basis von der Mächtigkeit des Tons in den Elster-Serien neben dem Salzstock kann benutzt werden, um das Ausmaß der Tonsetzung quantitativ zu berücksichtigen. Der vertikale Abstand der Datenpunkte für die heutige Lage der Basis von der Regressionsgeraden für die Bohrungen außerhalb des Salzstocks entspricht nämlich der "setzungskorrigierten" Absenkung der Holstein-Basis.

Für Abb. 16 sind die Daten so umgerechnet worden, daß das der Regressionsgeraden in Abb. 15 entsprechende "setzungsbereinigte" Ausgangsniveau der Holstein-Basis als horizontale Linie erscheint. Der vertikale Abstand zwischen dieser Geraden und den Datenpunkten der heutigen Holstein-Basis gibt das **rechnerische** Ausmaß der subrosionsbedingten Absenkung (negative Werte) bzw. der Aufwärtsbewegung (positive Werte) der Holstein-Basis unter Berücksichtigung der Tonsetzung an. Mit dem Begriff "Aufwärtsbewegung" werden hier lediglich positive Rechenwerte bezeichnet. Sie bedeuten nicht, daß bei der entspre

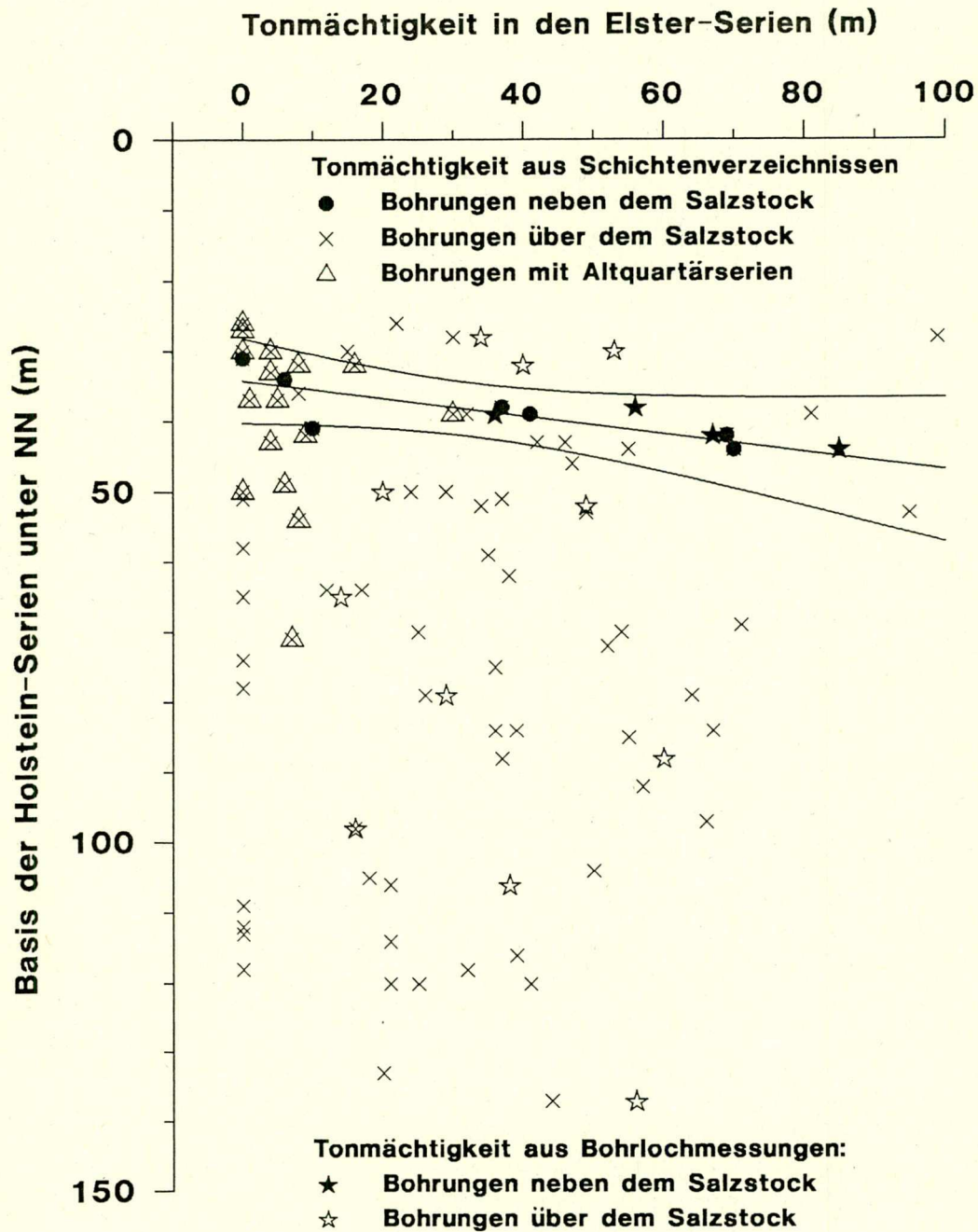


Abb. 15 Abhängigkeit der Basisposition der Holstein-Serien von der Gesamtmächtigkeit von Tonfolgen in den Elster-Serien (Lauenburger-Ton-Komplex)

mit der Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensintervall für die Bohrungen neben dem Salzstock; Tonmächtigkeit aus Bohrlochmessungen abgeleitet aus Daten bei FIELITZ (1983), Erläuterung dazu s. Text

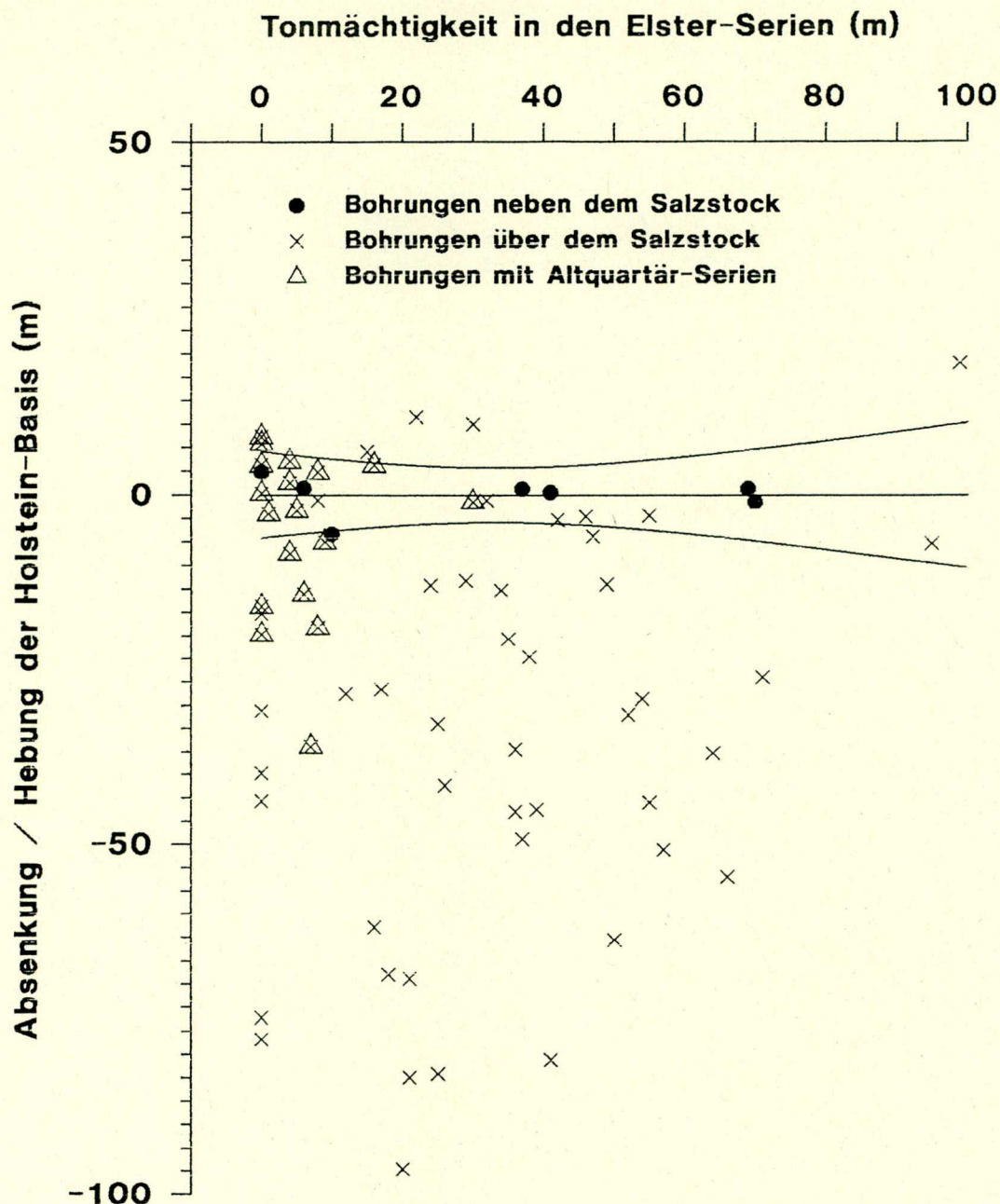


Abb. 16 Beziehung zwischen den setzungskorrigierten rechnerischen Absenkungs- bzw. Hebungsbeträgen der Holstein-Basis und der Gesamtmächtigkeit von Tonfolgen in den Elster-Serien (Lauenburger-Ton-Komplex)

mit der Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensintervall für die Bohrungen neben dem Salzstock

chenden Bohrung tatsächlich eine Aufwärtsbewegung stattgefunden hat.

Bemerkenswert ist die geringe Anzahl von Datenpunkten oberhalb der Horizontalen. Sie stützt nämlich die Einschätzung, daß nicht erkannte faltenartige Lagerungsstörungen durch Eisstauchung keine besondere Bedeutung für die heutige Position der Holstein-Basis haben (s. 4.2.3). Bohrungen mit erkennbaren Stauchungserscheinungen sind für die Abb. 15 und 16 nicht herangezogen worden.

4.2.3 Eisstauchung

Aus mechanischen Gründen ist glazialtektonische Verformung von Lockersedimenten durch Eisstauchung oder Verschuppung ein vorwärts-aufwärts gerichteter Vorgang (KÖSTER 1957, 1958 a, 1958 b): Die vertikale Kompensation des horizontalen Zusammenschubs von Lockergestein durch vorrückendes Eis erfolgt ausschließlich nach oben. Dabei können - wie bei einer auf dem Tisch zusammengeschobenen Tischdecke - klein- und großdimensionale Falten entstehen, innerhalb derer sich die Gesteine noch im Zusammenhang mit ihrer ursprünglichen Umgebung, insbesondere ihrer Unterlage, befinden. Sogenannte Schuppen entstehen dagegen, wenn Gesteinsschollen vom Eis über mehr oder weniger große Entfernungen transportiert werden und dabei den Kontakt zu ihrer ursprünglichen Umgebung verlieren.

Beide eistektonischen Phänomene treten im Raum Gorleben auf und sind am Hühbeck in Oberflächenaufschlüssen gut zu beobachten (SCHNEIDER 1981, DUPHORN 1983, s. auch 3.2.3.6): Saaleeiszeitliche Schichten sind durch Eisschub relativ kleindimensional verfaltet. Als Zeugen großmaßstäblicher Verformung sind in den Saale-Serien Schuppen von älterem Material anzutreffen, das z.T. im tieferen Untergrund unter den Schuppen nicht vorhanden ist. Es muß also einen mehr oder weniger weiten Transport durch das Eis hinter sich haben.

In Bohrungen sind faltenartige Lagerungsstörungen dagegen nur ausnahmsweise eindeutig zu erkennen, da der normale Schichtverband nicht aufgelöst ist. Hinweis auf die Existenz von Falten können - nur bei hoher Bohrdichte erkennbare - engräumige Niveauunterschiede und Mächtigkeitsschwankungen einer bestimmten Schicht sein. Da dieses allgemeine Bild jedoch auch andere Ursachen haben kann, z.B. Subrosion, reichen die genannten Be-

funde allein nicht zur Identifizierung von eistektonischen Verformungen aus.

Eistektonisch entstandene Gesteinsschuppen lassen sich in Bohrungen dann gut erkennen, wenn sie sich von ihrer altersmäßig fremden Umgebung auch petrographisch auffällig unterscheiden. Bei den im Raum Gorleben in Bohrungen nachgewiesenen Stauchschuppen handelt es sich dementsprechend überwiegend um Tonserien der Holstein-Warmzeit, die von sandig-kiesigen Serien der Saale-Eiszeit unter- und überlagert werden und auf Grund dieser Korngrößenunterschiede leicht identifiziert werden können. Nur ausnahmsweise in Bohrungen zu erkennen sind dagegen solche Schuppen, die aus petrographisch ähnlichem oder gleichem Material bestehen, wie ihre unmittelbare Unterlage. Das ist bei den Bohrungen der Fall, wo Schuppen aus Holstein-Ton direkt auf autochthonen Holstein-Serien (s. 3.2.3.6) lagern. Wahrscheinlich gibt es weitere unerkannte Schuppen dieses Typs.

Die Schuppen aus Holstein-Material sind Beleg dafür, daß das vorrückende Saale-Eis Teile der zuvor abgelagerten Holstein-Serien abgehobelt hat. Demnach geben die im Raum Gorleben erbohrten Mächtigkeiten nicht zwangsläufig die ursprünglichen Mächtigkeitsverhältnisse wider. Zudem muß mit faltenartigen Verbiegungen der Holstein-Serien auch dort gerechnet werden, wo sie bisher nicht eindeutig erkannt worden sind.

Aus den genannten mechanischen Gründen kann Holstein-Material durch eistektonische Vorgänge jedoch weder in Form von Schuppen in unterlagernde ältere Einheiten eindringen noch in Gestalt von Schuppen oder Falten unter das ursprüngliche Ablagerungsniveau der Holstein-Serien gelangen. Der Nachweis eistektonischer Lagerungsstörungen im Raum Gorleben steht daher auch nicht der Ableitung von Subrosionsraten aus den Niveauunterschieden der Holstein-Serien neben und über dem Salzstock entgegen, zumal das ursprüngliche Ablagerungsniveau der Holstein-Serien relativ genau bekannt ist (s. 3.2.3.3 u. 4.1). Die Identifizierung salzaufstiegsbedingter Hebung der Holstein-Basis und die Berechnung von Aufstiegsraten wird durch den Nachweis von eistektonischen Falten jedoch in Frage gestellt bzw. unsinnig.

Bei einigen Bohrungen über dem Salzstock liegt die Basis der Holstein-Schuppen heute deutlich unter dem zu erwartenden Niveau von 30-50 m unter NN, und zwar besonders tief dort, wo auch die Basis der autochthonen Holstein-Serien tief liegt (s. Abb. 17). Dieser Befund ist am einfachsten und sinnvollsten

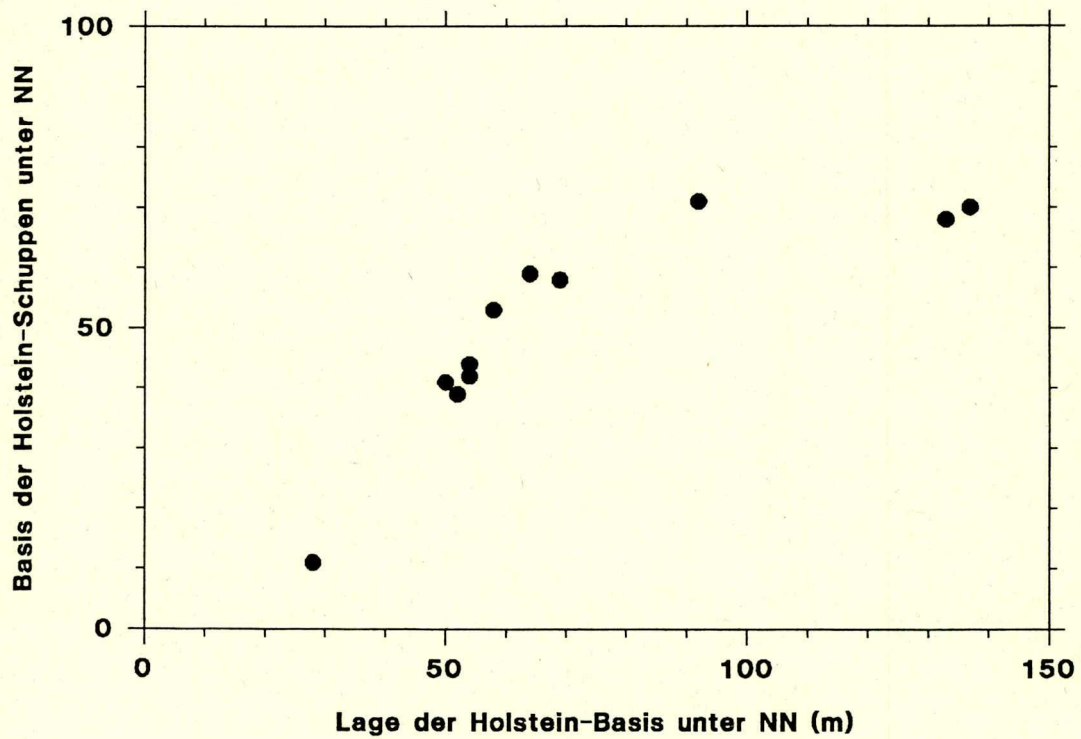


Abb. 17 Beziehung zwischen der Basis von Schuppen aus Holstein-Serien und der Basisposition autochthoner Holstein-Vorkommen in Bohrungen über dem Salzstock

durch gemeinsame subrosionsbedingte Absenkung von Holstein-Basis und Holstein-Schuppen zu erklären. Da gemeinsame Tiefpositionen von Holstein-Basis und -schuppen mit Tieflagen der Basis saalezeitlicher Gesteine zusammenfallen können, muß die Hauptphase der subrosiven Abwärtsbewegung in die Saale-Eiszeit gelegt werden.

4.3. Statistische Auswertung der Niveau- und Mächtigkeitsdaten

4.3.1 Modellannahmen

Nach der umfassenden Beurteilung möglicher Faktoren, die außer Subrosion zu Lagerungsveränderungen führen können (s. 4.2.) ist die heutige Position der Holstein-, Saale- und Weichsel-Serien weder durch das Relief der Gorlebener (und Gartower) Rinne noch durch Setzung der Tonserien im unterlagernden Lauenburger-Ton-Komplex oder durch eistektonische Prozesse maßgeblich beeinflußt worden. Sie kommen daher als alleinige Erklärung für die Lagerungsverhältnisse der Holstein- und Saale-Serien über dem Salzstock nicht in Frage.

Die aus den Modellvorstellungen in 4.2.1.1 abgeleiteten Erwartungshaltungen gegenüber den mathematischen Beziehungen zwischen diesen Größen stellen auch die Grundlage der statischen Datenauswertung dar. Sie lassen sich nämlich in folgende Hypothesen über die statistischen Beziehungen zwischen den heutigen Positionen und Mächtigkeiten der Holstein-, Saale- und/oder Weichsel-Serien und dem Tonanteil der Elster-Serien in den Bohrungen über dem Salzstock umsetzen.

Wenn die heutige Positionen der Holstein-Serien (und der jüngeren Einheiten) maßgeblich durch Subrosion beeinflußt sind, muß sich das in folgenden Zusammenhängen bemerkbar machen:

- Hohe Korrelation zwischen Basisposition und Mächtigkeit der Elster-Serien als unvermeidliches Relikt der Entstehungsgeschichte der Gorlebener und Gartower Rinne (s. 4.2.1.1),
- hohe Korrelation zwischen den Positionen der Schichtgrenzen derjenigen Gesteinseinheiten, die gemeinsam von Subrosion betroffen worden sind,
- niedrige Korrelation zwischen Basisposition sowie Mächtigkeit der Elster-Serien und der Position der Holstein-Basis (bzw. der Basis der darüber folgenden Einheiten),

- niedrige Korrelation zwischen den Positionen der Holstein-Basis (und der darüber folgenden Einheiten) und dem Tonanteil an den Elster-Serien,
- möglicherweise hohe Korrelation zwischen der Mächtigkeit einer der Gesteinseinheiten über den Elster-Serien und deren Basisposition als Hinweis auf Subrosion während der Entstehung dieser Einheit.

Wenn die heutigen Positionen der Holstein-Serien (und der jüngeren Einheiten) **nicht** maßgeblich durch Subrosion beeinflusst sind, sondern lediglich die Sedimentationsgeschichte in der Gorlebener Rinne widerspiegeln muß sich das in folgenden Zusammenhängen äußern:

- Hohe Korrelation zwischen den Basispositionen und Mächtigkeiten der Holstein-Serien und aller anderen Schichten mit gemeinsamer Ablagerungsgeschichte,
- hohe Korrelation zwischen den Basispositionen und Mächtigkeiten aller Schichten und dem Tonanteil in den Elster-Serien.

Wenn die Entstehung der verschiedenen Einheiten keine gemeinsame Entstehungsgeschichte aufweisen, können bzw. müssen zwar hohe Korrelationen zwischen der Basisposition und der Mächtigkeit der einzelnen Einheiten auftreten, nicht jedoch zwischen den Basispositionen und Mächtigkeiten verschiedener Einheiten.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der statistischen Überprüfung dieser Hypothesen dargestellt. Dabei werden folgende Parameter gemeinsam berücksichtigt:

- Basisposition und Mächtigkeit der Elster-Serien,
- Basisposition und Mächtigkeit der Holstein-Serien,
- Basisposition und Mächtigkeit der Saale-Serien,
- Basisposition und Mächtigkeit der Weichsel-Serien,
- Ton- und Schluffanteile sowie Anteile von Sand- und Kiesfolgen an den Elster-Serien.

Zur Auswertung herangezogen wurden diejenigen Bohrungen, in denen die Elster- und Holstein-Serien durchbohrt worden sind und zu denen die Schichtenverzeichnisse keine Hinweise auf eistektonische Beanspruchung enthalten.

4.3.2 Ergebnisse der statistischen Auswertung

4.3.2.1 Korrelationskoeffizienten

In Tab. 2 sind die Pearson-Korrelationskoeffizienten für die ausgewerteten Basispositionen und Mächtigkeiten der Gesteine in der Gorlebener Rinne neben und über dem Salzstock dargestellt. Die für alle Bohrungen gemeinsam berechneten Koeffizienten sind nahezu mit denjenigen für die Bohrungen über dem Salzstock und daher hier nicht dargestellt. Die Aussagekraft der Koeffizienten für die Bohrungen neben dem Salzstock darf wegen der geringen Stichprobenzahl nicht überbewertet werden. Koeffizienten >0.5 sind in Tab. 2 durch Fettdruck hervorgehoben. Die Werte sind wie folgt zu interpretieren:

- Neben und über dem Salzstock kommt wie erwartet in der hohen Korrelation zwischen der Position der Elster-Basis und der Mächtigkeit der Elster-Serien der entstehungsbedingte Zusammenhang zwischen Tiefe und Mächtigkeit der Sedimentfüllung in der Gorlebener und Gartower Rinne zum Ausdruck (s. 3.2.2.2 u. 4.2.1.1). Neben dem Salzstock zeigt die Korrelation zwischen Elster-Basis und Holstein-Mächtigkeit an, daß diese Bedingungen möglicherweise bis in Holstein-Warmzeit erhalten geblieben sind. Nach Abb. 12 und 13 sind die absoluten Auswirkungen auf die Position der Holstein-Basis unbedeutend.
- Hohe Mächtigkeiten der Elster-Serien sind über dem Salzstock mit hohen Anteilen feinkörniger und grober Sedimente korreliert. Neben dem Salzstock ist der Ton- und Schluffanteil an den Elster-Serien dagegen nicht von deren Basisposition abhängig.
- Neben dem Salzstock wird die Position der Holstein-Basis lediglich von der Mächtigkeit der Tonfolgen in den Elster-Serien beeinflusst. Als Ursache kommt nur Setzung in Frage. Deren Einfluß auf die heutige Position der Holstein-Basis kann bei der Berechnung von Subrosionsraten berücksichtigt werden (s. 4.2.2).
- Über dem Salzstock deuten hohe bis mäßig hohe Korrelationskoeffizienten zwischen den Positionen der Elster-, Holstein- und Saale-Basis und das Fehlen einer deutlichen Korrelation mit der Holstein-Mächtigkeit auf Subrosionseinfluß hin.
- Hohe Korrelation zwischen Basisposition und Mächtigkeit der Saale-Serien deutet darauf hin, daß die Hauptphase der Subro

	QENN	MQE	QHOLNN	MQHOL	QSNN	MQS
QENN	1.000					
MQE	0.993	1.000				
QHOLNN	0.218	0.102	1.000			
MQHOL	0.752	0.693	0.608	1.000		
QSNN	-0.708	-0.750	0.233	-0.630	1.000	
MQS	-0.591	-0.609	0.061	-0.718	0.939	1.000
QWNN	0.463	0.467	0.041	0.713	-0.834	-0.973
MQW	0.779	0.786	0.071	0.830	-0.947	-0.927
QETU	-0.003	-0.068	0.535	0.263	0.202	0.206
QESG	0.922	0.927	0.111	0.617	-0.648	-0.568
	QWNN	MQW	QETU	QESG		
QWNN	1.000				6 Bohrungen	
MQW	0.846	1.000			neben dem	
QETU	-0.220	-0.038	1.000		Salzstock	
QESG	0.477	0.676	-0.358	1.000		
	QENN	MQE	QHOLNN	MQHOL	QSNN	MQS
QENN	1.000					
MQE	0.882	1.000				
QHOLNN	0.597	0.149	1.000			
MQHOL	0.072	0.085	0.007	1.000		
QSNN	0.571	0.134	0.971	-0.171	1.000	
MQS	0.583	0.158	0.956	-0.185	0.983	1.000
QWNN	-0.201	-0.169	-0.136	0.112	-0.134	-0.314
MQW	-0.317	-0.253	-0.236	0.127	-0.232	-0.383
QETU	0.652	0.666	0.234	0.257	0.171	0.146
QESG	0.728	0.874	0.039	0.090	0.019	0.050
	QWNN	MQW	QETU	QESG		
QWNN	1.000				55 Bohrungen	
MQW	0.869	1.000			über dem	
QETU	0.090	-0.132	1.000		Salzstock	
QESG	-0.181	-0.201	0.415	1.000		

Tab. 2 Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Basispositionen und Mächtigkeiten der Schichten in der Gorlebener (und Gartower) Rinne sowie die Ton- und Schluff- bzw. Sand- und Kiesgehalte (Gesamtmächtigkeiten) in den Elster-Serien getrennt nach Bohrungen über und neben dem Salzstock

Abkürzungen s. 3.1; nur vollständige Datensätze;
Anmerkung: Die sich bei gemeinsamer Auswertung aller Bohrungen ergebenden Koeffizienten sind nahezu identisch mit denen für die 55 Fälle über dem Salzstock und deshalb hier nicht dargestellt

sion in der Saale-Eiszeit gelegen haben muß.

- Die hohe Korrelation zwischen der Position der Weichsel-Basis und der Mächtigkeit der Weichsel-Serien ohne Korrelation mit einer der anderen Größen zeigt, daß die Entstehung der Weichsel-Serien keinen erkennbaren Bezug zur Rinnenentstehung oder anderen Vorgängen im Salzstockbereich aufweist. Damit ist auch kein Subrosionseinfluß zu erkennen.

4.3.2.2 Faktorenanalyse

Vereinfacht ausgedrückt werden bei der Faktorenanalyse aus Korrelations- oder Kovarianz-Matrizes für verschiedene Parameter neue Größen berechnet, mit denen die Ausgangsgrößen summarisch beschrieben werden. Diese neuen Parameter werden als Faktoren bezeichnet. Die Ausgangsgrößen tragen als sogenannte Komponenten zu den Werten der Faktoren bei. Die Bedeutung verschiedener Ausgangsparameter für die Faktoren kommt in sogenannten Komponentenladungen (Korrelationskoeffizienten bzw. Kovarianzen) zum Ausdruck. Die Faktorenanalyse liefert also für die identifizierten Faktoren Werte, die ein übergreifendes Maß für die Bedeutung des jeweiligen Faktors zur Charakterisierung der untersuchten Datensätze sind.

Im vorliegenden Fall darf von der Faktorenanalyse erwartet werden, daß diejenigen Parameter, die nach 4.2.1 und 4.3.1 kennzeichnend für den Einfluß der Subrosion auf die Mächtigkeits- und Lagerungsverhältnisse im Salzstockbereich sind, zu einem "Subrosionsfaktor" zusammengefaßt werden. Entsprechendes gilt für die von anderen Ursachen, etwa die Tiefe der Rinnenbasis, bestimmten Parameter, die sich in einem "Sedimentationsfaktor" äußern sollten.

Die Berechnung und Auswertung der Faktoren für die Basispositionen und Mächtigkeiten der Rinnenfüllung der Gorlebener Rinne wurde unter Berücksichtigung aller Bohrungen mit vollständigem Profil der Holstein- und Elster-Serien ohne erkennbare Stauchung für folgende Parameter durchgeführt:

Basisposition und Mächtigkeit der Elster-Serien, Basisposition und Mächtigkeit der Holstein-Serien, Basisposition und Mächtigkeit der Saale-Serien, Ton- und Schluffanteil sowie Grobkornanteil an den Elster-Serien. Die Weichsel-Serien wurden nicht berücksichtigt, da sie durch Subrosion nicht betroffen

sind (s. 4.2.1.2 u. 4.3.2.1).

In zwei Rechengängen sind Berechnungen mit folgenden Einstellungen des Programmes SYSTAT durchgeführt worden, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll: Kovarianzmatrix der genannten Parameter, Varimax-Rotation der Komponenten, kleinster Eigenwert Null. Die Verwendung einer Korrelationsmatrix und anderer Rotationsverfahren (hier nicht dargestellt) führt zu übereinstimmenden Ergebnissen.

Für den ersten Rechengang wurde die Zahl der zu berechnenden Faktoren nicht vorgegeben. Es ergaben sich 11 Faktoren. In Tab. 3 sind nur die Ergebnisse für 5 Faktoren (51 bis 55) zusammengefaßt. Die übrigen Faktoren weisen sehr geringe Ladungen auf und sind deswegen nicht dargestellt. Hohe Zahlenwerte (Kovarianzen) kennzeichnen die Parameter mit bestimmender Bedeutung für den jeweiligen Faktor.

Die in Tab. 3 gegebene genetische Deutung für einige der Faktoren ist aus den Modellvorstellungen über die möglichen Zusammenhänge zwischen Sedimentmächtigkeiten und Lagerungsverhältnissen in 4.2.1.1 abgeleitet. Die Faktoren 51 und 53 stehen zweifelsfrei mit den Ablagerungsbedingungen in der Gorlebener und Gartower Rinne während der Elster-Eiszeit in Zusammenhang.

Die Deutung des Faktors 52 als "Subrosionsfaktor" ergibt sich eindeutig aus den hohen Ladungen für die heutigen Positionen der Elster-, Holstein- und Saale-Basis bei gleichzeitig niedrigen Ladungen für die Mächtigkeiten. Die hohe Ladung für die Mächtigkeit der Saale-Serien bestätigt, daß die Subrosion im wesentlichen während der Saale-Eiszeit stattgefunden hat. Es ist zu betonen, daß dieser Faktor praktisch unabhängig von den Korngrößenverhältnissen in den Elster-Serien ist.

In den Diagramm-Matrizes der Abb. 18 und 19 wird an den Korrelationen zwischen vier der in Tab. 3 vezeichneten Faktoren und Ausgangsparametern bildhaft deutlich, welche Parameter maßgeblich in die verschiedenen Faktoren eingeflossen sind.

In Abb. 18 und 20 sind auch die Basisposition und die Mächtigkeit der Weichsel-Serien aufgenommen worden. Die genaue Deutung des Faktors 54 setzte weitergehende Untersuchungen voraus. Darauf wird hier verzichtet, da sie für die Behandlung des Subrosionsproblems offenkundig ohne Bedeutung sind. Zumindest für Faktor 54 scheint allerdings Klärungsbedarf zu bestehen. Er weist nämlich eine deutliche Beziehung zu Basisposi-

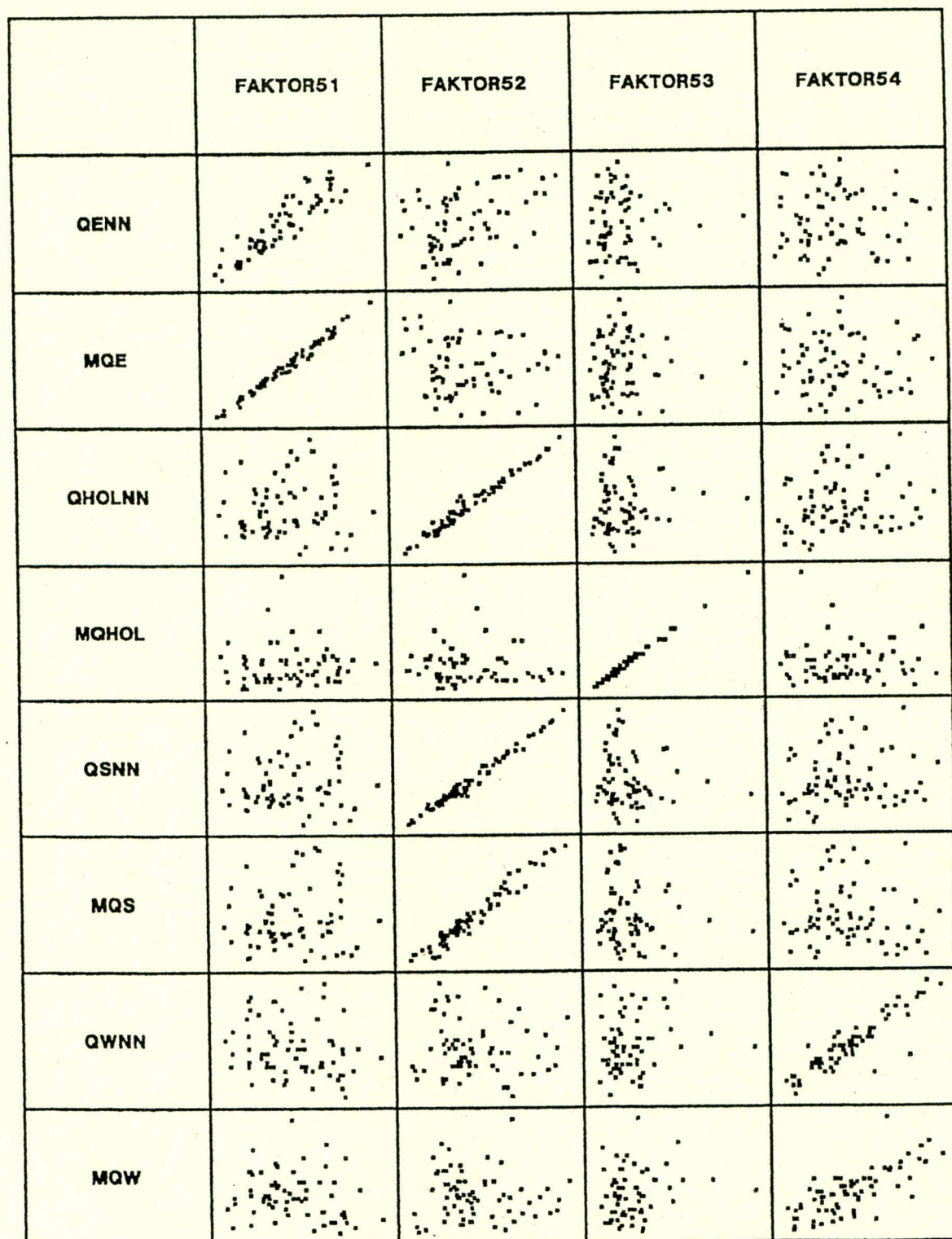


Abb. 18 Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen den vier wichtigsten Faktoren des ersten Rechenganges der Faktorenanalyse und den Ausgangsparametern (Erläuterungen s. Text; Abkürzungen s. 3.1)

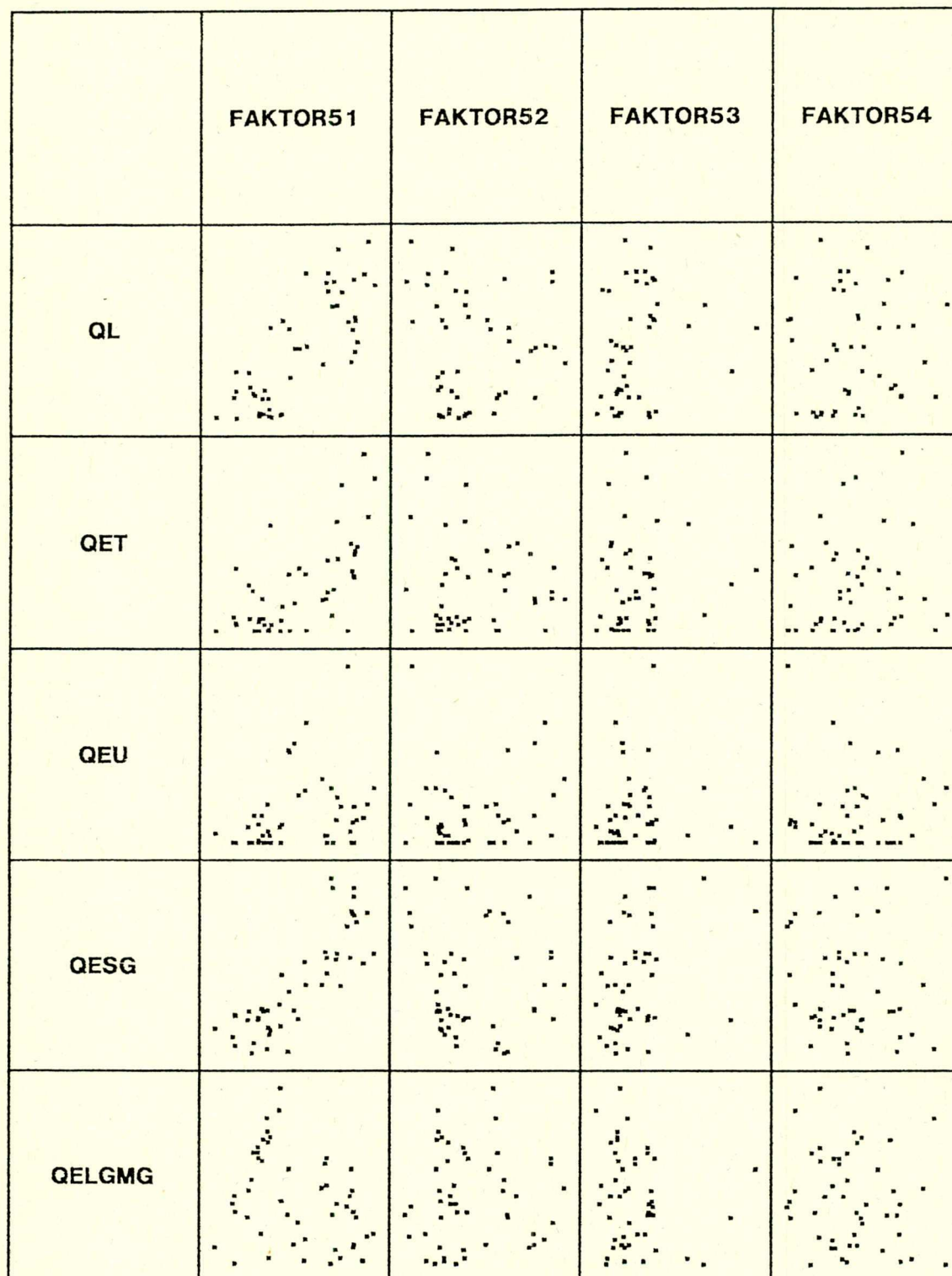


Abb. 19 Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen den vier wichtigsten Faktoren des ersten Rechenganges der Faktorenanalyse und wichtigen petrographischen Parametern der Elster-Serien (Erläuterungen s. Text; Abkürzungen s. 3.1)

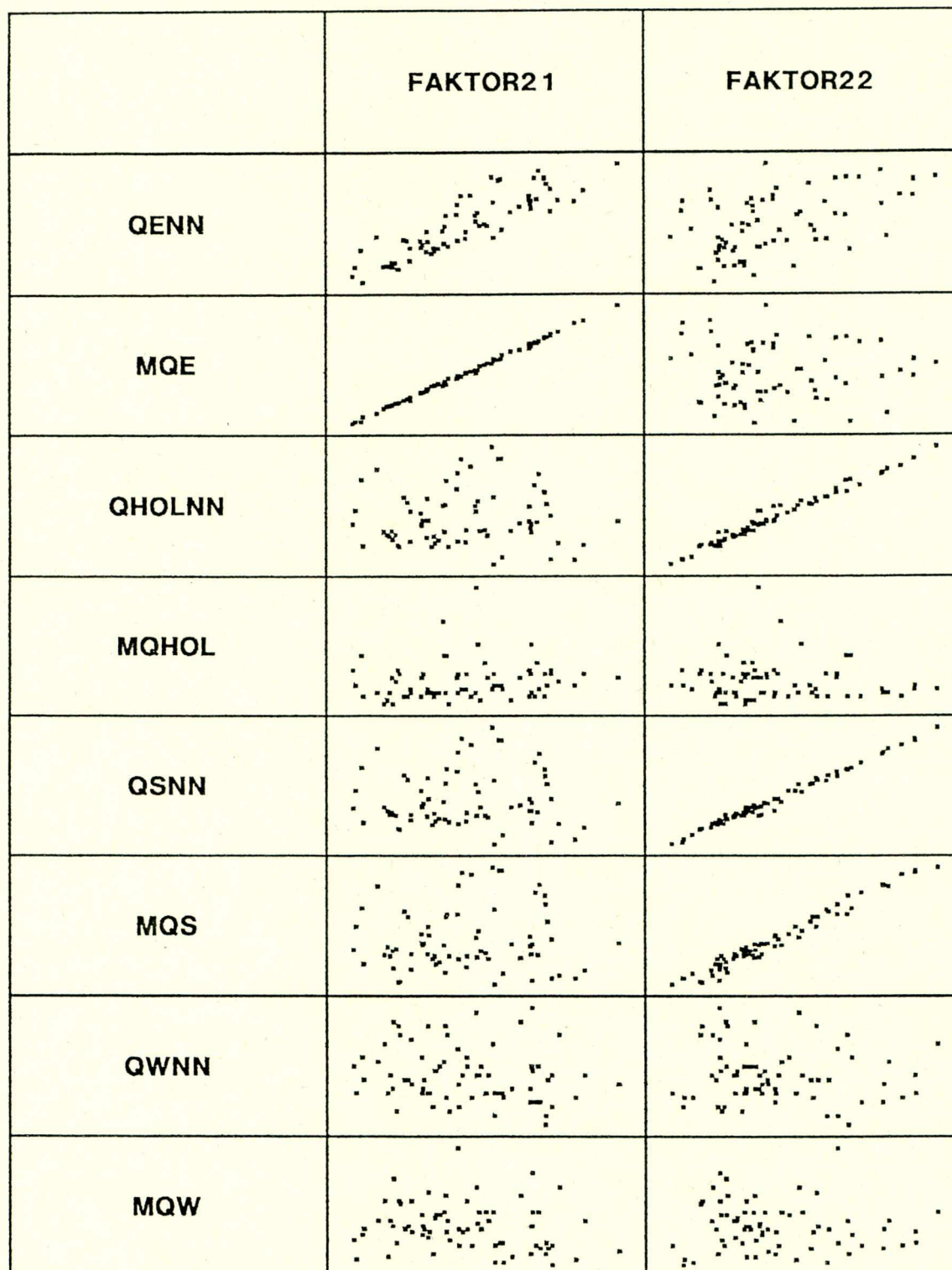


Abb. 20 Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen "Sedimentationsfaktor" (Faktor 21) bzw. "Subrosionsfaktor" (Faktor 22) des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse und den Ausgangsparametern (Erläuterungen s. Text; Abkürzungen s. 3.1)

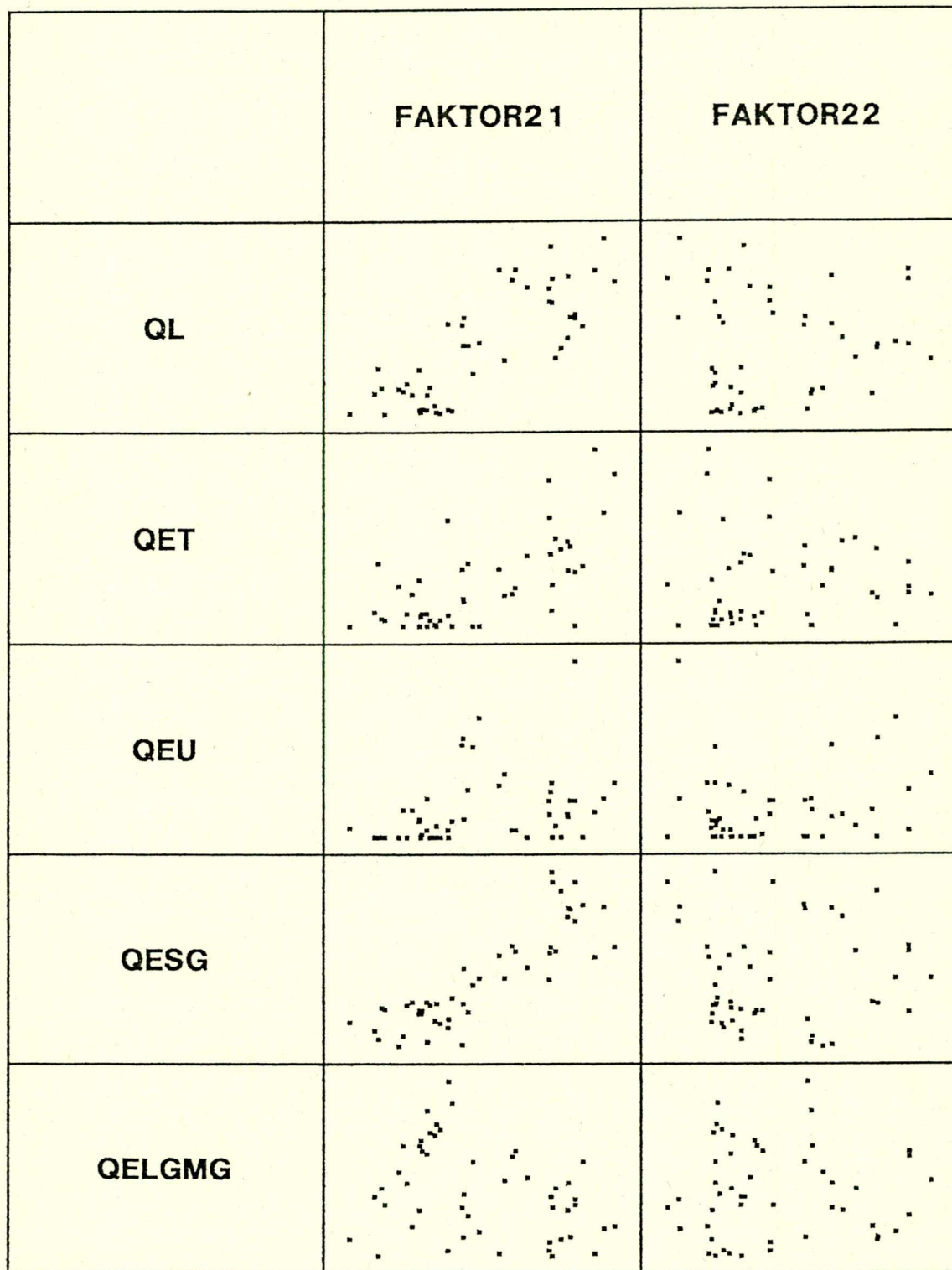


Abb. 21 Diagramm-Matrix zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen "Sedimentationsfaktor" (Faktor 21) bzw. "Subrosionsfaktor" (Faktor 22) des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse und wichtigen petrographischen Parametern der Elster-Serien (Erläuterungen s. Text; Abkürzungen s. 3.1)

tion und Mächtigkeit der Weichsel-Serien auf (s. Abb. 18), obwohl beide Parameter nicht direkt in die Faktorenanalyse eingeflossen sind (s.o.).

Für den zweiten Rechengang wurde die Zahl der zu berechnenden Faktoren von vornherein auf zwei (Faktor 21 und 22) begrenzt, um eine stärkere Polarisierung zu erreichen. Die Ergebnisse (s. Tab. 4, Abb. 20 u. 21) stützen die Ergebnisse des ersten Rechenganges. Faktor 22 ist als "Subrosionsfaktor" zu verstehen.

Die Ergebnisse der Faktorenanalyse bestätigen die bereits in 4.2 und bei der Behandlung der Korrelationsrechnungen beschriebenen Zusammenhänge. Die geringe Bedeutung der Korngröße der Elster-Serien für die Charakterisierung der beiden "Subrosionsfaktoren" belegt, daß für anomal tiefe Positionen der Holstein-Basis (und der Elster- und Saale-Basis) über dem Salzstock Subrosion verantwortlich ist.

Die kumulative Häufigkeitsverteilung für den "Subrosionsfaktor" (Faktor 22 in Tab. 4) in Abb. 22 weist aus, daß sich die Bohrungen in zwei Gruppen aufteilen lassen. Faktorenwerte größer Null kennzeichnen diejenigen Bohrungen, bei denen Subrosion stattgefunden hat. Sie sind in Tab. 5 zusammengestellt. Wie erwartet gehören alle Bohrungen neben dem Salzstock in die Gruppe mit Faktorenwerten unter Null.

Abb. 24 gibt die Ergebnisse des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse als Karte wieder. Die Faktoren 21 und 22 sind durch eigene Symbole gekennzeichnet, deren Größe ein Maß für den Wert des jeweiligen Faktors bei einer Bohrung ist. Bohrungen bei denen beide Faktoren kleiner als Null sind, wurden dabei nicht berücksichtigt. Bei den meisten Bohrungen ist entweder der "Sedimentationsfaktor" oder der "Subrosionsfaktor" erhöht, bei einigen wenigen Bohrungen auch beide Faktoren.

Besonders auffällig ist die Massierung von Bohrungen mit hohen Werten für den "Subrosionsfaktor" (Faktor 22) im Mittelteil der Abb. 24. In diese Gruppe gehören die Bohrungen 1150, 3030, 503, 3020, 2120, 840, 515, 860, 3130, 3140.

In Abb. 25 wird der "Subrosionsfaktor" (Faktor 22) in Beziehung gesetzt zu den Basispositionen der Elster-, Holstein- und Weichsel-Serien, die als Funktion der Mächtigkeit der Elster-Serien aufgetragen sind. Farbe und Größe der Symbole für die Datenpunkte geben das Vorzeichen bzw. die Größe der Werte für

	Faktor 51	Faktor 52	Faktor 53	Faktor 54	Faktor 55
QENN	45.716	30.700	18.546	8.953	4.309
MQE	43.668	2.439	16.169	8.847	1.582
QHOLNN	2.038	28.216	2.314	0.106	2.688
MQHOL	0.546	-0.670	0.573	-0.005	5.148
QSNN	1.592	29.071	1.547	0.289	-3.628
MQS	2.426	30.211	1.148	0.624	-6.481
QESG	35.352	-1.475	1.622	-7.356	3.564
QETU	9.018	2.737	26.439	0.162	3.506
Deutung	Sed.	Subros.	Sed.	? Sed.	?

Tab. 3 Ergebnisse der Faktorenanalyse: Komponentenladungen (Kovarianzen) der fünf wichtigsten Faktoren des ersten Rechenganges

	Faktor 21	Faktor 22
QENN	50.441	30.305
MQE	47.107	2.371
QHOLNN	3.299	27.889
MQHOL	1.201	-1.054
QSNN	2.028	29.214
MQS	2.429	30.539
QESG	33.146	-3.168
QETU	17.843	3.765
Deutung	Sedimentation	Subrosion

Tab. 4 Ergebnisse der Faktorenanalyse: Komponentenladungen (Kovarianzen) der beiden Faktoren des zweiten Rechenganges

Erläuterungen zu Tab. 3 und 4:

Alle Bohrungen neben und über dem Salzstock mit vollständigem Profil der Elster- und Holstein-Serien; nur Bohrungen ohne Hinweise auf Stauchung; 66 Datensätze (unvollständige Datensätze wurden nicht berücksichtigt); Abkürzungen s. 3.1

Deutung: wahrscheinliche bzw. (?) unklare Ursache für die Faktoren;
 Sed. / Sedimentation: Sedimentationsablauf in der Gorlebener und Gartower Rinne;
 Subros. / Subrosion: Subrosionseinfluß

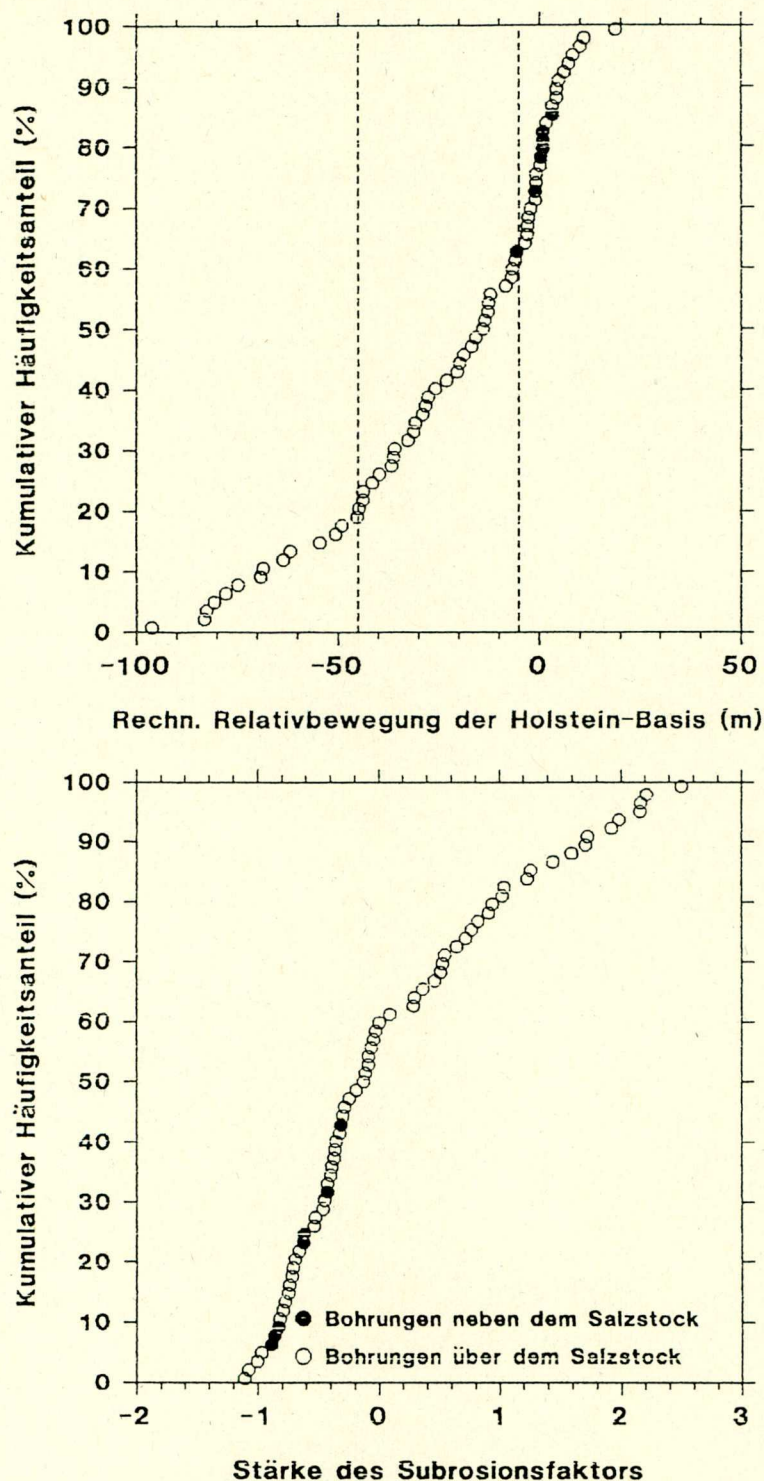


Abb. 23 Kumulative Häufigkeitsverteilung der setzungsbereinigten rechnerischen Werte für nachholsteinzeitliche Aufwärts- und Abwärtsbewegung für Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben (Erläuterungen s. Text)

Abb. 22 Kumulative Häufigkeitsverteilung des "Subrosionsfaktors" (Faktor 22 des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse) für Bohrungen neben und über dem Teilsalzstock Gorleben

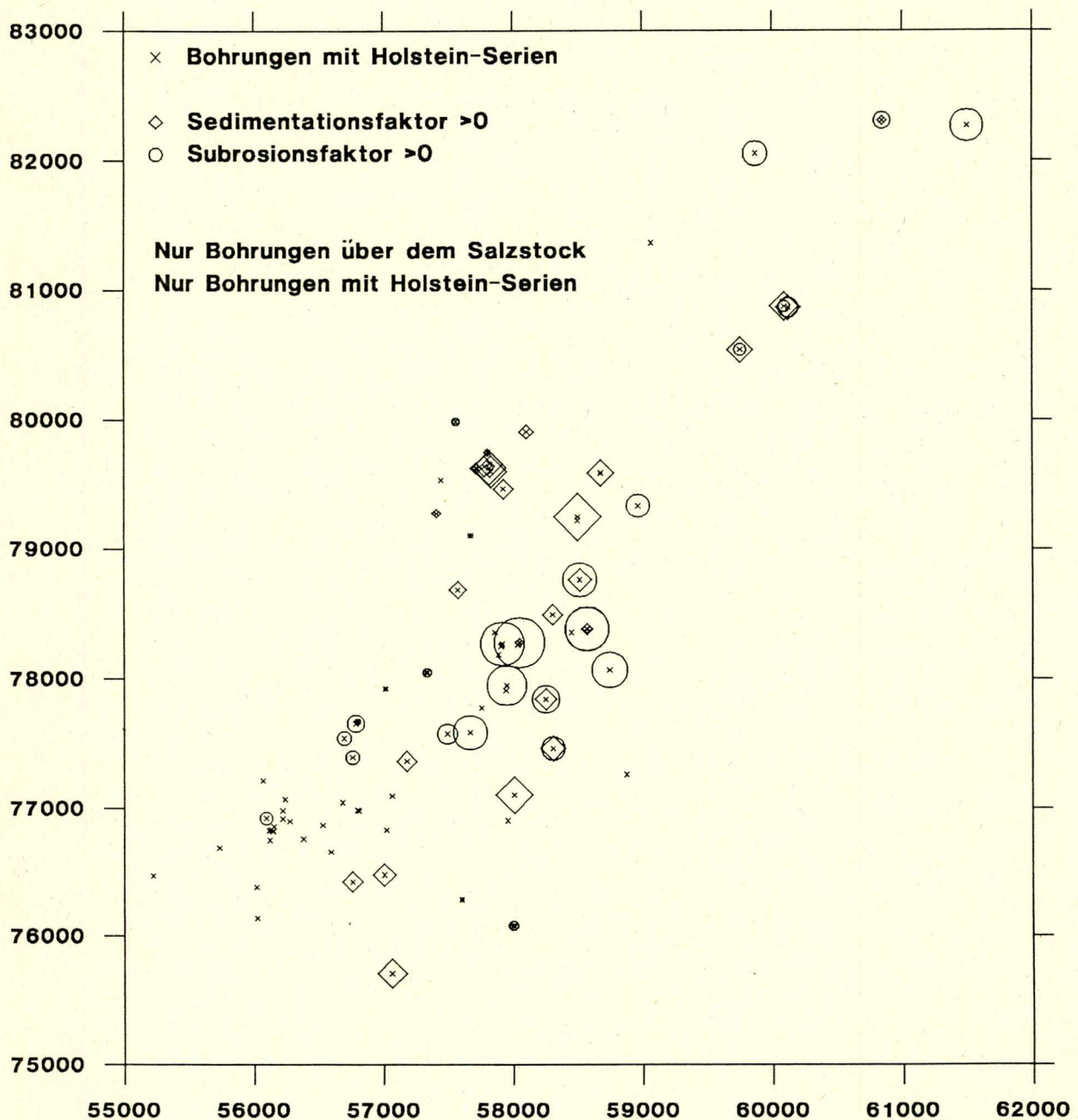


Abb. 24 Lageplan der Bohrungen mit hohen Werten für die Faktoren "Subrosion" und "Sedimentation" (Faktoren 21 und 22 des zweiten Rechenganges der Faktorenanalyse) im Bereich der Gorlebener Rinne über dem Salzstock (Erläuterungen s. Text; Kartenausschnitt von Abb. 1)

den "Subrosionsfaktor" wieder. Die Lage der Datenpunkte bestätigt generell das bereits aus 4.2.2 bekannte Bild. Zusätzlich wird jedoch deutlich, daß die anhand des "Subrosionsfaktors" unterscheidbaren beiden Probengruppen sowohl bei den Elster-Serien als auch bei den Holstein-Serien (und Saale-Serien) jeweils zwei von der Mächtigkeit der Elster-Serien unabhängige Niveaus bilden. Nur bei den Elster-Serien sind beide Niveaus mit der Mächtigkeit der Elster-Serien korreliert.

In Abb. 26 sind statt der heutigen Basispositionen der Elster- und Holstein-Serien deren Ausgangspositionen vor Subrosionsbeginn gegen die Mächtigkeit der Elster-Serien aufgetragen. Sie sind aus den heutigen Positionen und den rechnerischen setzungskorrigierten Absenkungsbeträgen für die Holstein-Basis berechnet worden (s. dazu 4.2.2). Die regelmäßige Anordnung der Datenpunkte für die Elster-Basis macht deutlich, daß sie um nahezu dieselben Beträge abgesenkt worden ist wie die Holstein-Basis. Auch dies ist ein Beleg für nachholsteinzeitliche Subrosion.

4.4 Berechnung von Subrosionsraten

In 4.2 und 4.3 wurde gezeigt, daß die heutige Position der Holstein-Serien über dem Salzstock bei zahlreichen Bohrungen durch Subrosion maßgeblich beeinflusst worden ist. Mögliche andere Ursachen für die unregelmäßigen Lagerungsverhältnisse der Holstein-Serien im Salzstockbereich können entweder ausgeschlossen werden (Relief des Rinnenbodens, Eisstauchung; s. 4.2.1 u. 4.2.3) oder quantifiziert werden (Setzung des unterlagernden Lauenburger-Ton-Komplexes; s. 4.2.2).

Zur Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten muß neben dem subrosionsbedingten Absenkungsbetrag der Holstein-Basis auch die Dauer des Subrosionsvorganges bekannt sein:

Aus den vorliegenden Daten geht zweifelsfrei hervor, daß die Subrosion bereits vor Beginn der Ablagerung der Niederterrasse der Weichsel-Eiszeit abgeschlossen war oder nur noch ein so geringes Ausmaß hatte, daß sie mit dem hier angewendeten Verfahren nicht nachgewiesen werden kann (s. 4.1 u. 4.2.1.1). Auch während des vorangehenden Eem-Interglazials dürfte Subrosion in größerem Ausmaß nicht stattgefunden haben, andernfalls sollten Reste eemzeitlicher Ablagerungen in Subrosionshohlformen überliefert worden sein. Das ist nicht der Fall.

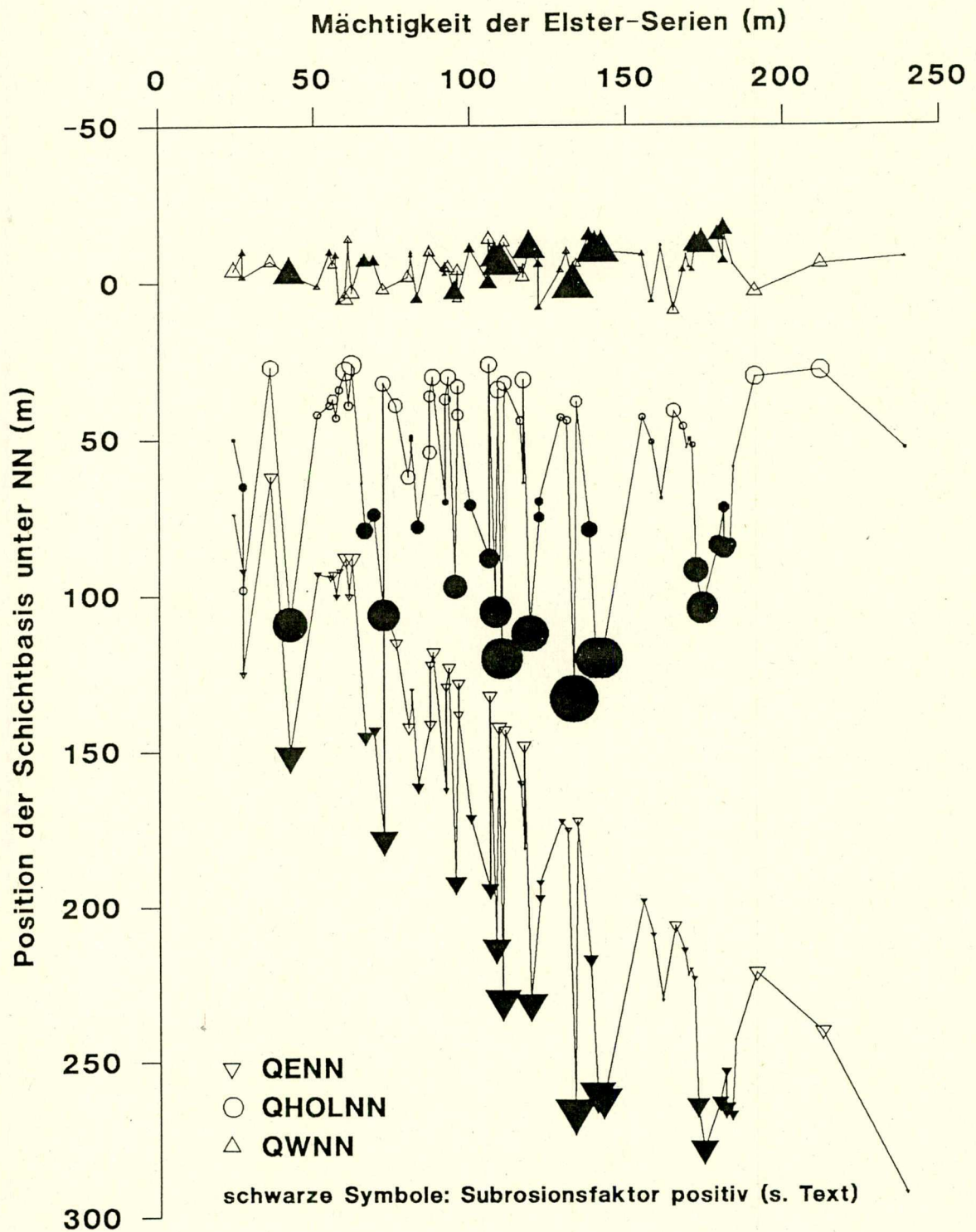


Abb. 25 Heutige Basispositionen der Elster-, Holstein- und Weichsel-Serien in der Gorlebener Rinne über dem Salzstock in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Elster-Serien

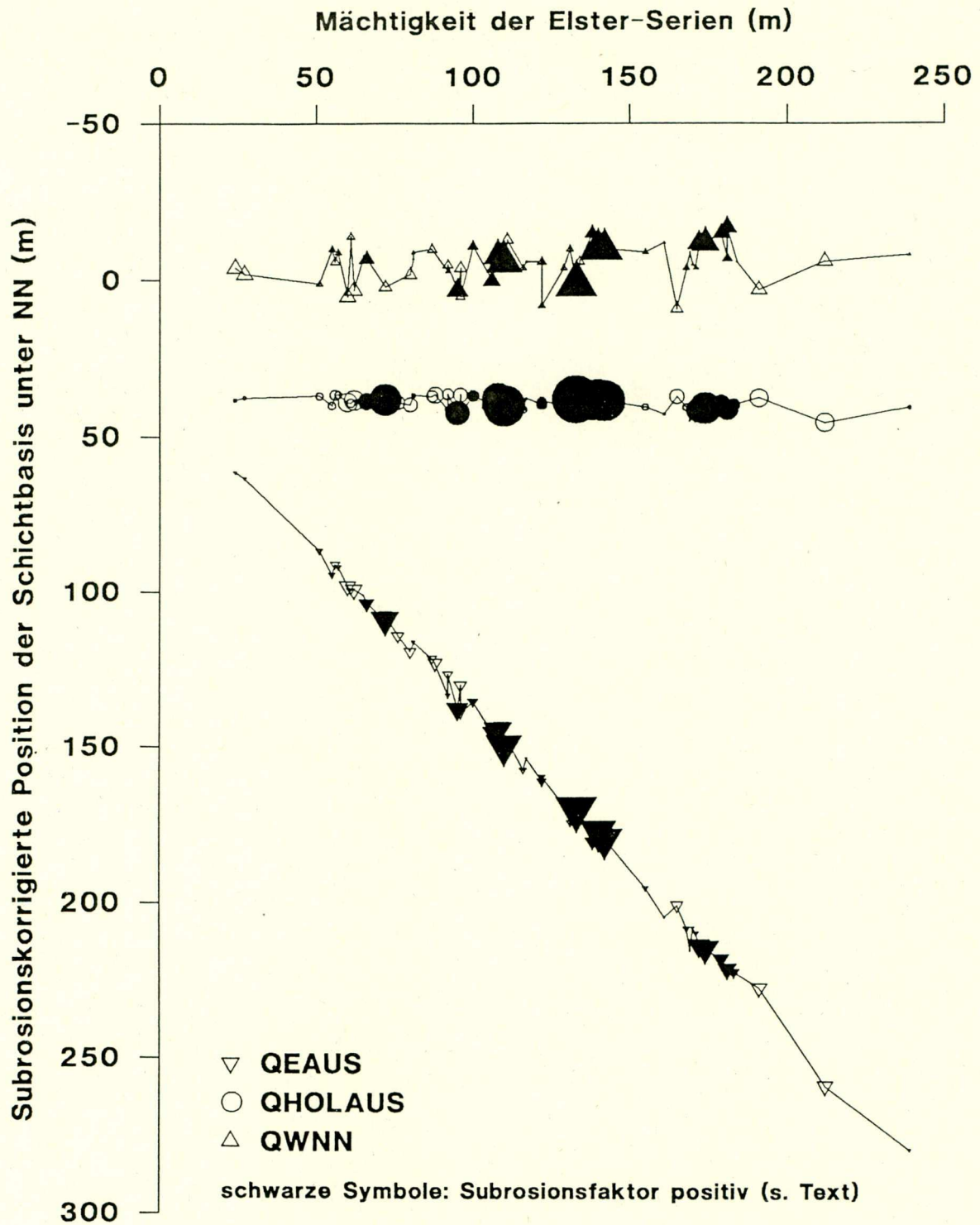


Abb. 26 Subrosions- und setzungskorrigierte Basispositionen der Elster- und Holstein-Serien sowie der heutigen Basispositionen der Weichsel-Serien in der Gorlebener Rinne über dem Salzstock in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Elster-Serien (Erläuterungen s. Text)

Der für die Subrosionberechnung heranzuziehende Zeitraum reduziert sich damit auf die Saale-Eiszeit. Dafür werden im folgenden unter Berufung auf Angaben in BGR (1990: S. 185 ff) 105.000 Jahre angesetzt. DUPHORN (1986) geht von 100.000 Jahren Dauer der Saale-Eiszeit aus. Die Differenz zwischen beiden Angaben (oder anderen ähnlich großen) wirkt sich nur unbedeutend auf die Subrosionsrate aus.

Es liegen allerdings deutliche Hinweise darauf vor, daß die Subrosion nicht während der gesamten Saale-Eiszeit gleichmäßig abgelaufen ist (DUPHORN 1983, DUPHORN 1986, APPEL & KREUSCH 1984), doch erlaubt das hier angewendete Verfahren eine weitere Eingrenzung innerhalb der Saale-Eiszeit nicht. Dazu hätte es der differenzierten Beurteilung der Lagerungs- und Mächtigkeitsverhältnisse der einzelnen Stadiale der saaleeiszeitlichen Serien bedurft. Die erforderlichen Informationen sind in Schichtenverzeichnissen nicht bei allen Bohrungen mit dem nötigen Detaillierungsgrad enthalten. Es ist aber festzuhalten, daß der hier angenommene Subrosionszeitraum mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer erheblichen Unterschätzung der tatsächlichen Subrosionsraten (um einen Faktor kleiner als 10) führt.

Angeichts der Bandbreite der Basispositionen der Holstein-Basis neben dem Salzstock (s. 3.2.3.3 u. 4.1) ist vor Berechnung des Subrosionsausmaßes die Ausgangsposition der Holstein-Basis genauer festzulegen, da die Basispositionen der Holstein-Serien auch bei den von Subrosion unbeeinflussten Bohrungen über dem Salzstock eine gewisse Variationsbreite aufweisen. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

Aus der kumulativen Häufigkeitsverteilung der setzungsbereinigten rechnerischen Absenkungs- bzw. Hebungsbeträge der Holstein-Basis (s. dazu 4.2.2) in Abb. 23 geht hervor, daß offenbar drei Gruppen von Bohrungen vorliegen. Davon wird die mit den geringsten Absenkungs- bzw. sogar Hebungsbeträgen als die durch Subrosion unbeeinflusste Gruppe angesehen. Die Grenze zwischen dieser Probengruppe und den durch Subrosion beeinflussten Bohrungen liegt bei etwa -5 m. Dieser Wert entspricht einem heutigen Niveau der Holstein-Basis von etwa 40 Metern unter NN und damit der möglichen Untergrenze der Bandbreite von Basispositionen neben dem Salzstock (s. 3.2.3.3 u. 4.1). Die für die Berechnung von Subrosionsraten heranzuziehenden Subrosionsbeträge sind also die Differenzen zwischen den rechnerischen Werten der setzungskorrigierten Absenkungs- bzw. Hebungsbeträge der Holstein-Basis in Abb. 23 und -5 m. Bei die

BHRG	QHOLNN	QHOLNN-K	SUBWEG	SUBRATE	FAKTOR 22
841	133	96	91	0.87	2.568
500	120	83	78	0.74	2.222
503	120	83	78	0.74	2.222
2120	120	81	76	0.72	2.218
515	112	78	73	0.69	2.020
3020	109	75	70	0.66	1.812
1070	106	69	64	0.61	1.648
3130	105	69	64	0.60	1.736
3030	104	63	58	0.56	1.721
980	98	62	57	0.54	1.237
1150	97	54	49	0.47	1.164
1120	92	51	46	0.43	1.388
860	88	49	44	0.42	1.011
654	84	45	40	0.38	1.014
650	84	45	40	0.38	0.574
3140	85	44	39	0.37	1.180
3152	78	44	39	0.37	0.684
524	79	42	37	0.35	0.872
3154	74	40	35	0.33	0.705
670	79	37	32	0.30	0.842
50	75	36	31	0.30	0.461
2225	71	36	31	0.29	0.628
3120	70	33	28	0.26	0.412
1180	72	31	26	0.25	0.594
640	65	31	26	0.25	0.359
1260	70	29	24	0.23	0.143
1130	69	26	21	0.20	0.035
520	62	23	18	0.17	0.256
1160	59	20	15	0.15	0.091
2221	54	20	15	0.14	0.048
2328	53	7	2	0.02	0.035

Tab. 5 Absenkungsbeträge und Geschwindigkeiten nachholsteinzeitlicher Subrosion an den Orten einzelner Bohrungen

QHOLNN: Heutige Position der Holstein-Basis u. NN
QHOLNN-K: Rechnerischer Absenkungsbetrag der Holstein-Basis (m)
SUBWEG: setzungsbereinigter Absenkungsbetrag
SUBRATE: nachholsteinzeitliche Subrosionsrate
FAKTOR 22: "Subrosionsfaktor" (s. Text)

! Nur Bohrungen mit FAKTOR 22 >0 und QHOLNN-K >5 m !

ser Vorgehensweise werden mögliche subrosionsbedingte Absenkungen der Holstein-Basis, die Ausgangsbreite der Basispositionen nicht übertreffen, nicht berücksichtigt.

In Tab. 5 sind für die 31 Bohrungen, die subrosionsbedingte Absenkungsbeträge größer 5 m **und** für den "Subrosionsfaktor" (Faktor 22) Werte größer Null aufweisen, die heutigen Basispositionen der Holstein-Serien, die rechnerischen setzungsbereinigten Absenkungsbeträge, die daraus ermittelten Subrosionsbeträge und Subrosionsraten sowie die Werte für den Subrosionsfaktor dargestellt. In den Subrosionswerten sind mögliche entgegengesetzte Bewegungen durch Salzaufstieg nicht berücksichtigt. Die Maximal- und Mittelwerte für die Absenkungsbeträge und Subrosionsraten der in Tab. 5 berücksichtigten Bohrungen lauten bei einer angenommenen Absenkungsdauer von 105.000 Jahren (s.o.) wie folgt:

Höchster Absenkungsbetrag	
(Bohrung 841):	91 m
Mittelwert:	43 m
Höchste Subrosionsrate:	0,9 (0,87) mm/Jahr
Mittlere Subrosionsrate:	0,4 (0,41) mm/Jahr

Die Mittelwertbildung beruht auf den Daten derjenigen Bohrungen, für die eine subrosionsbedingte Absenkung erkennbar ist. Ginge man bei der Bestimmung des Absenkungsbetrages nicht von -5 m als Ausgangsgröße aus (s.o.), sondern von 0 m, so ergäbe sich eine maximale Subrosionsgeschwindigkeit von 0,91 mm/Jahr.

4.5 Plausibilitätsbetrachtung

Die statistische und graphische Auswertung der zu den Lagerungsverhältnissen, Mächtigkeiten und zur Korngrößenzusammensetzung der in der Gorlebener Rinne neben und über dem Salzstock vorhandenen Gesteine liefert eindeutige Hinweise auf deren subrosionsbedingte Absenkung. Sie stehen in Einklang mit allen vom Standort Gorleben über die betrachteten Schichten vorliegenden Befunden (s. 3.2). Die Verlässlichkeit der Aussagen zur Subrosion kann lediglich durch zwei Umstände eingeschränkt werden:

Zum einen stehen aus dem Bereich über dem Salzstock erheblich mehr Daten zur Verfügung als aus dem Bereich daneben. Die Si-

gnifikanz der schon beim direkte Vergleich der Bohrungen neben und über dem Salzstock auffallenden Unterschiede kann theoretisch also durch unterschiedliche Stichprobenzahlen neben und über dem Salzstock scheinbar erhöht oder verursacht werden. Zum anderen sind die Basispositionen der Gesteine in der Gorlebener Rinne in den Bohrungen über dem Salzstock durch deutliche räumliche Autokorrelation gekennzeichnet, da die Bohrungen dort teilweise in Gruppen mit sehr geringen Abständen angeordnet sind.

Zur Prüfung, wieweit solche Effekte die zur Subrosion getroffenen Aussagen in Frage stellen, sind folgende Schritte unternommen worden:

Mit Hilfe eines Zufallsgenerators sind aus der Gesamtzahl der generell geeigneten Bohrungen über dem Salzstock 8 Zufallsdatensätze mit den Daten von jeweils 7 Bohrungen geschaffen worden. Diese Stichprobenzahl entspricht der Zahl der Bohrungen neben dem Salzstock, in denen Holstein-Serien angetroffen worden sind. Zusätzlich sind mit Hilfe der Clusteranalyse sieben über die Hoch- und Rechtswerte der Bohransatzpunkte räumlich definierte Bohrungsgruppen über dem Salzstock identifiziert worden. Die arithmetischen Mittelwerte der Basispositionen der Elster- und Holstein-Serien aller Gruppen sind zu einem Datensatz zusammengefaßt worden.

Abb. 27 macht am Beispiel der Beziehung zwischen der Mächtigkeit der Elster-Serien und der Position ihrer Basis deutlich, daß die aus 4.2 und 4.2 bekannten Unterschiede zwischen den Verhältnissen neben und über dem Salzstock unabhängig vom verwendeten Datensatz erhalten bleiben.

Mit Hilfe des Student-t-Testverfahrens wurde ergänzend geprüft, ob sich die Werte für die Basispositionen der Elster-, Holstein- und Saale-Serien der beiden anhand des "Subrosionsfaktors" unterscheidbaren Bohrungsgruppen (s. Abb. 22) signifikant unterscheiden. Der Test ist für die Holstein-Serien positiv verlaufen.

4.6 Vergleich der Subrosionsraten mit den Ergebnissen anderer Berechnungen

Für den Salzstock Gorleben sind von verschiedenen Autoren für unterschiedliche Zeiträume Subrosionsraten berechnet worden.

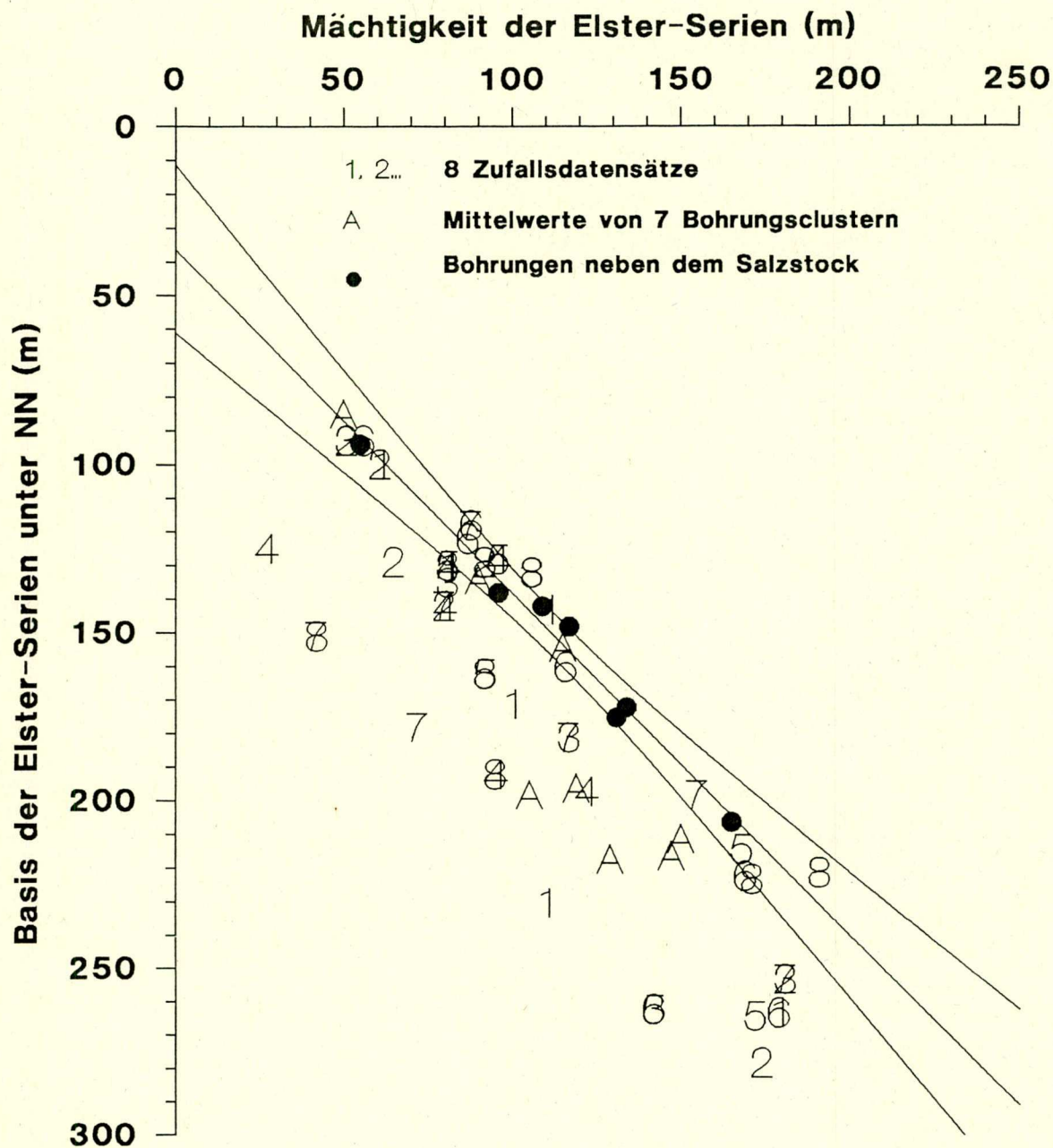


Abb. 27 Beziehung zwischen der Mächtigkeit und der Basisposition der Elster-Serien bei acht Zufallsdatensätzen und Mittelwerten von sieben Clustern von Bohrungen über dem Teilsalzstock Gorleben

mit der Regressionsgeraden und dem 95%-Vertrauensintervall für die Bohrungen neben dem Salzstock

Je nach den geologischen Voraussetzungen der Berechnungen kamen dabei unterschiedliche Berechnungsverfahren zur Anwendung. Die Ergebnisse unterscheiden sich in Abhängigkeit von den jeweils betrachteten Zeiträumen. Allerdings ist im einzelnen unklar, wieweit diese Unterschiede nicht auch durch unterschiedliche methodische Ansätze verursacht werden.

MÜLLER (1986) ermittelte Subrosionsraten aufgrund von palynologischen Untersuchungen im **Prä-Elster-Quartär** zwischen der Bavel-Warmzeit und der Bilshausen-Warmzeit. Die Sedimente aus dieser Zeit sind über dem südwestlichen Zentralbereich des Salzstocks in einem flachen, mit dem Steinhuder Meer vergleichbaren Süßwassersee abgelagert worden. Absenkung und Sedimentationsrate müssen sich demnach bei den bis zu 90 m mächtigen Sedimentschichten die Waage gehalten haben. Pollenstratigraphische Einstufungen und die Korrelation mit den magnetischen Epochen, ergaben einen Ablagerungszeitraum für diese Abfolge von ca. 200 000 Jahren. Danach lassen sich im westlichen Verbreitungsgebiet der Prä-Elster-Schichten Absenkungsraten von 0,1 bis 0,15 mm/Jahr und im östlichen Gebiet Raten von 0,15 mm/Jahr bis 0,2 mm/Jahr berechnen. Diese Absenkungsraten sind der Differenzbetrag von Subrosion minus Salzaufstieg. Aus nicht näher erläuterten Gründen wurde der Salzaufstieg als vernachlässigbar gestrichen und die Absenkungsraten mit den Subrosionsraten gleichgesetzt.

Aus der Differenz zwischen Paläohöhenlage und rezenter Höhe zu NN des Bavel-Komplexes ermittelt DUPHORN (1986) Subrosionsraten für das Altquartär in der Zeitspanne Bavel-Komplex bis Elster-Eiszeit. Der direkte Kontakt von bavelzeitlichen Sedimenten mit Hutgestein im Liegenden in der Bohrung 940 bei Gorlebener Tannen wird als sedimentär gedeutet.

Die Höhenlage benachbarter Kies und Sandablagerungen in ungestörter Lagerung der Menap-Kaltzeit lagen primär im Niveau von ca. 40 m über NN (DUPHORN 1983). Um den sedimentären Kontakt zu erklären, wird ein lokaler Salzstockdiapir, der bis 40 m über NN aufgedrungen ist, angenommen. Aus der heutigen Tiefenlage dieser Grenze von 237 m unter NN kann auf eine Absenkung von 270 bis 280 m geschlossen werden. Da an der betreffenden Lokation die holsteinzeitlichen Ablagerungen im Hangenden nicht abgesenkt wurden, kann aus der dazwischenliegenden Zeitspanne von ca. 600 000 bis 700 000 Jahren eine Subrosionsrate von 0,4 bis 0,5 mm/Jahr errechnet werden.

Aus der Höhendifferenz der **Holstein-Ablagerungen** über und ne-

ben dem Salzstock haben APPEL (1981), APPEL & KREUSCH (1984) und DUPHORN (1983, 1986 u. 1987) postholsteinzeitliche Subrosionsraten berechnet. In ungestörter Lagerung liegt das holsteinzeitliche Sedimentationsniveau zwischen 28 und 50 m unter NN. Im Salzstockdach befindet sich die Holstein-Basis in Tiefen bis zu 136 m unter NN. Die Ergebnisse stimmen prinzipiell überein. Abweichungen gehen auf den jeweils unterschiedlichen Informationsstand zum Zeitpunkt der Berechnung zurück. DUPHORN (1986) ermittelte so Subrosionsraten für die Saale-Eiszeit im Millimeter-Bereich pro Jahr. Auf Grund von Verbreitung und Lage der warthestadialen Grundmoräne geht DUPHORN von bevorzugter Subrosion während des Drenthe-Stadiums aus.

Auch die in 4.4 berechneten Werte für die nachholsteinzeitliche Subrosion stimmen weitgehend mit den bereits früher genannten Werten überein. Da bei diesen Berechnungen die Bandbreite der ursprünglichen Basispositionen der Holstein-Serien berücksichtigt worden ist und eine weitere Einengung des Subrosionszeitraums nicht möglich war, sind die neuen Werte rechnerisch z.T. etwas niedriger als die älteren; sie führen also nicht zu einer neuen Einschätzung der Bedeutung der Subrosion für das Endlager (s. dazu 5.).

BORNEMANN & FISCHBECK (1986) berechnen nachelsterzeitliche Subrosionsraten aus der Ausbildung des Hutgesteins. Sie deuten einen bestimmten Brekzienhorizont, die Hutgesteinsbrekzie, als Zeitmarke für die Elster-Eiszeit und interpretieren das im Liegenden folgende geschichtete Gips- und Anhydritgestein als das Ergebnis nachelsterzeitlicher Subrosion. Aus den Mächtigkeiten dieser Serie (10 cm bis 1,7 m) schließen sie auf Ablaugungshöhen zwischen 0 und 40 m zurück; durch den Zeitraum seit Beginn der Elster-Kaltzeit (ca. 300.000 Jahre) geteilt, ergeben sich mittlere Ablaugungsraten von 0,04 mm/Jahr bzw. eine maximale Rate von 0,13 mm/Jahr. Unklar bleibt dabei, warum die Bohrung 1004 südwestlich von Gorlebener Tannen mit einer über 3 m mächtigen Folge von geschichtetem Gips- und Anhydritgestein nicht mit in die Berechnungen einbezogen wurde.

Nicht diskutiert werden bei BORNEMANN & FISCHBECK (1986) allerdings die Entstehung der verschiedenen Hytgesteinstypen und die zeitliche Stellung der übrigen im Hutgestein entwickelten Brekzienhorizonte, wie sie z.B. in Bohrung 3151 auftreten, wo eine Brekzie zwischen sogenanntem Liniengips und Sprengelgips und eine weitere Brekzie zwischen tertiären Serien und Liniengips entwickelt ist. Die Aussagekraft der Berechnungen ist daher fragwürdig.

Die von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) berechneten Werte sind - auch bei Berücksichtigung des der Berechnung zugrundeliegenden längeren Zeitraums - deutlich geringer als die aus der Absenkung der Holstein-Basis berechneten Werte. Auch die nach beiden Verfahren identifizierten Orte besonders starker Subrosion stimmen nicht überein.

Mit der Randsenkenanalyse werden Mächtigkeitsänderungen der über den Zechstein-Serien abgelagerten Schichten berechnet. Dabei bewirkt die Salzakкумуляtion eine Mächtigkeitsreduzierung und die Salzabwanderung eine Mächtigkeitszunahme in den hangenden Ablagerungsgebieten. Aus der Mächtigkeitsdifferenz für bestimmte Zeitspannen kann dann die Aufstiegsgeschwindigkeit des Salzstocks berechnet werden. Die Maximale Aufstiegsrate wurde nach dieser Methode mit 0,086 mm/Jahr für die Unterkreide während der Diapirphase des Zechsteinsalzes berechnet. Die geringsten Werte von 0,017 mm/Jahr werden für den Zeitraum Miozän bis Quartär angegeben (BGR 1990: S. 218). Das in den Salzstock abgewanderte Salz wird durch eine Salzmengenbilanz quantifiziert. Daraus wurden für drei verschiedene Zeitabschnitte die Höhen der abgelaugten Salzsäule ermittelt. Im Zeitabschnitt Miozän bis Quartär ergeben sich daraus Subrosionsraten von unter 0,02 mm pro Jahr (BGR 1990: S. 348).

Eine andere Möglichkeit Subrosionsraten zu berechnen ist, sie aus dem Salzabtransport des Grundwasser zu ermitteln. Numerisch berechnete Strömungswege und Salzgehaltsbestimmungen im Bereich der Gorlebener Rinne führen zu gegenwärtigen Salzmenngen von 3.000 m³ bis 12.000 m³, die von der Gorlebener Rinne pro Jahr über den nordöstlichen "Wallbereich" vom Grundwasser ins Nebengebirge abgeführt werden (PTB 1983). Unter der Bedingung, daß die Ablaugsfläche in diesem Bereich ca. 10 km² beträgt und der Salzabtransport unter dynamischen Gleichgewichtsbedingungen verläuft, kann daraus eine rezente Subrosionsrate in der Gorlebener Rinne von 0,3 bis 1,2 mm/Jahr berechnet werden.

Dieser Ansatz, dessen vorläufige Ergebnisse gut zu den aus postholsteinzeitlichen Schichtverstellungen berechneten Subrosionsraten passen, ist in jüngeren zusammenfassenden Darstellungen der Standortverhältnisse Gorleben (BFS 1990, BGR 1990) nicht wieder aufgegriffen worden.

5. Bedeutung nachholsteinzeitlicher Subrosion für das geplante Endlager

5.1 Bewertung der Subrosionsraten

Die Langzeitsicherheit eines Endlagers in Salzgestein kann durch Subrosion beeinträchtigt werden. Zum einen kann der Abstand zwischen Salzspiegel und Endlager durch flächenhafte Subrosion verringert werden. Mit der Bedeutung dieses Vorgangs für die Sicherheit des am Standort Gorleben geplanten Endlagers haben sich EHRLICH et al. (1986) befaßt.

Zum anderen führt Subrosion aber auch dazu, daß sich die Konfiguration der Gesteine im Salzspiegelbereich verändert (s. 2.2). Auf diese Weise können Kontakte zwischen Grundwasser führenden Gesteinen des Gipshutes und des Deckgebirges mit Gesteinen des Salzstocks entstehen oder wiederbelebt werden. Gut wasserlösliche Gesteine des Salzstocks, insbesondere Kalisalze, können dann bevorzugt aufgelöst werden und potentiell wasserdurchlässige Gesteine, wie der Hauptanhydrit, können wasserleitende Verbindungen zwischen Salzspiegel und Endlager bilden. Bei der Bewertung des Subrosionsausmaßes ist zu berücksichtigen, daß durch die Einlagerung wärmeproduzierender hochradioaktiver Abfälle Spannungsumlagerungen mit Ribbildung in der Salzscheibe über dem Endlager provoziert werden.

Darüber hinaus kann aus den Umständen und dem Ausmaß der Subrosion indirekt auch auf die Transportmöglichkeiten für Radionuklide im Bereich des Gipshutes und des tieferen Deckgebirges geschlossen werden.

Vom Teilsalzstock Gorleben ist bekannt, daß es gegenüber dem generellen Subrosionsniveau zu vorseilender Subrosion von Staßfurt-Carnallit in größerem Ausmaß gekommen ist und möglicherweise noch immer kommt. Zudem ist der potentiell wasserbringende Hauptanhydrit nachweislich im Salzspiegelniveau und in der Endlagertiefe vorhanden. Die hydrochemischen Grundwasserdaten aus dem Deckgebirge des Salzstocks deuten auf aktive Subrosion hin, deren Ausmaß im einzelnen unbekannt ist (s. 4.6).

Weder für den Standort Gorleben noch für andere Salzstöcke kann jedoch vorab ein konkreter, geschweige denn quantitativer Zusammenhang zwischen dem Subrosionsausmaß und der genauen Art und dem Ausmaß der befürchteten Folgen hergestellt werden. Diesem gegenwärtig nicht lösbaren Beurteilungsproblem kann nur durch die Suche nach einem Standort ohne Subrosion bzw. - wenn

es den nicht geben sollte - mit möglichst geringer Subrosion abgeholfen werden. Schon aus diesem Grund muß das künftige Ausmaß der Subrosion möglichst genau bekannt sein.

Unbeschadet der Schwierigkeiten bei der Ableitung möglicher Subrosionsfolgen aus dem Ausmaß der Subrosion sind für Sicherheitsbetrachtungen vor allem die Höchstwerte der Subrosion innerhalb des Vergleichszeitraums der Vergangenheit von Bedeutung. Sie können nur dann vernachlässigt werden, wenn ihr neuerliches Auftreten für die Zukunft mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Das setzt voraus, daß die das Ausmaß der Subrosion bestimmenden Randbedingungen genau bekannt sind. Das ist in der Regel nicht der Fall - auch nicht am Standort Gorleben (s. 5.2).

Die alleinige Betrachtung von für lange Zeiträume berechneten Mittelwerten von Subrosionsraten führen zur Unterschätzung des subrosionsbedingten Risikos, weil dabei lediglich die flächenhafte Subrosionswirkung betrachtet wird (s.o.). Angesichts des Zeitraumes, für den Sicherheitsbetrachtungen für Endlager durchgeführt werden müssen, muß die Subrosion am Teilsalzstock Gorleben des Salzstockes Gorleben-Rambow mindestens für das gesamte Quartär beurteilt werden, und zwar für möglichst viele kurze und genau definierte Zeitabschnitte davon.

Die Ergebnisse solcher Bestimmungen für den Standort Gorleben sind in 4.6 dargestellt. Danach ist es während des Quartär wiederholt zu Subrosion in erheblichem Ausmaß gekommen. Eindeutige Tendenzen über die Subrosionsentwicklung innerhalb des insgesamt betrachteten Zeitraums ergeben sich daraus jedoch nicht. Auch für die Zukunft ist durchaus mit Subrosionsprozessen in derselben Größenordnung wie in der Vergangenheit zu rechnen.

Von den mit der Eignungsuntersuchung des Standortes befaßten Institutionen wird in Subrosion offensichtlich keine Gefahr für das geplante Endlager gesehen. EHRLICH et al. (1986) kommen zu dem Schluß, daß flächenhafte Subrosion, selbst wenn die bekannten möglichen Höchststraten unterstellt werden, nicht zur Gefährdung der Biosphäre führen würde. Ähnlich summarische Aussagen finden sich in jüngsten zusammenfassenden Berichten über die Erkundung des Standortes Gorleben (BFS 1990, BGR 1990). Allerdings werden darin auch zu geringe Subrosionsraten unterstellt. Die Ursache liegen möglicherweise in der offensichtlich selektiven Wahrnehmung von Subrosionsbefunden und der bevorzugten Auseinandersetzung mit Mittelwerten der Subro-

sionsraten für lange Zeiträume:

Im Hinblick auf das Ausmaß **nachholsteinzeitlicher** Subrosion schenken BGR und BfS offensichtlich den von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) aus der Mächtigkeit des geschichteten Hutgesteins im Gorlebener Gipshut berechneten Subrosionsraten besonderes Vertrauen. Danach sind für den gesamten Zeitraum nach der Elster-Eiszeit (rund 300.000 Jahre) durchschnittlich 0,04 mm/Jahr und maximal 0,13 mm/Jahr anzunehmen (s. 4.6). Gegen die Berechnung von Subrosionsraten aus der nachholsteinzeitlichen Verstellung der Holstein-Basis sind immer wieder die in 4.2 benannten und bewerteten Störfaktoren angeführt worden. Eigene Anstrengungen, diese Faktoren im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Berechnung nachholsteinzeitlicher Subrosionsraten angemessen zu beurteilen sind von den Untersuchungsinstanzen offensichtlich nicht unternommen worden.

Die von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) berechneten nachholsteinzeitlichen Absenkungsbeträge sind - mangels entsprechender Darstellung bei BORNEMANN & FISCHBECK (1986) und in BGR (1990) - nicht nachvollziehbar. Sie stehen in krassem Widerspruch zu den Befunden über subrosionsbedingte Schichtverstellungen und den in sich schlüssigen Berechnungen entsprechender Subrosionsraten. Keinesfalls weisen sie höhere Verlässlichkeit auf als die mit anderen Verfahren (s. 4.6) berechneten Subrosionsraten:

Bis heute liegt - mit Ausnahme der Hutgesteinsbrekzie (s. 2.2 u. 4.6) - keine genetische Deutung für die verschiedenen von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) unterschiedenen Gesteinstypen des Gipshutes vor. Das gilt insbesondere für den wahrscheinlich nach der Elster-Eiszeit entstandenen und zur Subrosionsberechnung benutzten geschichteten Gips bzw. Anhydrit. Die Entstehung eines Gesteins muß aber unbedingt bekannt sein, wenn aus dessen absoluter Mächtigkeit der Bildungszeitraum eines Schichtabschnittes abgeleitet werden soll. Ohne diese Voraussetzung haben die berechneten Raten allenfalls hypothetischen Charakter.

Auf die Fragwürdigkeit, die ohnehin zweifelhaften Absenkungswerte auf den gesamten Zeitraum seit der Elster-Eiszeit zu beziehen, wurde bereits hingewiesen (s.o.). Unter Verwendung der in 4.6 berechneten subrosionsbedingten Absenkung der Holstein-Serien und einer Subrosionsdauer von 300.000 Jahren, wie sie den Berechnungen von BORNEMANN & FISCHBECK (1986) zugrundeliegt, ergäben sich im übrigen Subrosionsraten von maximal

rund 0,3 mm/Jahr und im Mittel von 0,1 mm/Jahr.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß Subrosion in der Vergangenheit zu dramatischen Veränderungen im Deckgebirge des Teilsalzstocks Gorleben geführt hat. Künftige Ereignisse ähnlichen Ausmaßes sind nicht auszuschließen. Wenngleich deren konkrete Folgen für die Sicherheit eines etwaigen Endlagers im einzelnen unbekannt sind, so belegen die vorliegenden Untersuchungsergebnisse doch erhebliche Eignungsdefizite des Standortes Gorleben gegenüber Standorten, bei denen mit künftiger Subrosion nicht oder nur in geringem Ausmaß gerechnet werden muß. Im Rahmen der Sicherheitsbetrachtungen für das geplante Endlager erhalten die postholsteinzeitlichen Subrosionsereignisse besondere zusätzliche Bedeutung dadurch, daß die offiziellen Untersuchungsinstanzen offensichtlich nicht bereit sind, sich mit den methodisch abgesicherten Höchstwerten auseinanderzusetzen und die Bedeutung von Subrosion für die Sicherheit des geplanten Endlagers ernsthaft zu betrachten.

5.2 Ursachen der Subrosion und Prognose

Da die Verbreitung der Holstein-Serien auf die Gorlebener Rinne beschränkt ist, können die in 4.4 aus Niveauänderungen der Holstein-Basis berechneten Subrosionsraten nicht auf die übrigen Bereiche des Salzstocks übertragen werden. Es ist aber auch nicht von vornherein auszuschließen, daß es außerhalb der Gorlebener Rinne zu postholsteinzeitlicher Subrosion gekommen ist. Die Beschränkung der Bohrungen mit besonders starker nachholsteinzeitlicher Subrosion auf die tiefsten Teile der Gorlebener Rinne (s. Abb. 24) berechtigt allerdings zu dem allgemeinen Schluß, daß zwischen Rinnenposition und Subrosionsausmaß ein ursächlicher Zusammenhang besteht. Diese Annahme wird dadurch gestützt, daß zu den Bohrungen mit besonders starker Subrosion auch diejenigen gehören, bei denen gut wasserdurchlässige elstereiszeitliche Serien direkt die Gesteine des Salzstocks überlagern. Außerdem ist von der praelsterzeitlichen Subrosionszone mit Altquartär-Ablagerungen (s. 3.2.1) nur derjenige Bereich von saaleeiszeitlicher Subrosion betroffen worden, der in der Gorlebener Rinne liegt.

Weder generell noch im Detail sind jedoch die genauen Ursachen für besonders starke nachholsteinzeitliche Subrosion aus dem im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ausgewerteten Datenmaterial eindeutig ableitbar. Das gilt noch mehr im Hinblick auf

Subrosion, die nicht zu zweifelsfrei erkennbaren Lageveränderungen von Gesteinen über dem Salzstock geführt hat.

Einfache Interpretationsansätze zur Deutung der unterschiedlichen Subrosionsintensität versagen: Beispielsweise hat eine besonders tiefe Position des Salzspiegels zu Beginn der Saale-Eiszeit die weitere saaleeiszeitliche Subrosion - wider Erwar-ten (s. 2.2) - keineswegs verhindert: Überträgt man den nachholsteinzeitlichen Absenkungsbetrag der Holstein-Basis auf den Salzspiegel und vergleicht dann dessen (aus der heutigen Position der Holstein-Basis und dem Absenkungsbetrag der Holstein-Basis berechneten) mutmaßliche Ausgangslage vor Subrosionsbeginn mit der heutigen Position (s. Abb. 29), so wird deutlich, daß selbst bei Ausgangspositionen von nahezu 300 m unter NN noch Subrosion in erheblichem Ausmaß auftreten kann, jedoch nicht auftreten muß.

Auch das Vorhandensein einer Schutzschicht aus Tertiär-Ton über dem Gipshut verhindert keineswegs starke Subrosion. In Abb. 28 ist das Ausmaß der nachholsteinzeitlichen Bewegungen in Abhängigkeit von der Mächtigkeit des den Salzstock überlagernden Tertiärs dargestellt. Die betreffenden Tertiär-Serien sind durchweg tonig entwickelt, weisen also relativ geringe Wasserdurchlässigkeit auf. Die Abbildung zeigt, daß kein Zusammenhang zwischen der Tertiär-Mächtigkeit und dem Absenkungsbetrag besteht.

Angesichts der Schwierigkeiten bei der Interpretation der vorliegenden Befunde sind belastbare Aussagen darüber, unter welchen Bedingungen, wo und in welchem Ausmaß am Salzstock Gorleben künftig mit verstärkter Subrosion zu rechnen ist, gegenwärtig nicht möglich. Die Subrosionsprognose für den Standort Gorleben muß daher - wie in anderen Fällen auch - in der Projektion der bisherigen Subrosionsgeschichte in die Zukunft bestehen. Dabei wird unterstellt, daß für bestimmte Zeitabschnitte der Vergangenheit belegte Subrosionsraten auch in Zukunft auftreten können. Damit relativ seltene, aber wahrscheinlich besonders sehr folgenreiche Höchststraten berücksichtigt werden können, muß der insgesamt zu betrachtende Zeitraum der Vergangenheit deutlich größer als derjenige sein, für den der Eignungsnachweis geführt werden soll. Die bevorzugte Betrachtung langfristiger Mittelwerte der Subrosion ist nicht akzeptierbar.

Grobe Hinweise ergeben sich allenfalls aus der Konzentration der Subrosionsphänomene auf die Gorlebener Rinne. Das bedeutet

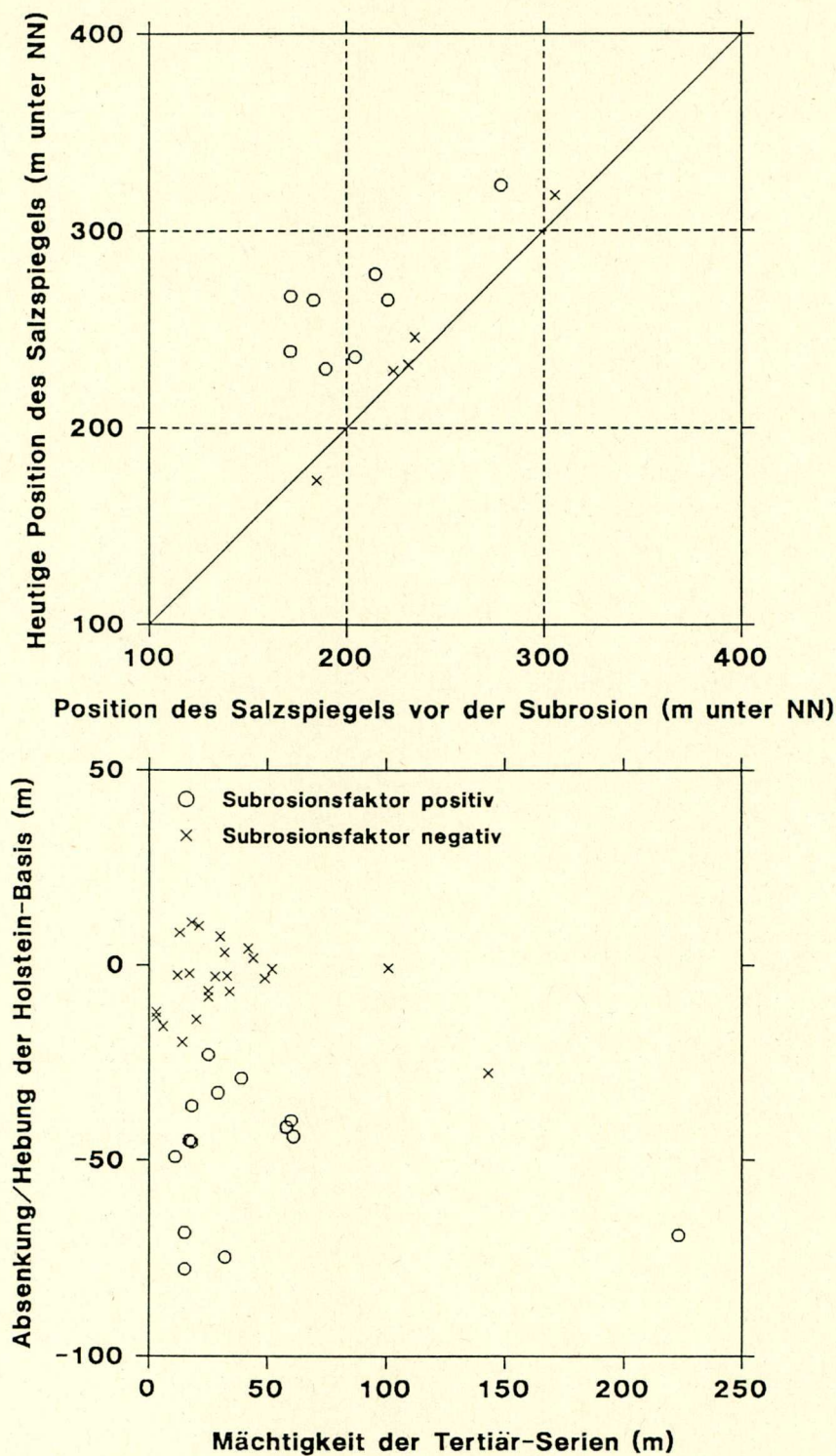


Abb. 29 Beziehung zwischen der heutigen Position des Salzpiegels (oben) und der aus der Absenkung der Holstein-Serien errechneten Position des Salzpiegels vor Subrosionsbeginn

Abb. 28 Beziehung zwischen rechnerischer Absenkung bzw. Hebung (unten) der Holstein-Basis und Mächtigkeit der Tertiär-Schichten über dem Salzstock

allerdings nicht, daß künftige Subrosion in saaleeiszeitlichem Ausmaß die Entstehung einer neuen Rinne nach Art der Gorlebener Rinne zur Voraussetzung hat, schließlich stand die saaleeiszeitliche Subrosion nicht mit dem Vorgang der Rinnenbildung in Zusammenhang. Vielmehr war offensichtlich die tiefgreifende, im einzelnen unbekannte Veränderung des Grundwassersystems während der Saale-Eiszeit für die starke Subrosion verantwortlich. Dieser Sachverhalt steht keineswegs in Einklang mit den Aussagen der offiziellen Untersuchungsinstanzen zu den erwarteten Auswirkungen einer (künftigen) Eiszeit. Danach sollte es nämlich zur Einschränkung der Grundwasserbewegung kommen (BFS 1990), die verminderte Subrosion zur Folge haben müßte.

Nach den vorliegenden Befunden muß jedoch auch und gerade während einer Eiszeit mit Subrosion gerechnet werden. Offenbar stellen sogar eiszeittypische Grundwasserverhältnisse eine wesentliche Voraussetzung auch für künftige starke Subrosion dar. Unter den möglichen hydraulischen Bedingungen einer künftigen Eiszeit ist offenbar der Bereich der Gorlebener Rinne wegen der dort herrschenden hydrogeologischen und hydraulischen Verhältnisse besonders gefährdet. Dabei ist keineswegs auszuschließen, daß auch diejenigen Bereiche in der Gorlebener Rinne betroffen werden, an denen es in der Saale-Eiszeit oder früher keine ausgeprägte Subrosion gegeben hat.

Hannover, den 29.12.1993

Dr. D. Appel

6. Zitierte Schriften

- APPEL, D. (1981): Berechnungen von Salzaufstiegs- und Subrosionsraten am Salzstock Gorleben mit Hilfe geologischer Schnitte.- In: BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE, Hrsg.: Entsorgung. Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben: S. 254-259; Bonn.
- APPEL, D. & KREUSCH, J. (1984): Gutachterliche Stellungnahme zum Zusammenfassenden Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt vom Mai 1983.- Hannover (im Auftrag der Fraktion DIE GRÜNEN im Bundestag und der Fraktion DIE GRÜNEN im Niedersächsischen Landtag).
- BATSCHKE, H. & KLARR, K. (1980): Beobachtungen und Gedanken zur Gipshutgenese.- 5. Int. Symp. on Salt, 1: S. 9-19; Cleveland, Ohio (North. Ohio Geol. Soc.).
- BFS - Bundesamt für Strahlenschutz (1990): Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen.- BFS-Schrift 4/91: 67 S.; Braunschweig.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1990): Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben.- Zusammenfassender Bericht (Stand 1.1.1990; zahlreiche Bearbeiter).
- BORNEMANN, O. & FISCHBECK, R. (1986): Ablaugung und Hutgesteinsbildung am Salzstock Gorleben.- Z. dt. geol. Ges., 137: S. 71-83; Hannover.
- DUPHORN, K. (1983): Quartärgeologische Gesamtinterpretation Gorleben. Abschlußbericht.- Kiel/Wellington (unter Mitarbeit von Ch. Kabel, U. Schneider, P. Schröder).
- " -- " (1986): Das subrosive Sicherheitsrisiko bei der geplanten Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Salzstock Gorleben aus quartärgeologischer Sicht.- Z. dt. geol. Ges., 137: S. 105-120; Hannover.
- DUPHORN, K., mit einem Beitrag von A. RICHTER (1987): Die quartäre Subrosion am Endlagersalzstock Gorleben.- Eine vergleichende Betrachtung der Arbeitsmethoden, Bohrbefunde, Deutungen und sicherheitsgeologischen Be-

wertungen.- Meyniana, 39: S. 41-69; Kiel.

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. 231-236.

FIELITZ, K. (1983): Berechnung von Tiefenprofilen des Tongehalts und der Porosität aus Bohrlochmessungen in Lokersedimenten.- Bericht, BGR, Archiv-Nr. 94 447: 15 S.; Hannover.

HARRES-PICKEL - HARRES PICKEL CONSULT (1992): Hydrogeologisches Untersuchungsprogramm Gorleben. Abschlußbericht.- (35 Bände, umfangreiche Dokumentation, zahlreiche Beiträgen verschiedener Autoren).

KÖSTER, R. (1957): Experimente zur glazialen Schuppung.- N. Jb. Geol., Mh., 1957, 11: S. 510-517.

" -- " (1958 a): Experimente zur glazialen Schuppung.- N. Jb. Geol., Mh., 1958, 1: S. 33-40.

" -- " (1958 b): Experimente zur glazialen Schuppung.- N. Jb. Geol., Mh., 1958, 10: S. 460-468.

KÖTHE, A. (1991): Biostratigraphische Untersuchung paläogener Proben des Salzstocks Gorleben anhand von Dinoflagellaten und deren geologische Interpretation - Zwischenbericht zum Arbeitspaket 9G 411 110 00.- 42 S.; Hannover (BGR).

KUSTER, H. & MEYER, K.D. (1979): Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen.- Eiszeitalter und Gegenwart, 29: S. 35-156; Hannover.

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

PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (1983): Zusammenfassender Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung in Gorleben.- Braunschweig (Mai 1983).

SCHNEIDER, U. (1981): Ergebnisse der quartärgeologischen Oberflächenkartierung.- In: BUNDESMINISTERIUM FÜR FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE, Hrsg.: Entsorgung. Zwischenergebnisse zum Salzstock Gorleben: S. 241-251; Bonn.

SCHRÖDER P. (1988): Aufbau und Untergliederung des Niederterrassenkörpers der Unterelbe.- Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover, 27: 119 S.; Hannover.

WOLDSTEDT P. & DUPHORN K. (1974): Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter.- 484 S.; Stuttgart (K. F. Koehler Verlag).

A n h a n g

Kurzfassungen der zur Berechnung nachholsteinzeitlicher
Subrosionsraten herangezogenen Schichtenverzeichnisse

Der Anhang enthält Daten zu folgenden Parametern:

BHRG	Nummer der Bohrung,
RECHTS	Rechtswert des Bohransatzpunktes,
HOCH	Hochwert des Bohransatzpunktes,
NN	Lage des Bohransatzpunktes über NN,
ETNN	Endteufe der Bohrung unter NN,
QHNN	Basis der holozänen Serien unter NN,
QWNN	Basis der weichseleiszeitlichen Serien (in der Regel Niederterrasse) unter NN,
MQW	Mächtigkeit der weichseleiszeitlichen Serien,
QSNN	Basis der saaleeiszeitlichen Serien unter NN,
MQS	Mächtigkeit der saaleeiszeitlichen Serien,
QHOLNN	Basis der holsteinzeitlichen Serien unter NN,
MQHOL	Mächtigkeit der holsteinzeitlichen Serien,
QENN	Basis der elstereiszeitlichen Serien unter NN,
MQE	Mächtigkeit der elstereiszeitlichen Serien,
QPENN	Basis der präelstereiszeitlichen Serien unter NN,
MQPE	Mächtigkeit der präelstereiszeitlichen Serien,
TNN	Basis der Tertiär-Schichten unter NN,
MT	Mächtigkeit der Tertiär-Serien,
KRNN	Basis der Kreide-Schichten unter NN,
YTOPNN	Oberfläche des Gipshutes unter NN,
ZTOPNN	Salzspiegel unter NN,
QL	Mächtigkeit des Lauenburger-Ton-Komplexes (Gesamtmächtigkeit aller als Beckenablagerungen bezeichneten Schichten in den Elster-Serien),
QET	Gesamtmächtigkeit der Tonserien in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit (Lauenburger-Ton-Komplex),
QEU	Gesamtmächtigkeit der Schluffserien in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit (Lauenburger-Ton-Komplex),
QETU	Gesamtmächtigkeit der Ton- und Schluffserien in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit (Lauenburger-Ton-Komplex),
QESG	Gesamtmächtigkeit der Sand- und Kiesserien in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit,
QELGMG	Gesamtmächtigkeit von Geschiebemergel und -lehm in den Ablagerungen der Elster-Eiszeit.

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben (außer NN) in Metern unter NN !

BHRG	RECHTS	HOCH	NN	ETNN	QHNN	QWNN	MQW	QSNN	MQS	QHOLNN
20	57578	78688	21	219	.	6	27	42	36	51
50	58001	76080	27	235	.	-6	21	57	63	75
65	55224	76468	24	237	.	1	25	40	39	42
180	56393	72270	27	217	.	-2	25	25	27	31
190	57866	75196	26	234	.	9	35	23	14	41
200	59579	73062	31	270	.	-10	21	31	41	44
410	56508	70620	24	206	.	.	.	17	17	34
470	66172	78526	17	241	-15	-10	5	36	47	39
480	58502	79223	17	253	-14	-7	7	41	48	51
484	58503	79252	18	330	-15	-8	7	44	51	53
500	58575	78388	20	260	.	-10	10	113	123	120
503	58574	78385	20	281	.	-10	10	113	123	120
510	57948	77913	20	228	.	-11	9	107	118	113
515	57954	77951	20	295	.	-11	9	108	119	112
520	56803	77672	22	168	.	-2	20	58	60	62
524	56788	77656	22	278	.	-7	15	75	82	79
530	56221	76984	25	202	.	.	.	25	25	30
540	58879	77263	24	133	.	-14	10	31	45	39
550	57960	76906	25	235	.	-11	14	21	32	39
560	57006	76479	25	228	.	-4	21	35	39	52
570	56023	76138	27	152	.	6	33	32	26	34
630	57976	72358	24	208	.	-6	18	29	35	38
640	57566	79990	16	199	-14	-10	4	58	67	65
650	60095	80874	25	287	.	.	.	59	59	84
654	60127	80865	25	338	.	-15	10	74	89	84
670	60850	82307	18	297	.	-15	3	69	84	79
720	58124	68229	22	181	.	5	27	27	22	42
840	58042	78265	20	270	.	1	21	132	131	137
841	58053	78282	20	295	.	1	21	127	126	133
850	56812	76981	24	118	-20	5	25	17	12	28
860	57496	77576	24	205	-20	0	20	79	79	88
880	59072	81366	18	327	-15	-4	11	39	44	50
940	56594	76660	25	240	-22	-13	9	22	35	32
970	57182	77366	24	215	-20	-4	16	36	40	46
980	59873	82052	17	344	-15	-2	13	83	85	98
1020	57064	75709	27	303	.	3	30	22	19	30
1070	61503	82267	42	402	.	.	.	99	99	106
1110	58011	77105	24	241	.	-6	18	18	24	28
1120	58256	77845	23	264	-21	-12	9	89	101	92
1130	58308	78497	21	230	-18	-12	6	36	48	69
1150	58969	79338	16	193	-15	3	18	82	79	97
1160	58681	79591	16	243	-15	-6	9	49	55	59
1180	59757	80538	17	253	-15	-7	8	65	72	72
1200	57067	77095	24	195	-19	-4	15	34	38	44
1210	57022	76832	24	130	-22	-8	14	32	40	64

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben (außer NN) in Metern unter NN !

BHRG	MQHOL	QENN	MQE	QPENN	MQPE	TNN	MT	KRNN	YTOPNN	ZTOPNN
20	9	209	158	.	.	.	.	.	.	.
50	18	197	122	.	.	.	.	.	.	.
65	2	93	51	179	86	204	25	.	204	229
180	6	148	117	.	.	.	.	.	.	.
190	18	206	165	.	.	.	.	.	.	.
200	13	175	131	.	.	.	.	.	.	.
410	17	142	109	.	.	.	.	.	.	.
470	3	94	55	.	.	.	.	.	.	.
480	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.
484	9	292	239	.	.	.	.	.	292	318
500	7	260	140	.	.	.	.	.	260	.
503	7	262	142	.	.	.	.	.	262	265
510	6	.	.	.	.	.	.	.	.	.
515	4	231	119	.	.	246	15	.	246	255
520	4	142	80	.	.	167	25	.	.	.
524	4	145	66	.	.	203	58	.	203	230
530	5	118	88	183	65	.	.	.	.	.
540	8	100	61	.	.	.	.	.	.	.
550	18	.	.	.	.	.	.	.	.	.
560	13	223	171	.	.	226	3	226	226	.
570	2	92	58	124	32	.	.	.	.	.
630	9	172	134	.	.	.	.	.	.	.
640	7	92	27	.	.	.	.	.	.	.
650	25	267	183	.	.	284	17	.	284	.
654	10	263	179	.	.	281	18	.	281	323
670	10	217	138	.	.	.	.	.	.	.
720	15	138	96	.	.	.	.	.	.	.
840	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
841	6	266	133	.	.	.	.	.	266	267
850	11	88	60	.	.	109	21	.	109	.
860	9	194	106	.	.	.	11	205	205	.
880	11	74	24	.	.	.	.	.	.	.
940	10	143	111	239	96	.	.	.	239	.
970	10	214	168	.	.	.	.	.	214	.
980	15	125	27	.	.	.	.	.	.	.
1020	8	221	191	.	.	.	.	.	.	.
1070	7	178	72	.	.	401	223	.	.	.
1110	10	240	212	.	.	.	.	.	240	.
1120	4	264	172	.	.	.	.	.	265	.
1130	11	230	161	.	.	.	.	.	230	.
1150	15	192	95	.	.	.	.	.	192	.
1160	10	243	184	.	.	.	.	.	243	.
1180	7	253	181	.	.	.	.	.	253	.
1200	10	160	116	.	.	193	33	.	193	.
1210	5	129	65	.	.	.	.	.	129	.

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben in Metern unter NN !

BHRG	QL	QET	QEU	QETU	QESG	QELGMG
20	100	0	47	47	111	.
50	94	36	16	52	70	.
65	22	9	0	9	16	26
180	40	0	40	40	48	39
190	104	10	24	34	128	4
200	129	70	0	70	61	.
410	50	6	25	31	77	.
470	45	41	0	41	10	4
480	122	.	56	93	109	.
484	121	49	35	84	139	.
500	125	21	3	24	76	41
503	134	25	3	28	72	43
510	67	.	53	53	53	10
515	68	0	53	53	53	13
520	48	38	0	38	.	32
524	26	26	0	26	5	35
530	28	4	0	4	34	50
540	32	32	0	32	29	.
550	149	.	31	112	77	7
560	75	34	27	61	109	.
570	.	0	.	.	24	34
630	134	37	23	60	69	5
640	19	0	19	19	8	.
650	83	39	0	39	105	39
654	128	36	9	45	103	31
670	85	64	0	64	74	.
720	85	69	3	72	18	6
840	56	.	0	44	66	23
841	52	20	28	48	53	32
850	47	30	12	42	18	.
860	84	37	41	78	6	22
880	24	24	0	24	.	.
940	91	16	8	24	60	27
970	155	47	20	67	75	26
980	27	16	11	27	.	.
1020	92	15	30	45	146	.
1070	21	21	12	33	36	15
1110	123	99	24	123	75	15
1120	54	57	5	62	72	29
1130	105	71	10	81	71	9
1150	95	66	20	86	9	.
1160	94	35	16	51	121	23
1180	91	52	16	68	102	11
1200	116	55	14	69	47	.
1210	61	12	17	29	36	.

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben in Metern unter NN !

BHRG	RECHTS	HOCH	NN	ETNN	QHNN	QWNN	MQW	QSNN	MQS	QHOLNN
1220	56685	77047	24	180	-21	.	.	18	18	39
1230	56530	76871	25	180	-23	2	25	26	25	32
1251	57604	76285	25	326	-23	-6	17	31	37	64
1260	57018	77925	24	204	.	-3	21	46	49	70
1270	56381	76762	25	211	.	-14	11	24	38	26
1340	57677	79107	21	223	-19	-4	15	40	43	43
2110	57917	78263	20	117	.	-5	15	115	120	117
2120	57921	78272	20	230	.	-6	14	115	121	120
2121	57911	78254	20	224	.	1	21	113	112	118
2122	57891	78190	20	211	.	-8	12	109	117	114
2123	57863	78361	21	198	.	-6	15	111	116	116
2125	57760	77777	23	201	.	1	24	113	112	118
2127	58454	78360	20	182	.	-8	12	70	78	84
2210	56145	76828	25	218	-23	-10	13	41	51	50
2220	56129	76835	25	220	-22	-7	15	44	51	54
2221	56153	76860	26	230	-24	-10	14	49	59	54
2222	56116	76829	26	89	-25	-12	13	53	65	58
2223	56145	76820	25	231	.	-9	16	40	49	49
2224	56220	76920	25	205	-24	-5	19	33	38	37
2225	56094	76924	25	252	.	-11	14	66	77	71
2226	56120	76755	25	168	.	-9	16	34	43	43
2227	56020	76385	25	142	-22	-7	15	23	30	27
2228	56240	77070	24	211	.	-4	20	28	32	33
2229	56070	77215	25	226	-22	-10	12	30	40	36
2320	57821	79633	16	220	-15	-11	4	5	16	12
2321	57835	79605	16	308	-10	.	.	22	22	29
2322	57785	79645	16	332	-13	.	.	1	1	12
2323	57825	79665	16	325	-15	-13	2	2	16	13
2324	57810	79754	16	334	-12	.	.	27	27	31
2325	57720	79630	16	335	-14	-11	3	10	21	15
2326	57451	79540	20	330	-19	-13	6	21	35	26
2327	58110	79911	16	227	-14	-9	5	40	50	43
2328	57930	79470	17	257	-15	-9	6	49	58	53
2329	57415	79281	20	291	-19	-10	9	0	10	7
3010	56801	76988	24	204	-21	3	24	16	13	26
3020	58749	78070	21	302	.	-3	18	104	107	109
3030	58519	78765	20	307	.	-12	8	98	109	104
3080	55733	76691	24	260	.	-6	18	32	38	37
3100	56275	76901	25	254	.	-5	20	25	30	30
3110	56760	76427	26	268	.	-5	21	45	50	50
3120	57341	78051	22	248	.	8	30	65	57	70
3130	57671	77587	23	283	.	-8	15	100	108	105
3140	58311	77464	23	296	.	-17	6	81	98	85
3152	56763	77395	23	280	.	5	28	72	67	78
3154	56698	77542	23	305	.	-7	16	70	77	74

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben (außer NN) in Metern unter NN !

BHRG	MQHOL	QENN	MQE	QPENN	MQPE	TNN	MT	KRNN	YTOPNN	ZTOPNN
1220	21	115	76	125	10	177	52	180	180	.
1230	6	104	72	148	44	.	32	180	180	.
1251	33	181	117	.	.	324	143	.	324	.
1260	24	162	92	.	.	201	39	203	203	.
1270	2	132	106	197	65	210	13	211	.	.
1340	3	172	129	.	.	221	49	.	221	.
2110	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2120	6	230	110	.	.	.	.	.	230	.
2121	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2122	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2123	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2125	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2127	14	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2210	9	130	81	209	79	215	6	.	215	.
2220	10	135	81	214	79	.	.	.	.	.
2221	5	141	87	216	75	.	14	.	230	.
2222	5	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2223	9	130	81	210	80	230	20	.	230	.
2224	4	129	92	192	63	204	12	.	204	.
2225	5	171	100	234	63	.	18	.	252	.
2226	9	100	57	143	43	.	25	.	168	.
2227	4	62	36	107	45	137	30	.	137	.
2228	5	128	96	157	29	201	44	.	201	.
2229	5	122	87	.	.	223	101	.	223	.
2320	7	219	207	.	.	.	.	.	.	.
2321	7	227	199	.	.	.	81	.	308	.
2322	11	182	170	.	.	.	.	.	.	.
2323	11	200	187	.	.	.	125	.	325	.
2324	4	166	136	.	.	.	.	.	.	.
2325	6	164	149	.	.	.	.	.	.	.
2326	5	118	92	.	.	.	.	.	.	.
2327	3	198	155	.	.	226	28	.	226	.
2328	4	222	169	.	.	256	34	.	256	.
2329	7	149	142	.	.	290	141	.	290	.
3010	10	88	62	.	.	106	18	.	106	173
3020	5	151	42	.	.	183	32	.	183	268
3030	6	278	174	.	.	.	.	.	.	278
3080	5	93	56	177	84	194	17	.	194	232
3100	5	123	93	183	60	225	42	.	225	235
3110	5	220	170	.	.	223	3	224	224	246
3120	5	192	122	.	.	221	29	.	221	236
3130	5	213	108	.	.	228	15	.	228	239
3140	4	265	181	.	.	.	.	.	265	265
3152	6	161	83	.	.	222	61	.	222	230
3154	4	143	69	.	.	203	60	.	203	230

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben in Metern unter NN !

BHRG	QL	QET	QEU	QETU	QESG	QELGMG
1220	44	30	7	37	28	21
1230	31	8	0	8	34	31
1251	74	17	40	57	46	.
1260	79	54	6	60	32	.
1270	6	0	7	7	39	61
1340	117	42	32	74	55	.
2110	.	.	.	.	.	.
2120	66	41	21	62	29	19
2121	87	.	57	57	30	19
2122	97	.	40	61	36	.
2123	77	.	25	64	16	3
2125	78	.	26	58	20	5
2127	98	.	5	72	26	.
2210	7	0	8	8	30	45
2220	8	8	1	9	30	43
2221	.	0	.	.	43	44
2222	18	.	19	19	.	.
2223	5	6	0	6	28	47
2224	11	1	0	1	23	49
2225	7	7	0	7	24	69
2226	3	4	0	4	31	23
2227	4	0	4	4	22	10
2228	4	4	0	4	21	51
2229	7	8	3	11	36	42
2320	162	74	17	91	104	14
2321	133	115	11	126	68	5
2322	126	27	0	27	121	22
2323	90	0	78	78	94	25
2324	118	59	0	59	77	.
2325	87	8	22	30	119	.
2326	89	0	71	71	21	.
2327	118	46	0	46	61	33
2328	117	95	16	111	52	6
2329	125	95	0	95	46	.
3010	48	22	16	38	24	.
3020	29	0	29	29	13	.
3030	63	50	0	50	115	10
3080	27	5	0	5	32	29
3100	5	0	5	5	35	53
3110	166	29	27	56	114	.
3120	91	25	62	87	35	.
3130	66	18	44	62	35	11
3140	72	55	10	65	97	21
3152	21	0	17	17	8	58
3154	24	0	12	12	12	45

! Nur Bohrungen mit Holstein-Serien !

! Alle Höhen- / Tiefenangaben in Metern unter NN !