

**DECKBLATT**

Projekt	FSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Ifd. Nr.	Rev.
EU 417	9K	284100	HG	RB	0053	00

Titel der Unterlage:

Zur Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands,  
Band 1 - Text

Seite:

I.

Stand:

23.04.91

Ersteller:

BGR

Textnummer:

Stempelfeld:

PSP-Element TP: 2122354

zu Plan-Kapitel: 3.1.9.6.4

PL  
24.04.1991

Freigabe für Behörden

PL  
24.04.1991

Freigabe im Projekt

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS.

# Revisionsblatt

**BfS**

<b>EU 417</b>	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
	9K	284100		HG	RB	0053	00

<b>Titel der Unterlage:</b> Zur Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands, Band 1 - Text	<b>Seite:</b> <div style="text-align: center; font-size: 1.2em;"><b>II.</b></div>
	<b>Stand:</b> 23.04.91

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision

\*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur  
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung  
 Kategorie S = substantielle Änderung  
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE  
HANNOVER

Zur Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands  
Band 1 - Text

Sachbearbeiter:

Datum:

Archiv.-Nr.:

Tagebuch-Nr.:

Anlagen:

  
April 1991

108 262

10659/91

Band 2 (2 Anlagen)

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen . . . . .	II
Verzeichnis der Tabellen . . . . .	IV
Verzeichnis der Anlagen (Band 2) . . . . .	IV
0. Zusammenfassung . . . . .	1
1. Einleitung . . . . .	4
1.1 Zur Entstehung des Salinitätsprofils im Bereich der Schachtanlage Konrad . . . . .	4
1.2 Veranlassung . . . . .	11
2. Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands . . . . .	14
2.1 Wässer aus Tiefbohrungen im Gebiet der ehemaligen DDR . . . . .	14
2.2 Wässer aus Tiefbohrungen Nord- und Nordwestdeutschlands . . . . .	18
2.2.1 Archivdaten des NLFb . . . . .	18
2.2.1.1 Datenbasis . . . . .	18
2.2.1.2 Vertikale Verteilung der Salzgehalte . . . . .	20
2.2.1.3 Chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer . . . . .	31
2.2.2 Wasseranalysen der Firma Wintershall_ . . . . .	38
3. Schlußfolgerungen . . . . .	47
4. Literaturverzeichnis . . . . .	50

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Gesamtkonzentration von Formationswässern aus den Süden der USA in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage
- Abb. 2: Beziehung zwischen Salinität, chemischer Zusammensetzung und Teufe in mesozoischen Formationswässern Dänemarks (nach [REDACTED] 1989)
- Abb. 3: Berechnete und gemessene vertikale Dichteverteilung der Porenwässer im Bereich der Schachtanlage Konrad
- Abb. 4: Gesamtkonzentration der Formationswässer des Nordteils der ehemaligen DDR und des Thüringer Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (aus [REDACTED] 1975)
- Abb. 5: Gesamtkonzentration von Formationswässern Nord- und Nordwestdeutschlands in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage
- Abb. 6: Lage der permischen und mesozoischen Salinare im nördlichen Mitteleuropa (aus [REDACTED] 1971)
- Abb. 7: Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Zechstein - Karbon)
- Abb. 8: Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Jura - Buntsandstein)
- Abb. 10: Chloridgehalte der Randsenkenwässer in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage
- Abb. 11: Chloridgehalte der Randsenkenwässer des "Gifhorner Troges" in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage
- Abb. 12: Chloridgehalte der Randsenkenwässer in Abhängigkeit von der normierten Teufe (= Quotient Tiefenlage/Teufe Salinar)
- Abb. 13: Beziehung zwischen Chlorid und Natrium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens
- Abb. 14: Beziehung zwischen Chlorid und Calcium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens
- Abb. 15: Beziehung zwischen Chlorid und Magnesium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

- Abb. 16: Beziehung zwischen Chlorid und Kalium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens
- Abb. 17: Wasseranalysen der Firma [REDACTED]; Chloridkonzentration der Formationswässer des Postsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Tertiär - Keuper)
- Abb. 18: Wasseranalysen der Firma [REDACTED]; Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Muschelkalk - Buntsandstein)
- Abb. 19: Wasseranalysen der Firma [REDACTED]; Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Zechstein - Karbon)
- Abb. 20: Analysen der Firma [REDACTED]; Beziehung zwischen Chlorid und Natrium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens
- Abb. 21: Analysen der Firma [REDACTED]; Beziehung zwischen Chlorid und Magnesium in den Formationswässern des Niedersächsischen Beckens
- Abb. 22: Analysen der Firma [REDACTED]; Beziehung zwischen Chlorid und Calcium in den Formationswässern des Niedersächsischen Beckens
- Abb. 23: Analysen der Firma [REDACTED]; Beziehung zwischen Chlorid und Kalium in den Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1: Gegenüberstellung des Analysendatums und der Zahl der durchgeführten Analysen
- Tab. 2: Gegenüberstellung der stratigraphischen Einheiten und der Anzahl der Wasseranalysen
- Tab. 3: Zusammenstellung des prozentualen Anteils analysierter Ionen
- Tab. 4: Analysen der Firma [REDACTED]  
Gegenüberstellung des Analysendatums und der Zahl der durchgeführten Analysen
- Tab. 5: Analysen der Firma [REDACTED]  
Gegenüberstellung der stratigraphischen Einheiten und der Anzahl der Wasseranalysen

Verzeichnis der Anlagen (Band 2)

- Anlage 1: Wasseranalysen aus Tiefbohrungen in Nord- und Nordwestdeutschland (Archivdaten des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung)
- Anlage 2: Wasseranalysen aus Tiefbohrungen in Nord- und Nordwestdeutschland (Analysen der Firma [REDACTED])

## 0. Zusammenfassung

In einer im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens Konrad von der BGR erarbeiteten Stellungnahme zur Auswirkung der Tiefenwasser-salinität auf die Porenwasserbewegung im Umfeld der Schachtanlage Konrad ("Erläuternde Unterlage" EU 338) wird die Auffassung vertreten, daß das im Bereich der Grube vorhandene vertikale Salinitätsprofil als Beleg für weitgehend fehlende advective Wasserbewegungen und für im wesentlich diffusiv gesteuerte vertikale Transportvorgänge zwischen salzgesättigten Formationswässern im Untergrund der Grube und der Oberfläche zu werten sei. Es wird darauf verwiesen, daß die den Aussagen zur Langzeitsicherheit des Endlagers zugrunde liegenden hydraulischen Modellrechnungen zu erheblich kürzeren Wasserlaufzeiten vom Endlager zur Biosphäre führen, als bei Berücksichtigung der vorhandenen Dichteverteilung zu erwarten wäre.

NLFB als Gutachter der Genehmigungsbehörde stimmte dieser Argumentation nur insoweit zu, als Salinität, chemische Zusammensetzung und Isotopengehalte der Tiefenwässer als Belege für ein hohes Wasseralter gewertet werden und die sich aus den Modellrechnungen der Genehmigungsbehörde ergebenden kurzen Wasserlaufzeiten nicht in Einklang mit diesen Naturdaten stehen.

Der Argumentation der BGR, daß das vorhandene Salinitätsprofil der Porenwässer im Grubenbereich auf Diffusion als dominierenden Transportmechanismus hindeutet, konnte das NLfB nicht uneingeschränkt folgen. Es wurde darauf verwiesen, daß aus dem Teufenbereich unterhalb der Grube keine gemessenen Daten vorliegen und es wurden von BGR zusätzliche Nachweise zur Salinitätsverteilung innerhalb und außerhalb des Modellgebietes Konrad gefordert. Dazu sollten entsprechende Daten der Erdölindustrie ausgewertet werden.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes werden insgesamt 1462 Analysen von Formationswässern aus Kohlenwasserstoffexplorations- und -Produktionsbohrungen im Bereich des Niedersächsischen Beckens in Hinblick auf diese Fragestellung ausgewertet. Es handelt sich dabei etwa 779 Datensätze aus dem Archiv des NLfB, welche im Rahmen des Erdölgeologischen Austausches an das NLfB geliefert wurden, sowie Wasseranalysen, die von der Firma [REDACTED] zur Ver-

fügung gestellt wurden.

Aus der Auswertung der Daten ergibt sich, daß bei den Formationswässern des Sedimentkomplexes Tertiär bis Rhät aus dem Hangendbereich der Salinare keine lineare Korrelation zwischen Salzgehalt und Tiefe besteht. Kennzeichnend ist stattdessen eine starke, von der Entnahmetiefe weitgehend unabhängige Streuung der Salzgehalte.

Aus einer zusammenfassenden Arbeit über Chemismus und Salinität der Tiefenwässer im Gebiet der ehemaligen DDR von [REDACTED] (1975) ergibt sich demgegenüber eine eindeutige lineare Korrelation zwischen Salzgehalt und Teufenlage.

Formationswässer aus den Salinaren und aus Wasserleitern im Liegenden der Salinare des Niedersächsischen Beckens sind nur zum geringeren Teil an gelösten Salzen gesättigt, zum größeren Teil deutlich, meist erheblich untersättigt. Entsprechende Wässer aus dem Bereich der früheren DDR sind demgegenüber durchgängig salzgesättigt.

Anhand der chemischen Zusammensetzung der Wässer läßt sich zeigen, daß nicht gesättigte Formationswässer aus dem Bereich der Salinare mit hoher Wahrscheinlichkeit sekundär durch gering mineralisierte Wässer, vermutlich durch Verunreinigung mit Bohrspülung, verdünnt und dadurch verfälscht wurden.

Eine entsprechende Verfälschung auch der Wasserproben aus dem Wasserleitern im Hangendbereich der Salinare wird ebenfalls für wahrscheinlich erachtet. Dafür sprechen sowohl die chemische Zusammensetzung der Wässer als auch die Tatsache, daß die Wässer aus dem Niedersächsischen Becken im Vergleich zu den Formationswässern aus dem Gebiet der ehemaligen DDR tendenziell niedrigere Salzgehalte aufweisen.

Das der BGR zugänglich gemachte Datenmaterial über die chemische Beschaffenheit von Tiefenwässern aus Niedersachsen ist daher mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht geeignet, Aussagen über die Exis-

tenz eines linearen Dichte- und Salinitätsprofils im Modellgebiet Konrad außerhalb des aufgeschlossenen Bereiches abzuleiten.

Die in der "Erläuternden Unterlage" EU 338 (■■■■■ 1990a) getroffenen Feststellungen über die Entstehung der Tiefenwässer in der Grube Konrad und ihre Bewegung werden dadurch weder eingeschränkt noch widerlegt.

## 1. Einleitung

### 1.1 Zur Entstehung des Salinitätsprofils im Bereich der Schachtanlage Konrad

In dem im Jahre 1988 abgefaßten zusammenfassenden Bericht der BGR zum Chemismus der Tiefenwässer aus der Grube Konrad wird erstmals darauf verwiesen, daß innerhalb des Korallenoolith im aufgeschlossenen Teufenbereich von 800 m bis 1300 m der Salzgehalt der Wässer "näherungsweise linear zur Teufe hin ansteigt" (■■■■■ 1988).

Im Bericht wird ferner darauf verwiesen, daß sich Salinität und chemische Zusammensetzung der Wässer des Hilssandstein im Hangenden des Korallenoolith trotz unterschiedlicher lithologischer Zusammensetzung der Wasserleiter und deren räumliche Trennung durch gering wasserleitende Tonsteine an diese Entwicklung anpassen. Zu einem späteren Zeitpunkt aus dem "Cornbrash" entnommene Wasserproben ergaben, daß chemische Zusammensetzung und Salzgehalt der "Cornbrash"-Wässer mit Wässern des Korallenoolith der entsprechenden Teufenlage übereinstimmen. Der Befund wurde dahingehend interpretiert, "daß im Bereich der Grube eine näherungsweise horizontale, formationsübergreifende Salinitätsschichtung besteht, durch welche der Salzgehalt der Wässer - unabhängig von lithologischer Ausbildung und stratigrafischer Position des Wasserleiters - allein von der Teufenlage des Entnahmeortes bestimmt wird" (■■■■■ 1990).

Eine befriedigende Erklärung hinsichtlich der Entstehung dieses Salinitätsgradienten konnte zunächst nicht gefunden werden. Andererseits ergaben sich aus Veröffentlichungen über den Chemismus und die Genese von Tiefenwässern zahlreiche Hinweise auf bestehende vertikale Salinitätsgradienten in Porenwässern insbesondere in Sedimentbecken, in denen Evaporitfolgen im tieferen Untergrund vorhanden sind:

So verweist ■■■■■ (1969) in einer zusammenfassenden Arbeit über Erdölwässer aus dem Mississippi-Becken und angrenzenden Gebieten darauf, daß in den Sedimentbecken im Süden der Vereinigten Staaten die Salzgehalte der Wässer - unabhängig von Lithologie und fazialer Ausbildung der Wasserleiter - über Teufen von mehreren tausend Metern mit Gradienten von 50 bis 300 mg/l/m linear ansteigen

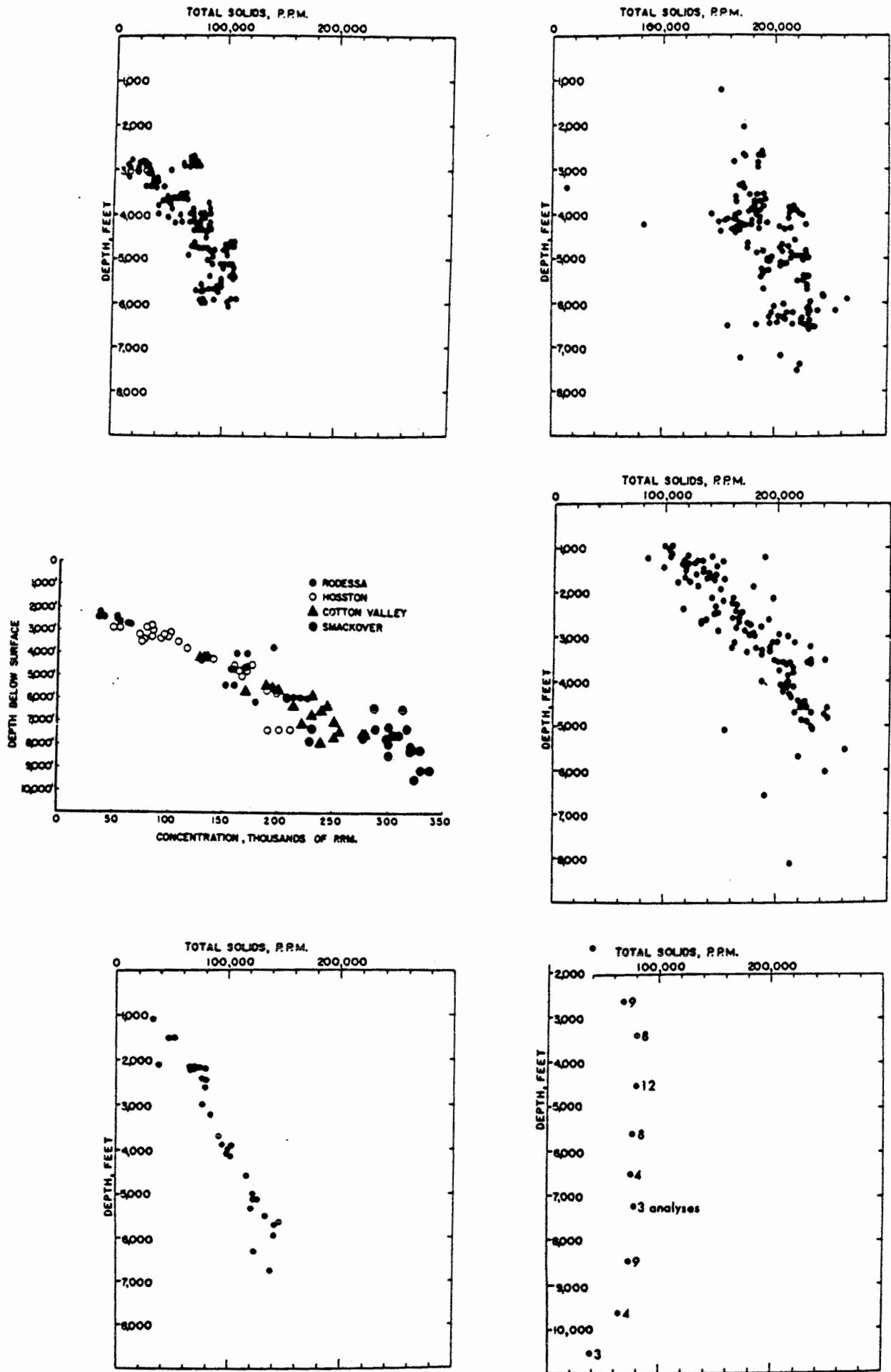


Abb. 1: Gesamtkonzentration von Formationswässern aus dem Süden der USA in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

(Abb. 1). Abweichungen vom allgemeinen Trend ergeben sich nur in Beckenrandlagen im Übergangsbereich zu den Rocky Mountains infolge der Intrusion gering mineralisierter oberflächennaher Grundwässer und im Küstenbereich des Golfes von Mexiko. Im Gebiet des Golfes von Mexiko kommt es infolge aufwärts gerichteter Porenwasserströme aus gering konsolidierten Sedimenten in größeren Tiefen zu einer Umkehr des Salinitätsgradienten.

Der Autor zitiert ferner Arbeiten russischer Autoren, die einen linearen Anstieg der Salzgehalte auch für die Wolga-Ural-Region belegen.

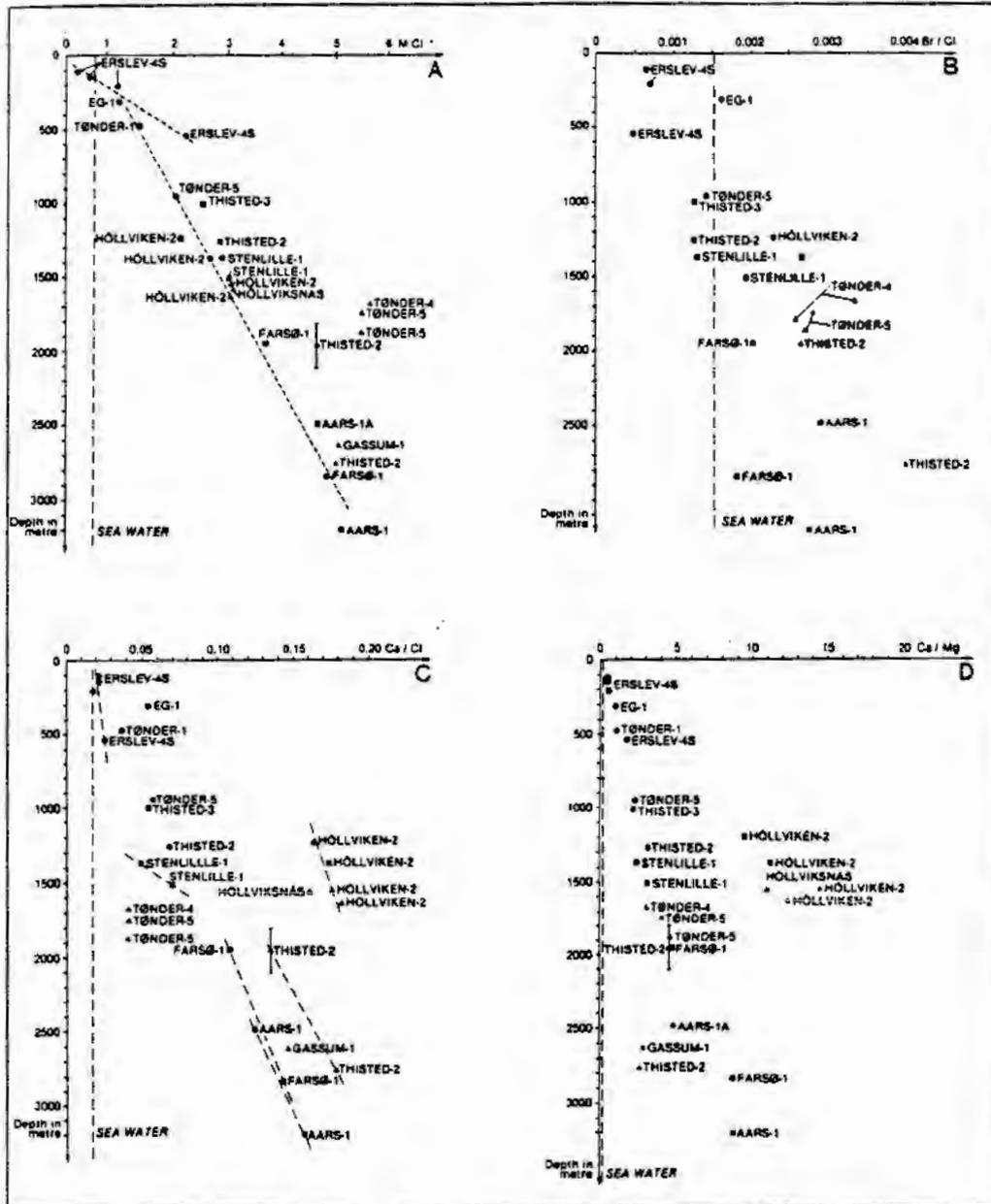
Weitere Hinweise auf eine lineare vertikale Zunahme der Lösungsinhalte von Formationswässern in Sedimentbecken im Süden der Vereinigten Staaten finden sich auch in Arbeiten von [REDACTED] (1974) und [REDACTED] (1987).

Aus einer Veröffentlichung von [REDACTED] (1989) über mesozoische Formationswässer Dänemarks (Abb. 2) ergeben sich ebenfalls Hinweise auf einen vertikalen linearen Anstieg der Salzgehalte.

Schließlich weisen [REDACTED] (1975) in einer zusammenfassenden Arbeit über Wässer aus Tiefbohrungen aus dem Bereich der damaligen DDR für den Schichtenkomplex Tertiär bis Rhät ebenfalls eine direkte (lineare) Abhängigkeit zwischen Konzentration und Tiefenlage der Wässer nach (vgl. Kap.2.1).

Während also einerseits vielfältige Hinweise auf eine vertikale lineare Salinitätsverteilung in Porenwässern tiefliegender Formationen existieren, bestehen bei den Autoren andererseits wenig konkrete Vorstellungen hinsichtlich der Entstehung des Salinitätsgradienten.

So beantwortet [REDACTED] (1987) die Frage nach der Ursache für die Dichte- und Salinitätsschichtung in Formationswässern mit der Vermutung, daß Porenwasserbewegungen in Sedimentbecken vermutlich ungehindert über geologische Zeiträume hinweg erfolgen können und



Variation in formation water chemistry with depth. . Early-Middle Triassic, . Late Triassic-Jurassic, . Cretaceous.

Abb. 2: Beziehung zwischen Salinität, chemischer Zusammensetzung und Tiefe in mesozoischen Formationswässern Dänemarks (nach [redacted] 1989)

sich hierdurch eine Dichteschichtung herausbildet.

In einer Arbeit von [REDACTED] (1970) wird untersucht, ob und in welchem Maße ein gravitatives Absinken gelöster Ionen, bzw. thermoelektrische Effekte an Tonmembranen zu einer Anreicherung gelöster Salze und damit zur Herausbildung eines Salinitätsgradienten führen können. Die Autoren kommen anhand theoretischer Ableitungen zum Schluß, daß die genannten Effekte allenfalls zu einer geringfügigen Modifizierung bestehender Salzverteilungen führen können.

Einigkeit besteht in neueren Arbeiten lediglich in der Ablehnung der Hypothese der Ultrafiltration als Ursache der Salinitäts- und Dichteschichtung von Formationswässern in tiefen Sedimentbecken:

Anhänger dieser Hypothese entwickelten in den sechziger Jahren die Vorstellung, daß Tonminerale permeabel für Wassermoleküle, nicht aber für geladene Ionen sind, und es somit bei der Durchströmung von Tonsteinformationen zu einer fortschreitenden Anreicherung gelöster Ionen in den Porenwässern und einer entsprechenden Abreicherung der Filtrate kommen kann ([REDACTED] 1959, [REDACTED] 1963, [REDACTED] 1973, [REDACTED] 1968). Der vertikale lineare Anstieg der Salzgehalte wird durch den mit ansteigendem Überlagerungsdruck zunehmenden Wirkungsgrad der Tonmembranen erklärt. Experimentelle Untersuchungen bestätigten grundsätzlich die Membranfilterwirkung von Tonen bei hohen Drücken und Auflasten, zeigten gleichzeitig jedoch einen mit zunehmenden Salzgehalt der Wasser stark abnehmenden Wirkungsgrad der Tonmembranen ([REDACTED] 1973, [REDACTED] 1985).

Die Übertragbarkeit dieser Laborexperimente auf natürliche Systeme und damit die Wirksamkeit von tonigen Sedimenten als Ionensiebe überhaupt wird in neueren Arbeiten durchgängig in Frage gestellt (vgl. [REDACTED] 1987, [REDACTED] 1989). Als Gründe werden genannt :

- Die Laborexperimente wurden mit extremen Druckgradienten von bis zu mehreren 100 bar durchgeführt. [REDACTED] (1968) ver-

muten daher, daß die in natürlichen hydraulischen Systemen zu beobachtenden Druckgradienten von Porenwässern generell unzureichend für eine wirksame Rückhaltung von Ionen in Wasser sind.

- Selbst bei Übertragung der experimentell ermittelten Anreicherungsfaktoren von maximal wenigen Zehnerprozenten auf natürliche Systeme wäre ein Wasserdurchsatz durch geringdurchlässige Schichten von einem Vielfachen des Sedimentvolumens erforderlich, um Salzkonzentrationen von einem mehrfachen der Ausgangskonzentration des Meerwassers zu erzeugen (■■■■■ 1978).
- Der Wirkungsgrad der Tonmembranfilter in Experimenten ist mit zunehmendem Salzgehalt der Lösungen rückläufig und tendiert bei hochkonzentrierten Lösungen mit Lösungsinhalten von mehreren mol/l gegen null (■■■■■ 1974). Allein hieraus läßt sich ableiten, daß der überwiegende Teil der Tiefenwässer nicht durch Ionensiebeffekte entstanden sein kann. Ein abnehmender Wirkungsgrad der Tonmembranfilter ist zudem nur schwer mit der vorhandenen vertikalen linearen Salinitätszunahme in Einklang zu bringen.
- Bei der selektiven Rückhaltung gelöster Ionen durch Membranfilter baut sich zwischen Ausgangslösung und Filtrat in Abhängigkeit vom Konzentrationsunterschied beider Lösungen ein osmotisches, dem hydraulischen Druckgradienten entgegengerichtetes Potential auf. Typische osmotische Drücke in Lösungen mit Meerwasserzusammensetzung liegen mit 7,1 atm bei einer einprozentigen Salzlösung und 350 atm bei einer 25-prozentigen Lösung (■■■■■ 1968) um Größenordnungen über den hydraulischen Gradienten geologischer Systeme.

Ein Erklärungsansatz zur Entstehung des linearen Salinitätsgradienten ergab sich den Ergebnissen hydraulischer Süß-/Salzwasser Modellrechnungen, welche im Referat B 2.24 werden seit dem Jahre 1989 durchgeführt werden. Mit diesen Modellrechnungen wird an vereinfachten vertikalen Schnitten durch das Modellgebiet Konrad die

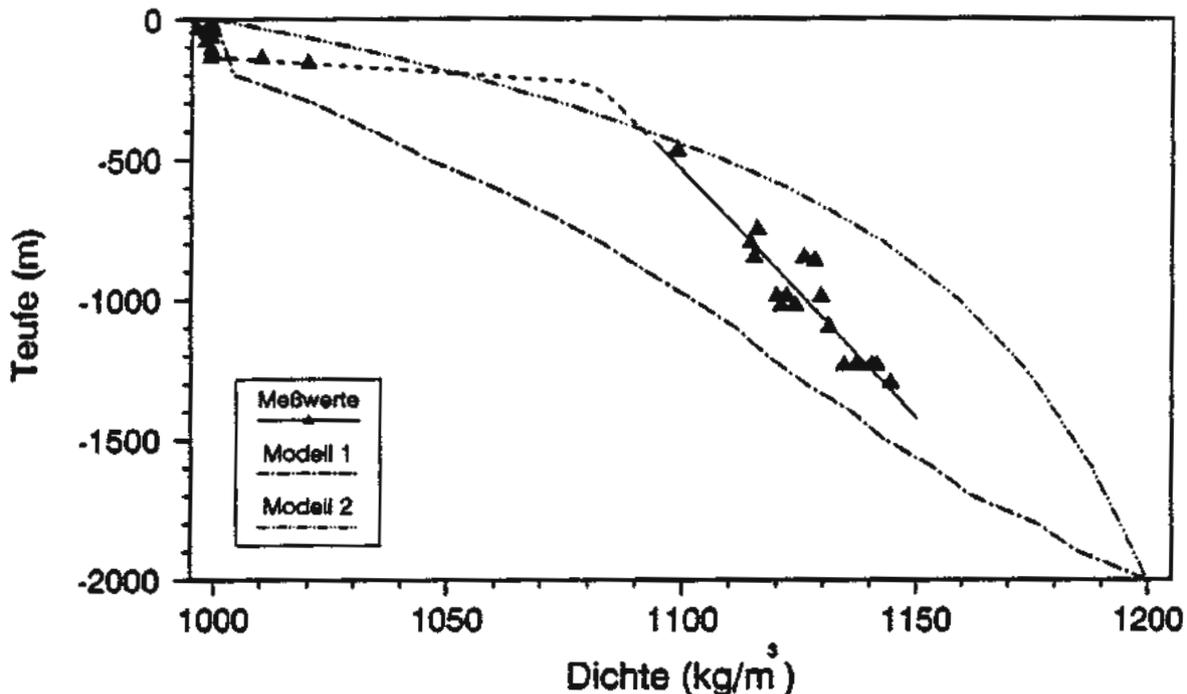


Abb. 3: Berechnete und gemessene vertikale Dichteverteilung der Porenwässer im Bereich der Schachtanlage Konrad

Auswirkung im Untergrund vorhandenen Salzlager auf die Tiefenwasserbewegung im Raum Konrad untersucht ( [redacted] 1990a, 1990b). Die weitgehende Übereinstimmung zwischen der errechneten räumlichen Verteilung der Salzgehalte und Dichten der Wässern und den gemessenen Daten (vgl. Abb. 3) ermöglichte nunmehr eine sinnvolle Deutung des Sachverhalts, daß im Bereich der Grube die Salzgehalte der Wässer linear zur Tiefe hin zunehmen.

Aus den Ergebnissen der Modellrechnungen läßt sich ableiten, daß Porenwasserbewegungen - anders als in Süßwassermodellen - nur sehr untergeordnet stattfinden und stattdessen der diffusive Transport gelöster Salze zwischen den Salinaren und der Oberfläche in den Vordergrund tritt. Der konstante Salinitätsgradient ist dabei Beleg für einen im Gleichgewichtszustand befindlichen diffusiven Transportvorgang.

- Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Modellrechnungen und auf einer Arbeit von [redacted] (1978) wurde die Hypothese entwickelt, daß die Entstehung der Tiefenwässer aus dem Bereich der Grube in

engem Zusammenhang mit im wesentlichen diffusiven Transportvorgängen zwischen Salzlagern im tieferen Untergrund unterhalb der Grube und der Erdoberfläche zu sehen ist. Dieser angenommene diffusive Salztransport muß über geologische Zeiträume zu einer zur Tiefe hin zunehmenden Überprägung der chemischen Zusammensetzung ursprünglich vorhandener mariner Porenwässer und zur Ausbildung einer linearen Salinitätsverteilung in den Wässern geführt haben (██████████ 1990b).

## 1.2 Veranlassung

Aus dem BGR-Modell zur Entstehung der Konrad-Wässer (██████████ 1990b) läßt sich ableiten, daß es sich bei dem Wässern im Bereich der Grube im wesentlichen um originäre Formationswässer handelt, deren Alter nicht wesentlich vom Alter der Gesteine abweicht. Dieser Befund wird auch durch die Isotopenzusammensetzung der Wässer gestützt (vgl. ██████████ 1990b, Kap. 3.7). Von seiten des Antragstellers wurde dies als zusätzlicher Hinweis darauf gewertet, daß die Ergebnisse von hydraulischen Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Raum Konrad, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik Süßwasserverhältnisse voraussetzen und zu Laufzeiten vom Endlager zur Biosphäre von mehreren hunderttausend Jahren führten, als konservativ anzusehen sind.

Begleitende Modellrechnungen der Genehmigungsbehörde führten aufgrund geänderter Randbedingungen in der Folgezeit zu sehr viel kürzeren Wasserlaufzeiten von wenigen zehntausend Jahren.

In einer von der BGR erarbeiteten Stellungnahme zu diesen Modellrechnungen ("Erläuternde Stellungnahme EU 338, ██████████ 1990a), die auf dem oben zitierten Modell zur Genese der Konrad-Wässer und den Ergebnissen der Süß-/Salzwasser-Modellrechnungen aufbaut, wurde die Auffassung vertreten, daß die in der Grube Konrad vorhandene lineare Salinitäts- und Dichteverteilung Beleg dafür ist, daß im Umfeld des geplanten Endlagers keine nennenswerte Grundwasser-

bewegung stattfindet und stattdessen die Diffusion gelöster Salze zwischen gesättigten Salzlösungen im Untergrund und der Oberfläche den dominierenden, mit sehr kleinen Transportraten ablaufenden Transportmechanismus darstellt (██████████ 1990a). Gelöste Schadstoffe aus dem Endlager würden daher ebenfalls vor allem dem diffusiven Transport unterliegen. Als Grund für die weitestgehend fehlende Grundwasserbewegung wird die Existenz der im Untergrund vorhandenen Salzablagerungen angesehen, die in der geologischen Vergangenheit zu einer Aufsatzung der Porenwässer führten. Die dadurch bedingte im Vergleich zu Süßwasser erhöhte Dichte bewirkt, daß das erhöhte Süßwasserpotential im Salzgitter Höhenzug als Antriebsmotor für tiefreichende Grundwasserbewegungen nicht wirksam werden kann.

Es wurde nochmals die Auffassung bekräftigt, daß die hydraulischen Modellrechnungen des Antragstellers zu erheblich kürzeren Wasserlaufzeiten führen, als bei Berücksichtigung der vorhandenen Dichteverteilung zu erwarten wäre, und daß somit die Modellrechnungen der Genehmigungsbehörde zu überkonservativen Ergebnissen führen.

Die vorgelegte Stellungnahme wurde Gegenstand intensiver, kontrovers geführter Diskussionen zwischen BGR als Vertreter des Antragstellers und dem als Gutachter des NMU. Strittig war dabei insbesondere die Frage, inwieweit der vorhandene konstante Dichtegradient Beleg für einen überwiegend diffusiven Stofftransport und damit für eine weitestgehende fehlende Grundwasserbewegung ist, oder ob er auch auf konvektive Transportvorgänge zurückgeführt werden kann.

Anlässlich einer Fachsitzung aller beteiligten Behörden und Fachinstitutionen beim NMU im Mai 1990 wurde dahingehend Übereinstimmung erzielt, daß Salinität, chemische Zusammensetzung und Isotopengehalte der Tiefenwässer Beleg für ein hohes Wasseralter sind und die sich aus den Modellrechnungen der Genehmigungsbehörde ergebenden kurzen Wasserlaufzeiten nicht in Einklang mit diesen Naturdaten stehen.

Der Argumentation der BGR, daß das vorhandene Salinitätsprofil der Porenwässer im Grubenbereich auf Diffusion als dominierenden

Transportmechanismus hindeutet, stimmte das NLfB nicht uneingeschränkt zu. Es wurde darauf verwiesen, daß aus dem Teufensbereich unterhalb der Grube keine gemessenen Daten vorliegen.

Von BGR wurden zusätzliche Nachweise zur Salinitätsverteilung innerhalb und außerhalb des Modellgebietes Konrad gefordert. Dazu sollten entsprechende Daten der Erdölindustrie ausgewertet werden.

Der vorliegende Bericht basiert auf einer Auswertung von insgesamt 779, im Archiv des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung vorhandenen, Analysen von Wässern aus Erdöl- und Erdgasbohrungen Nord- und Nordwestdeutschlands. Die Daten wurden vom NLfB im Rahmen der gutachtlichen Tätigkeit für das Planfeststellungsverfahren erhoben und zusammenfassend dokumentiert ( [REDACTED] 1990 ).

Parallel dazu wurden vom NLfB die im nord- und nordwestdeutschen Raum in der Kohlenwasserstoff-Prospektion und -Produktion tätigen Firmen gebeten, zusätzliche Analysen von Formationswässern zur Verfügung zu stellen. Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind dem NLfB mehr als 1500 weitere Analysen zugegangen, von denen im Rahmen des Berichtes aus Termingründen lediglich insgesamt 999 Analysen der Firma [REDACTED] berücksichtigt werden können.

Darüber hinaus wird auf eine zusammenfassende Arbeit über den Chemismus und die Salinität von Tiefenwässern im Gebiet der ehemaligen DDR von [REDACTED] (1975) eingegangen.

## 2. Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands

### 2.1 Wasser aus Tiefbohrungen im Gebiet der ehemaligen DDR

In einer zusammenfassenden Arbeit von [REDACTED] (1975) über die chemische Zusammensetzung, die Genese und die Hydrodynamik von Tiefenwässern aus dem Thüringer Becken und dem Nordteil der ehemaligen DDR wird u.a. auf die Beziehung zwischen den Salzgehalten der Formationswässer und der Tiefenlage eingegangen. [REDACTED] (1975) standen mehrere hundert Wasserproben (die genaue Zahl der Analysen bleibt ungenannt) aus Kohlenwasserstoffprospektionsbohrungen zur Verfügung. Die Proben entstammen der gesamten Schichtenfolge des Tertiär bis zum Karbon aus Tiefenlagen von 200 bis etwa 5000 m.

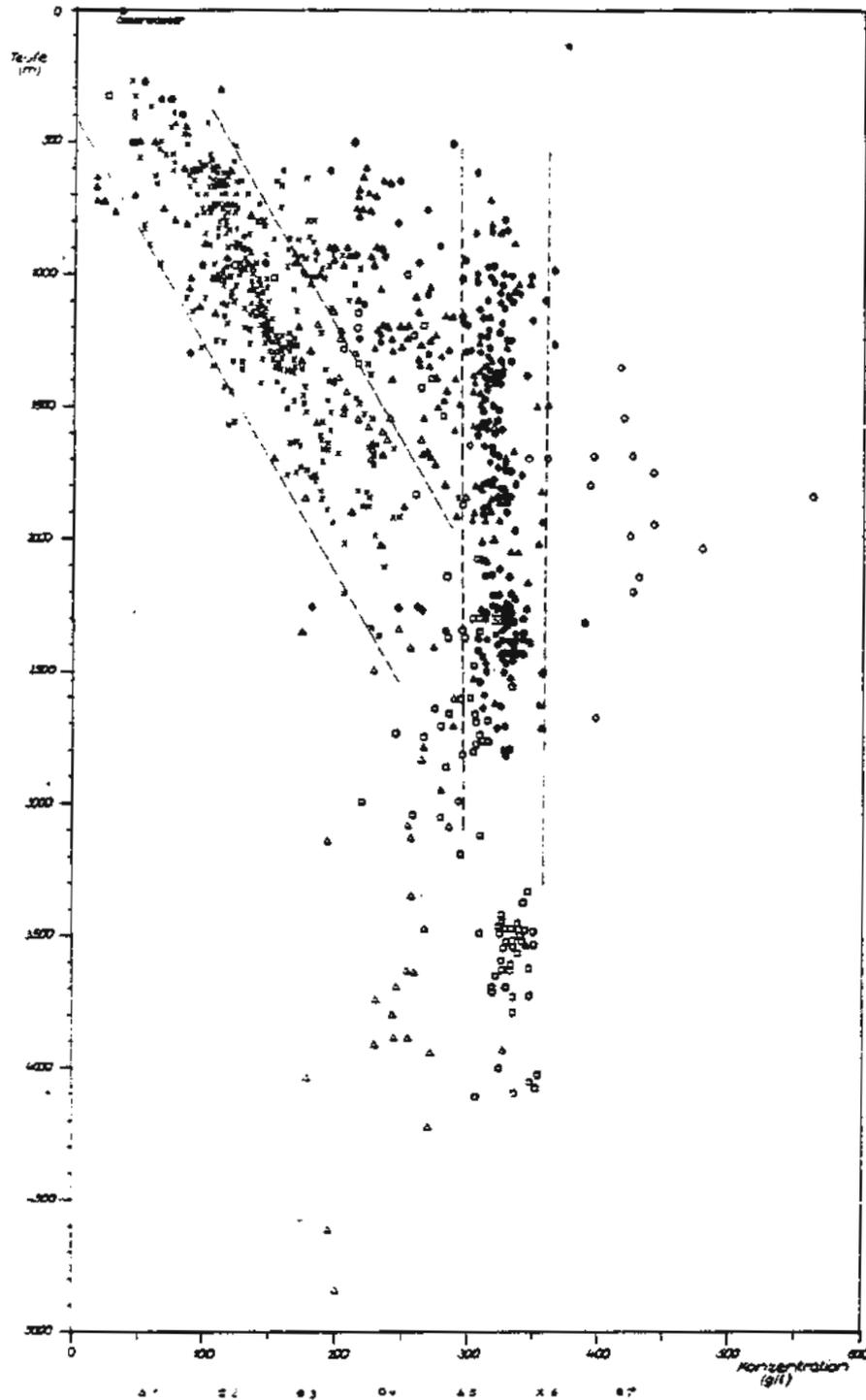
Die Autoren unterscheiden 6 verschiedene Typen von Tiefenwässern (vgl. Abb. 4):

#### 1. Wässer des Schichtenkomplexes Tertiär bis Rät

Bei den Wässern des Schichtenkomplexes Tertiär bis Rät besteht nach [REDACTED] (1975) "zwischen Konzentration und Teufenlage der Wässer eine direkte Abhängigkeit". Die Salzgehalte der Wässer schwanken bei Entnahmetiefen von 250 bis 2400 m zwischen 30 g/l und 250 g/l. Aus der Begrenzungslinien des Datfeldes läßt sich ein vertikaler Salinitätsgradient von 110 mg/l·m ableiten. Der entsprechend Wert im Bereich der Grube Konrad liegt mit 85 mg/l·m nur geringfügig unter diesem Wert.

#### 2. Buntsandsteinwässer

Bei den Buntsandsteinwässern handelt es sich um eine vergleichsweise inhomogene Gruppe von Wässern, deren Salzgehalte zwischen 1 g/l und 360 g/l schwanken. Nach [REDACTED] (1975) bestehen in den südlichen Randgebieten der Buntsandsteinverbreitung aktive Wasseraustauschverhältnisse, während in den becken tieferen Teilen "erschwerende bis stagnierende Verhältnisse" herrschen. Den beiden Untergruppen können in Abb. 4 zwei Datengruppen zugeordnet werden. Zur ersten Gruppe zählen Wässer aus geringen bis mittleren Entnahmetiefen mit vergleichsweise niedrigen Salzgehalten. Wässer der zweiten Unter-



1 - Präperm; 2 - Rotliegendes; 3 - Stäbfurtkarbonat; 4 - Plattendolomit; 5 - Trias; 6 - Komplex B&U - Unterkreide;  
7 - Tertiär

Abb. 4: Gesamtkonzentration der Formationswässer des Nordteils der ehemaligen DDR und des Thüringer Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (aus [redacted] 1975)

gruppe weisen, verglichen mit den Tertiär-Rät-Wässern, durchweg höhere Salzgehalte auf. Die Salzkonzentration in diesen Wässern reicht von etwa 200 g/l bis zur Sättigungskonzentration von 300 - 350 g/l, wobei bei einer Gruppe von Wässern sich eine lineare Beziehung zwischen Salzgehalt und Teufe andeutet. Ein Teil der Buntsandsteinwässer ist, unabhängig von der Tiefenlage, salzgesättigt.

### 3. Zechsteinwässer

█ (1975) unterscheiden zwei Gruppen von Zechsteinwässern:

Bei den Wässern aus dem Plattendolomit handelt es sich um magnesiumreiche, sehr hochkonzentrierte, gesättigte saline Restlösungen mit Salzkonzentrationen von bis zu 600 g/l. Die Wässer aus dem Staßfurtkarbonat sind zum überwiegenden Teil ebenfalls salzgesättigt. Bedingt durch geringere Magnesiumgehalte liegen die Gesamtsalzgehalte dieser Wässer mit 300 bis 350 g/l niedriger als in den Wässern aus dem Plattendolomit. Die Sauerstoff- und Wasserstoffisotopenzusammensetzung dieser Wässer weist nach Ansicht der Autoren auf "stagnierende Wasseraustauschverhältnisse" hin. Lediglich am Südrand des Zechsteinbeckens finden sich Hinweise auf "infiltrativ beeinflusste Wässer".

### 4. Wässer des Rotliegenden

Die Salzkonzentrationen in den Rotliegendewässern schwanken zwischen 40 und 360 g/l. Geringer konzentrierte Wässer treten wiederum nur in den Randbereichen der Rotliegendverbreitung auf. In diesen Gebieten besteht eine Korrelation zwischen Salzgehalt und Tiefenlage. Im Beckenzentrum liegen die Salzkonzentrationen mit 300 bis 350 g/l durchweg im Bereich der Salzsättigung. Nach █ (1975) ist in Teilgebieten eine deutliche Inversion der Salzkonzentration bzw. eine Salinitätsschichtung augenscheinlich.

### 5. Wässer des Präperms

Zu den Präpermwässern werden in █ (1975) keine näheren Angaben gemacht. Aus Abb. 4 läßt sich ableiten,

daß in Tiefenlagen unterhalb von 2500 m keine Teufenabhängigkeit der Salzgehalte gesteht. Die Salzgehalte der Wässer streuen im Bereich von 200 bis 300 g/l. Die Wässer sind somit durchweg nicht salzgesättigt. In geringeren Tiefenlagen von 1000 bis 1500 m ist bei den Wässern teilweise eine lineare Teufenabhängigkeit der Salzgehalte zu erkennen. Inwieweit diese Wässer aus Beckenrandlagen mit fehlender Zechsteinbedeckung entstammen, ist nicht nachvollziehbar.

Zusammenfassend ergibt sich aus der Arbeit von [REDACTED] (1975), daß die Verteilung der Salzgehalte in den Formationswässern und deren Beziehung zur Teufenlage und zur stratigraphischen Position des Wasserleiters insgesamt in Einklang mit dem Kap. 1.1 skizzierten Genesemodell für Tiefenwässer stehen:

Der vertikale lineare Anstieg der Salzgehalte in den Wässern des Schichtenkomplexes Tertiär - Rhät entspricht der Salinitäts- und Dichteverteilung, die sich bei einem vorherrschend diffusiven, vertikal zur Oberfläche gerichteten Stofftransport gelöster Salze im stationären Zustand einstellt.

Wässer aus wasserführenden Horizonten des Zechsteins sind in zentralen Beckenbereichen erwartungsgemäß salzgesättigt.

Weniger einfach zu interpretieren ist die Verteilung Salzgehalte der Wässer des Buntsandsteins. Dies erklärt sich u. a. auch dadurch, daß das Röt-salinar im Bereich der ehemaligen DDR nicht durchgängig vorhanden ist und eine regionale Zuordnung der Wässer anhand von Abb. 3 nicht möglich ist.

Der beim größeren Teil der Wässer erkennbare Salinitätsgradient kann im Sinne vertikal gerichteter diffusiver Transportvorgänge (aus dem Bereich des Zechsteinsalinars ?) gedeutet werden, während - unabhängig von der Teufenlage - salzgesättigte Wässer auf einen unmittelbaren Kontakt zu Salinarformationen hindeuten.

Wässer des Rotliegenden erreichen in den zentralen Beckenbereichen durchweg die Salz-Sättigungskonzentration. In Teilgebieten stehen diese Wässer in unmittelbarem Kontakt zum Rotliegend-Salinar. In Gebieten mit fehlendem Rotliegend-Salinar dürfte ein dichte-induzierter konvektiver und/oder diffusiv gesteuerter vertikaler

Stofftransport aus gesättigten Lösungen des überlagernden Zechsteinsalinars zu einer sekundären Aufsalzung der Porenwässer geführt haben.

Der in Teilbereichen anzutreffende inverse Salinitätsgradient innerhalb des Rotliegenden kann dahingehend interpretiert werden, daß in diesen Gebieten abwärts gerichteter diffusiv gesteuerter Stofftransport gelöster Salze des Zechsteinsalinars dominiert. Salzgehalte von 200 bis 300 g/l in den Wässern des Präperm in den zentralen Beckenbereichen belegen andererseits eine vergleichsweise geringere Überprägung vorhandener Porenwässer.

## 2.2 Wässer aus Tiefbohrungen Nord- und Nordwestdeutschlands

### 2.2.1 Archivdaten des NLFB

#### 2.2.1.1 Datenbasis

Bei den im Archiv des NLFB gegenwärtig vorhandenen 779 Datensätzen handelt es sich um Analysen von Formationswässern aus überwiegend im Bereich der Erdöl- und Erdgasfelder gelegenen Tiefbohrungen der Erdölindustrie (vgl. [REDACTED] 1990, Anhang 1), die im Rahmen des Erdölgeologischen Austausches an das NLFB geliefert wurden. Nicht berücksichtigt werden Analysen von Einpreßwässern, Vorlagewässern sowie durch Spülung stark verunreinigte Formationswässer, sofern darüber Angaben vorhanden sind.

Die Wasseranalysen datieren aus den Jahren 1926 bis 1989, wobei der überwiegende Teil der Beprobungen in der Zeit von 1950 bis 1980 durchgeführt wurde (Tab. 1).

Bis zum Beginn der sechziger Jahre wurde im wesentlichen auf die mesozoischen Erdölträger prospektiert, auf die 60 % aller Proben entfallen (Tab. 2). Analysen von Formationswässern aus den permischen und karbonischen Gasträgern wurden überwiegend im Zeitraum von 1965 bis 1989 durchgeführt.

Die Ergebnisse der Wasseranalysen sind in Anlage 1 des Berichtes tabellarisch zusammengestellt. Zusätzlich finden sich in den Ta-

<i>Datum der Probenahme</i>	<i>Zahl der Analysen</i>
vor 1930	4
1931 - 1940	37
1941 - 1950	66
1951 - 1960	168
1961 - 1970	212
1971 - 1980	107
1981 - 1989	75
keine Angaben	109

Tab. 1: Gegenüberstellung des Analysendatums und der Zahl der durchgeführten Analysen

<i>Formation</i>	<i>Zahl der Analysen</i>
Tertiär	9
Kreide	162
Jura	170
Keuper	15
Muschelkalk	4
Buntsandstein	106
Zechstein	136
Rotliegendes	109
Karbon	70

Tab. 2: Gegenüberstellung der stratigraphischen Einheiten und der Anzahl der Wasseranalysen

bellenden Angaben über die Lage der Tiefbohrung, die Tiefe und stratigraphischer Position des beprobten Horizontes sowie das Datum der Probenahme. In Fällen, in denen Analysedatum und Bohrjahr voneinander abweichen, ist dies zusätzlich vermerkt.

Hinsichtlich Art und Umfang der durchgeführten Analysen handelt es sich um ein recht inhomogenes Datenmaterial (Tab. 3).

Vollständige oder annähernd vollständige Analysen der Haupt- und Nebenbestandteile liegen nur von etwa 70 % der analysierten Wässer vor. Bei den restlichen 30 % der Analysen wurde nur der Chloridgehalt bestimmt oder es findet sich lediglich eine Angabe zum Gesamtlösungsinhalt des Wassers.

Der prozentuale Anteil an Spurenelementbestimmungen schwankt zwis-

chen 19 % für  $\text{Li}^+$  und 43 % für  $\text{Br}^-$ .

$\text{Cl}^-$	82 %
$\text{Na}^+$	70 %
$\text{K}^+$	64 %
$\text{Ca}^{++}$	76 %
$\text{Mg}^{++}$	72 %
$\text{SO}_4^{--}$	59 %
$\text{Sr}^{++}$	33 %
$\text{Li}^+$	19 %
$\text{Br}^-$	43 %
$\text{J}^-$	23 %
$\text{BO}_3^{3-}$	32 %

Tab. 3: Zusammenstellung des prozentualen Anteils analysierter Ionen

#### 2.2.1.2 Vertikale Verteilung der Salzgehalte

Abb. 5 gibt zunächst einen Überblick über die Salzkonzentrationen aller analysierten Tiefenwässer in Abhängigkeit von deren Entnahmetiefe in der von [REDACTED] (1975) gewählten Form der Darstellung (vgl. Abb. 4). Um einen direkten Vergleich mit Abb. 4 zu ermöglichen, sind die Begrenzungslinien für die Datenfelder der Staßfurtkarbonatwässer und der Wässer des Komplexes Tertiär-Jura übernommen worden.

In der Darstellung sind nur solche Wasserproben berücksichtigt worden, von denen vollständige Analysen der Hauptbestandteile vorliegen. Wasserproben, von denen lediglich Angaben über Chlorid- oder  $\text{NaCl}$ -Gehalte vorliegen, blieben unberücksichtigt.

Vergleicht man Abb. 5 mit der entsprechenden Darstellung in [REDACTED] (1975), so zeigen sich gravierende Unterschiede zwischen beiden Datengruppen:

Bei den Wässern aus dem Schichtenkomplex Tertiär-Rhät aus dem Be-

# Konzentration/Teufe

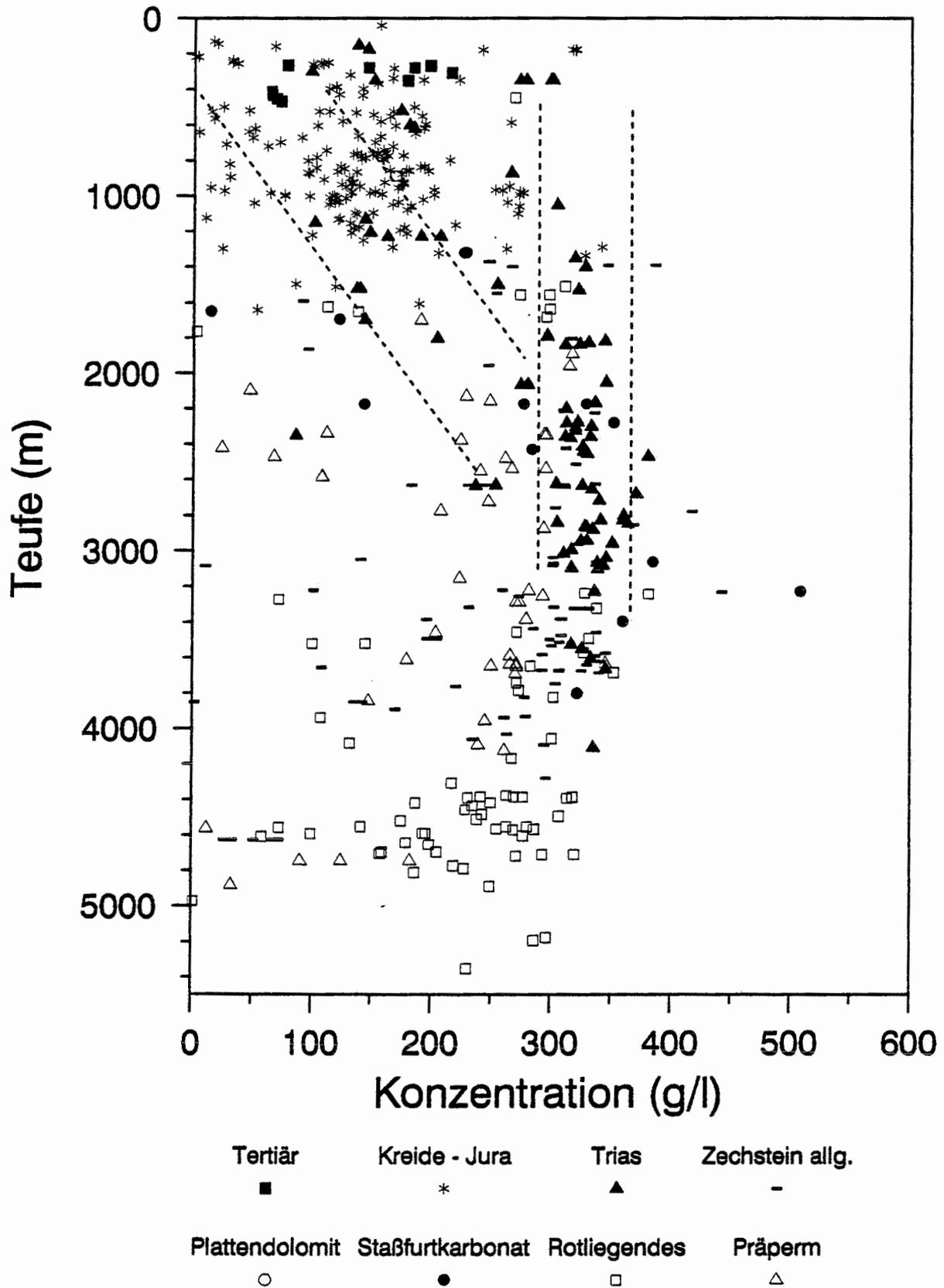


Abb. 5: Gesamtkonzentration von Formationswässern Nord- und Nordwestdeutschlands in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

reich des Niedersächsischen Beckens ist im Gegensatz zu Abb. 4 keine Korrelation zwischen Lösungsinhalt und Tiefenlage erkennbar. Die Salzgehalte des überwiegenden Teils der Wässer schwanken, weitgehend unabhängig von der Entnahmetiefe, zwischen etwa 100 und 200 g/l. Eine kleinere Gruppe von Wässern weist - ebenfalls unabhängig von der Teufenlage - deutlich geringere, eine kleinere Gruppe auch erheblich höhere Salzgehalte auf.

Bei den Wässern der Trias besteht eine teilweise Übereinstimmung dahingehend, daß eine Teil der Wässer, unabhängig von Tiefenlage, in Bereich der Sättigungskonzentration liegende Salzgehalte aufweist. Bei den nicht salzgesättigten Wässern aus dem Bereich des Niedersächsischen Beckens ist, im Gegensatz zu den Wässern aus dem Gebiet der früheren DDR, keine Abhängigkeit zwischen Tiefe und Salzgehalt zu erkennen.

Die Wässer des Zechsteins, des Rotliegenden und des Karbons zeigen ein untereinander ähnliches, jedoch von Abb. 4 teilweise abweichendes Verteilungsbild. Beim mengenmäßig größeren Anteil der Wässer des Zechsteins und des Rotliegenden handelt es sich erwartungsgemäß um hochkonzentrierte, gesättigte oder nahezu gesättigte Salzlösungen. Im Unterschied zur Darstellung von [REDACTED] (1975) weist jedoch auch ein erheblicher Teil der Wässer eine deutliche Untersättigung auf, so daß sich als typisches Verteilungsmuster eine horizontale Spreizung der Datenfelder nach links in Richtung verringerter Salzkonzentrationen ergibt. Das gleiche Verteilungsbild ergibt sich auch für die Wässer des Karbons, deren Salzkonzentrationen jedoch, ähnlich Abb. 4, generell nicht den Grad der Salzsättigung erreichen.

Zusammenfassend ergeben sich aus dem Vergleich der Daten von Formationswässern aus dem Bereich der ehemaligen DDR und den Wässern aus dem Niedersächsischen Becken Nord- und Nordwestdeutschlands die folgenden beiden wesentlichen Unterschiede:

- Für die Wässer des Komplexes Tertiär - Jura besteht im Bereich der ehemaligen DDR eine eindeutige lineare Korrelation zwischen Salzgehalt und Tiefenlage. Bei den Wässern des Nieder-

sächsischen Beckens ist eine entsprechende Abhängigkeit nicht erkennbar. Vielmehr schwanken die Salzgehalte dieser Wässer, unabhängig von der Tiefenlage, in weiten Grenzen.

- Wässer des Zechsteins und des Rotliegenden Ostdeutschlands sind, abgesehen von den Randlagen der Sedimentbecken, durchgängig salzgesättigt. Wässer des Präperms sind generell hochkonzentriert, aber deutlich untersättigt an gelösten Salzen. Kennzeichnend für die entsprechenden Wässer aus dem Bereich des Niedersächsischen Beckens ist eine größere Streuung der Salzgehalte, so daß ein erheblicher Teil der analysierten Zechstein- und Rotliegendewässer stark untersättigt an gelösten Salzen sind.

In den bisherigen Darstellungen erfolgte die Untergliederung der einzelnen Gruppen von Wässern unter stratigrafischen Gesichtspunkten. Aus Abb. 6 geht hervor, daß neben den im gesamten Bereich des Niedersächsischen Beckens entwickelten Salinaren des Zechsteins, des Muschelkalks und des Röts weitere Salinare mit lokaler Verbreitung vorkommen. Es sind dies im Norden des Niedersächsischen Beckens die Salinare des Rotliegenden und des Mittleren Keupers, sowie im westlichen Niedersachsen und östlichen Westfalen zusätzlich das Salinar des Münder Mergels.

In Hinblick auf die eingangs definierte Fragestellung, inwieweit im Bereich des Niedersächsischen Beckens in den Porenwässern der Salinaren auflagernden Sedimente ein linearer Salinitätsgradient vorhanden ist, wurde in Ergänzung zur stratigraphischen Zuordnung der Wässer eine weitergehende Zweiteilung in Wässer aus dem Hangenden der Salinare und in Wässer aus Salinarformationen oder aus dem Liegenden der Salinare vorgenommen.

Die zweiten Gruppe von Wässern, vereinfachend als Präsalinarwässer bezeichnet, umfaßt neben den karbonischen und permischen Wässern die Formationswässer aus dem Buntsandstein und dem Unteren Muschelkalk. Im Gebiet der Keupersalztröge im nördlichen Niedersachsen zählen zusätzlich die Wasserleiter des Oberen Muschelkalks und des Unteren Keupers, im Verbreitungsgebiet des Portlandsalinars darüber hinaus auch die Wässer aus dem Unteren und Mittleren Jura zur Gruppe der Präsalinarwässer.

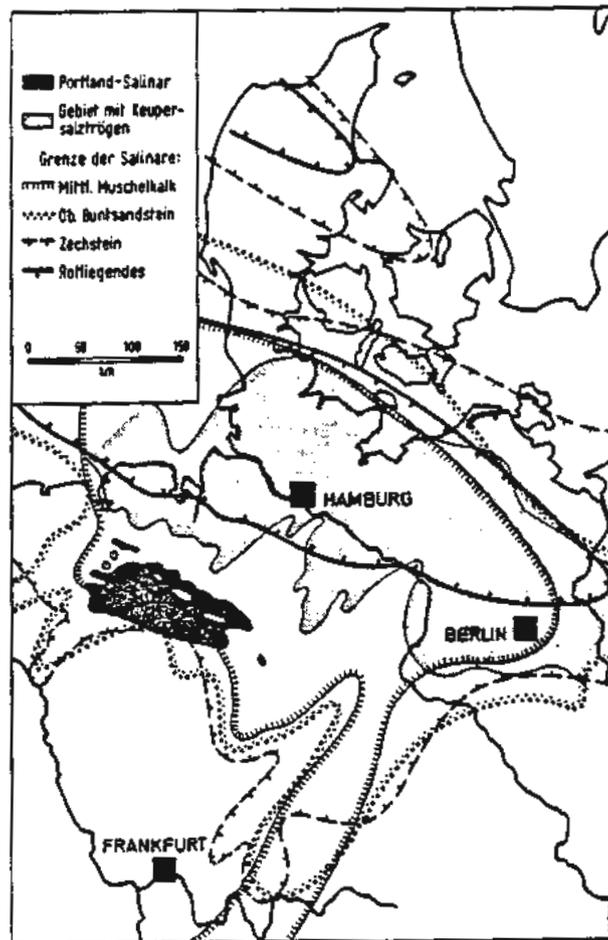


Abb. 6: Lage der permischen und mesozoischen Salinare im nördlichen Mitteleuropa (aus [redacted] 1971)

Die Gruppe der Postsalinarwässer wird zusätzlich in Salzstockrandwässer und Wasser aus dem Bereich der Randsenken untergliedert, um eine eventuelle sekundäre Beeinflussung der Formationswässer durch Salzstrukturen wie etwa eine gravitativ induzierte Advektion von Porenwässern an Salzstockrändern abzugrenzen. Zur Gruppe der Salzstockrandwässer werden alle Wässer aus einem Bereich bis zu einem Kilometer Entfernung vom Salzstockrand gerechnet.

Anders als in Abb. 2 wird in den nachfolgenden Darstellungen die Entnahmetiefe der Wässer gegen deren Chloridgehalt statt gegen den Gesamtlösungsinhalt aufgetragen. Diese Vorgehensweise bietet zwei Vorteile:

Zum einen steht hierdurch eine größere Zahl von Analysen zur Verfügung, zum anderen korreliert der Chloridgehalt hochsaliner Wässer unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung in stärkerem Maße mit dem Grad der Salz-Sättigung als mit ihrem Gesamtlösungsinhalt.

Die Sättigungskonzentration für Chlorid reiner NaCl-Lösungen liegt bei einer Temperatur von 30 °C bei annähernd 5 mol/l ( [REDACTED] 1973, Tab. 1). Mit ansteigender Temperatur erhöht sich die Chlorid-Löslichkeit auf etwa 5,4 mol/l bei einer Temperatur von 100 °C und 6,2 mol/l bei 200 °C. Eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Wassers von reinen NaCl-Lösungen hin zu Lösungen von Typus der Ca-Mg-Na-Cl-Wässer verändert die Sättigungskonzentration von Chlorid - anders als den Gesamtlösungsinhalt der Wasser - nur geringfügig ( [REDACTED] 1988, freundl. Mitteilung [REDACTED] ). Wesentlich höhere Chlorid-Sättigungskonzentrationen von bis zu 10 mol/l werden nur in Mg-Cl-Lösungen erreicht.

Aus Gründen der Vereinfachung wird in den nachfolgenden Abbildungen der gesamte Bereich zwischen 5000 und 6200 meq/l Chlorid als Bereich der Salzsättigung gekennzeichnet.

In den Abb. 7 und Abb. 8 sind die Chloridgehalte der Formationswässer des Präsalinars in Abhängigkeit von der Tiefenlage getrennt nach stratigraphischen Horizonten dargestellt. In den Darstellungen sind Wasseranalysen, deren Laborprotokolle Hinweise auf eine Verunreinigung der Wasserproben durch Bohrspülung enthalten, durch eine gesonderte Signatur gekennzeichnet worden.

Die Darstellungen bestätigen im wesentlichen das sich aus Abb. 5 ergebende Bild:

Mit Ausnahme der Karbonwässer streuen die Chloridgehalte der Wässer, unabhängig von der Entnahmetiefe, in weiten Grenzen zwischen dem Bereich der Chloridsättigung und Chloridgehalten von deutlich weniger als 1000 meq/l. Wie im Gebiet der ehemaligen DDR sind Karbonwässer (mit Ausnahme zweier Wasseranalysen) generell nicht chloridgesättigt. Durch Spülung verunreinigte Wasserproben weichen nicht von allgemeinen Verteilungsbild ab.

Der Anteil der chloridgesättigten Wässer erreicht bei den Buntsandstein- und Zechsteinwässern einen Wert von 61 bzw. 38 %. Bei den Wässern aus dem Rotliegenden und dem Jura liegt dieser Anteil bei lediglich 27 bzw. 25 %.

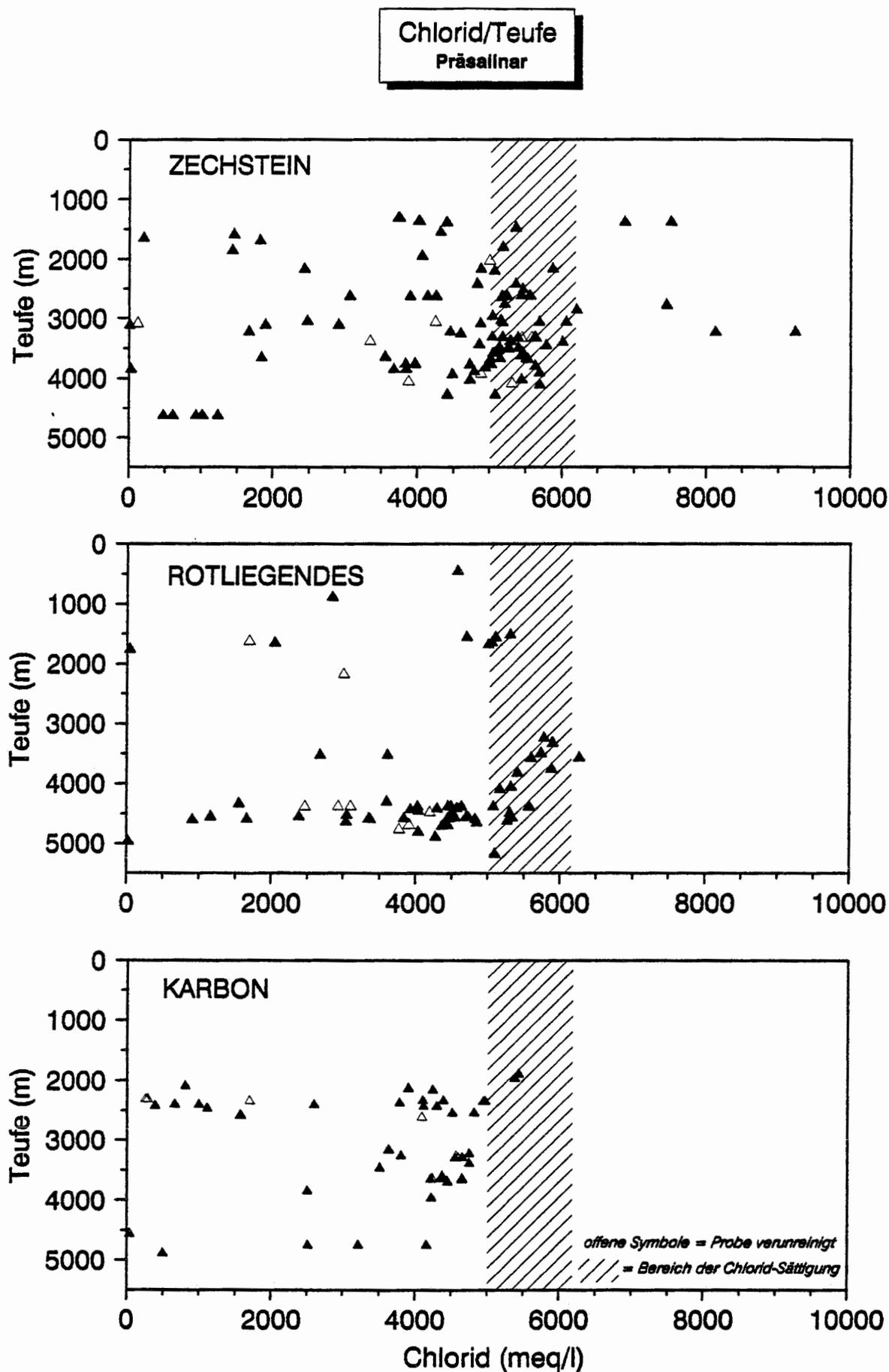


Abb. 7: Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinär im Niedersächsischen Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Zechstein - Karbon)

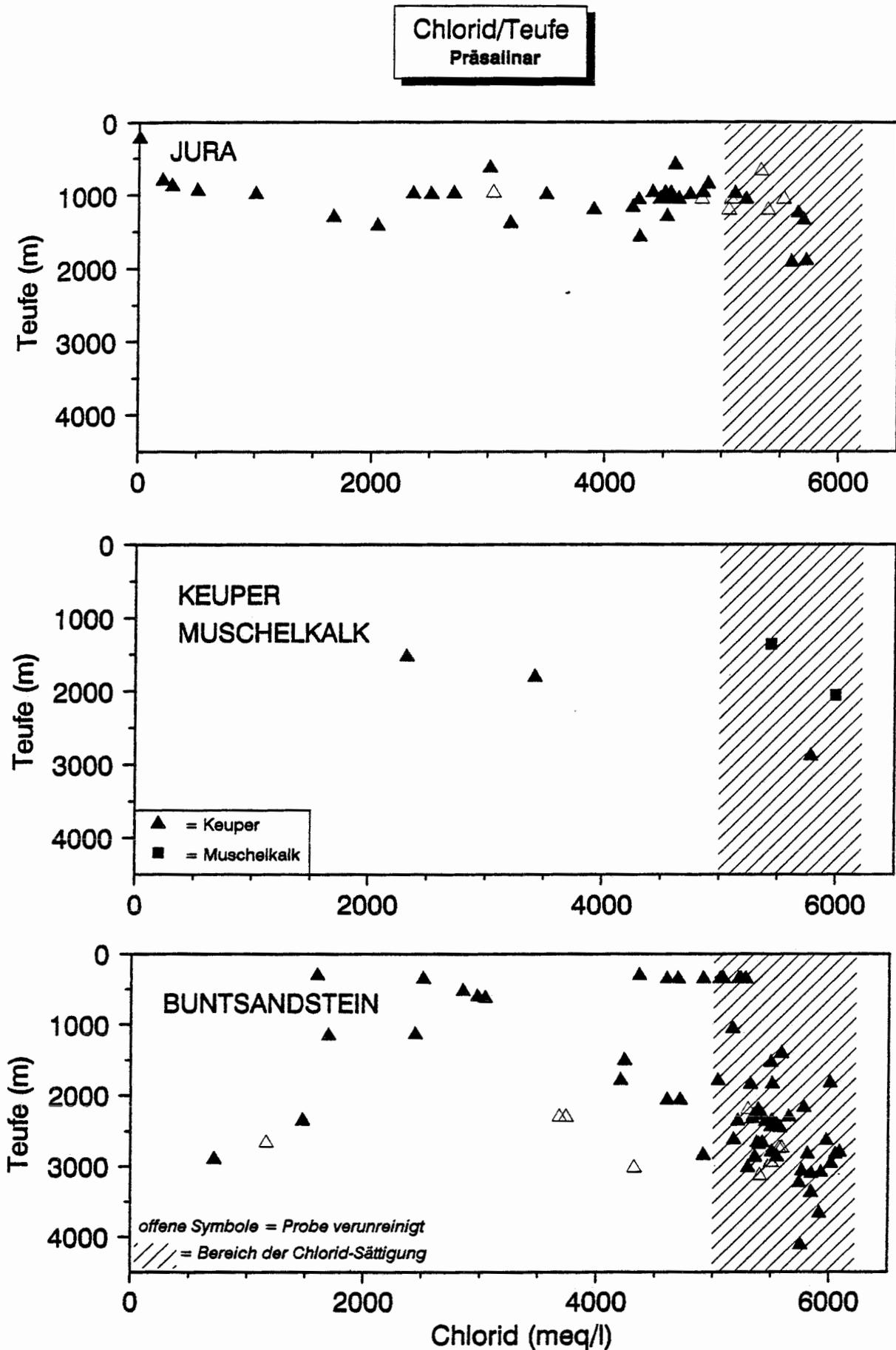


Abb. 8: Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Jura - Buntsandstein)

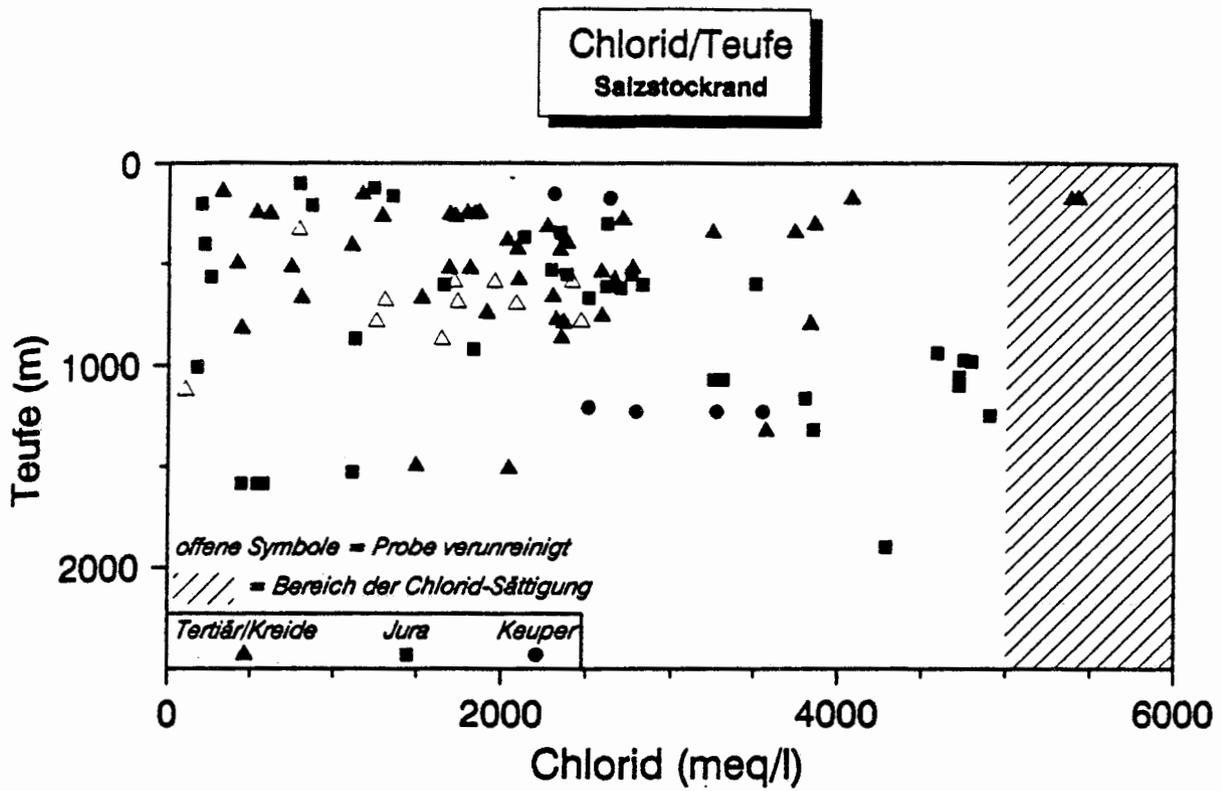


Abb. 9: Chloridgehalte der Salzstockrandwässer in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

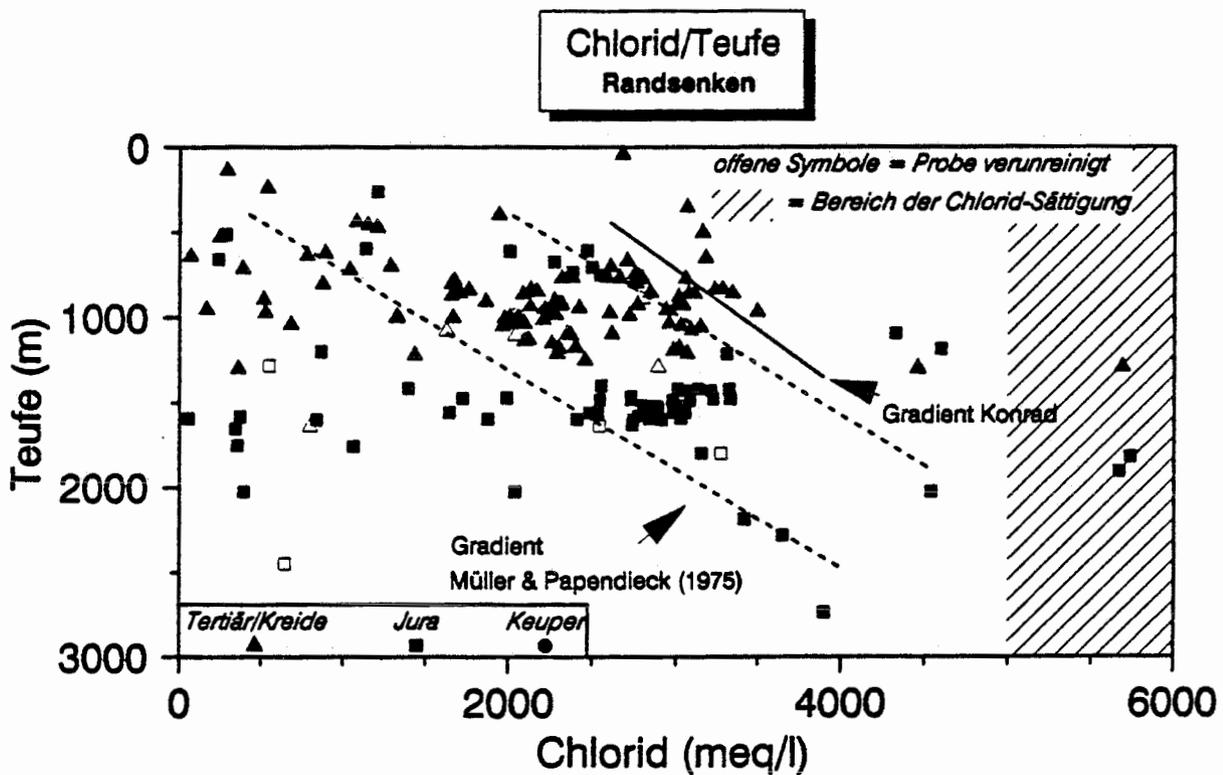


Abb. 10: Chloridgehalte der Randsenkenwässer in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

Die Abbildungen 9 und 10 geben einen Überblick über tiefenabhängige Verteilung der Chloridgehalte in den Wässern des Postsalinars.

Die Chloridgehalte der Wässer aus dem Bereich der Salzstockränder streuen unabhängig von der Entnahmetiefe zwischen wenigen hundert meq/l und etwa 5500 meq/l (Abb. 9).

Für die Randsenkenwässer (Abb. 10) ergibt sich ein ähnliches Bild. Obwohl der mengenmäßig größere Teil der Datenpunkte in den Streubereich der Analysen aus dem Gebiet der ehemaligen DDR bzw. in den Bereich des Salinitätsgradienten der Konradwässer fallen, läßt sich ein vertikaler Salinitätsgradient allenfalls für Teilgruppen der Daten ableiten. Insgesamt überwiegt das typische Verteilungsmuster einer starken horizontalen, von der Entnahmetiefe weitgehend unabhängigen Streuung der Datenpunkte. Ein Vergleich des Salinitätsgradienten der Tiefenwässer aus dem Gebiet der ehemaligen DDR mit dem Gradienten im Bereich der Grube Konrad zeigt, daß beide Gradienten einerseits in der gleichen Größenordnung liegen, andererseits aber im Bereich der Grube Konrad deutlich höhere Salzgehalte vorherrschen. Dies deckt sich mit dem Hinweis in [REDACTED] (1975), daß "die Wässer im Westteil der Altmark ... vom allgemeinen regionalen Bild ab(weichen) und ... durch eine westlich höhere Konzentration gekennzeichnet (sind), wodurch ihre Zugehörigkeit zum Gifhorner Trog angedeutet wird."

Aus der entsprechenden Darstellung für die Randsenkenwässer aus dem Bereich des "Gifhorner Troges" in Abb. 11 läßt sich andererseits kein von der Gesamtdatengruppe abweichendes Verteilungsmuster erkennen.

In Abb. 12 werden in Abänderung von der bisherigen Vorgehensweise die Chloridgehalte der Wässer an Abhängigkeit von der "Normierten Teufe", d.h. dem Quotienten aus der Entnahmetiefe und der Teufe des anstehenden Salinars dargestellt. Hierzu wurde für jede der beprobten Bohrungen die Tiefenlage des Salinars anhand der entsprechenden Tiefenlinienpläne des Geotektonischen Atlas von NW-

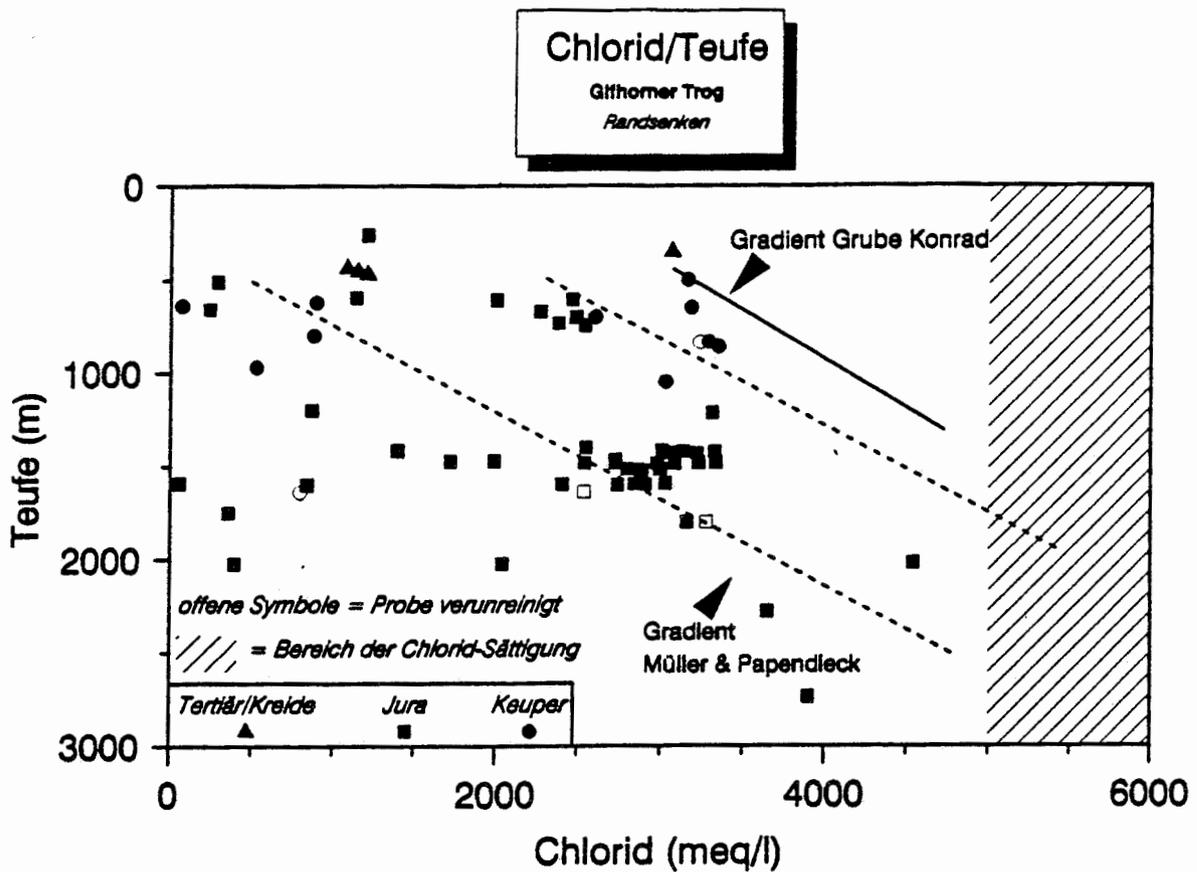


Abb. 11: Chloridgehalte der Randsenkenwässer des "Gifhorner Troges" in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

Deutschland bestimmt. Der Vorgehensweise liegt folgende Überlegung zugrunde:

Geht man davon aus, das sich in der geologischen Vergangenheit durch diffusive Vorgänge zwischen salzgesättigten Lösungen im Bereich der Salinare und der Oberfläche ein lineares Salinitätsprofil herausgebildet hat, so wird der Grad der Versalzung der Porenwässer oberhalb der Salinare sowohl von der Tiefenlage der Formation als auch von der Teufe des im Untergrund anstehenden Salinars bestimmt. Lokal wechselnde Salinitätsgradienten müssen daher bei Untersuchungen im regionalen Maßstab zu einer vergleichsweise großen Streuung der Datenpunkte im Chlorid/Teufe-Korrelationsdiagramm führen. Eine Berücksichtigung von Entnahmetiefe und Tiefenlage des Salinars müßte ausgehend von dieser Überlegung zu einer besseren Korrelation der Datengruppen führen.

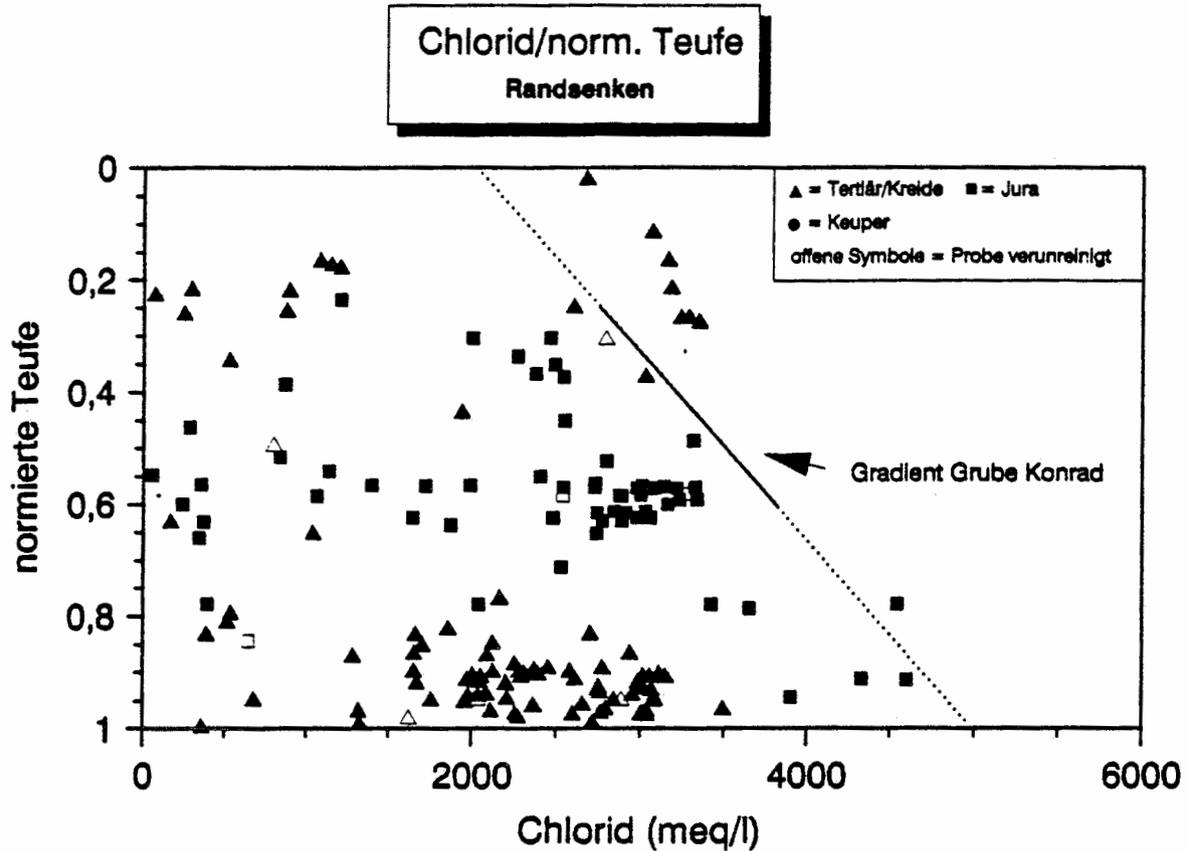


Abb. 12: Chloridgehalte der Randsenkenwässer in Abhängigkeit von der normierten Teufe (= Quotient Tiefenlage/Teufe Salinar)

Aus der entsprechenden Darstellung in Abb. 9 ergibt sich jedoch, daß diese Vorgehensweise zu keiner besseren wesentlich Korrelation zwischen Chloridgehalten und Teufe führt.

### 2.2.1.3 Chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer

Die Abbildungen 13 bis 16 vermitteln einen Überblick über die chemische Zusammensetzung der Formationswässer in Form von Korrelationsdiagrammen zwischen Chlorid und den Hauptkationenbestandteilen.

Alle Diagramme zeigen eine ausgeprägte lineare Korrelation zwis-

Chlorid/Natrium

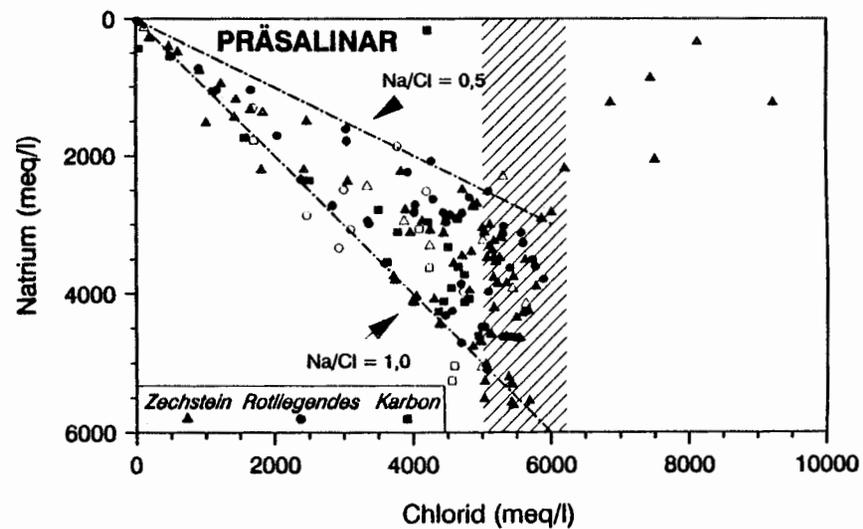
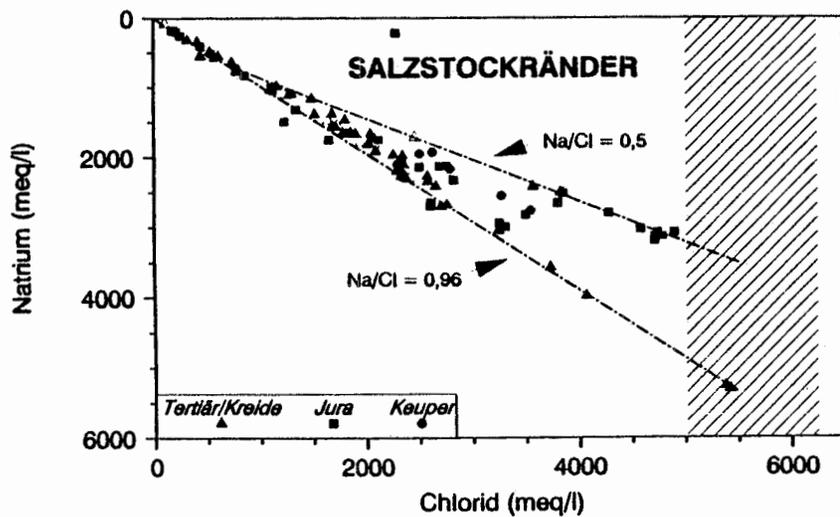
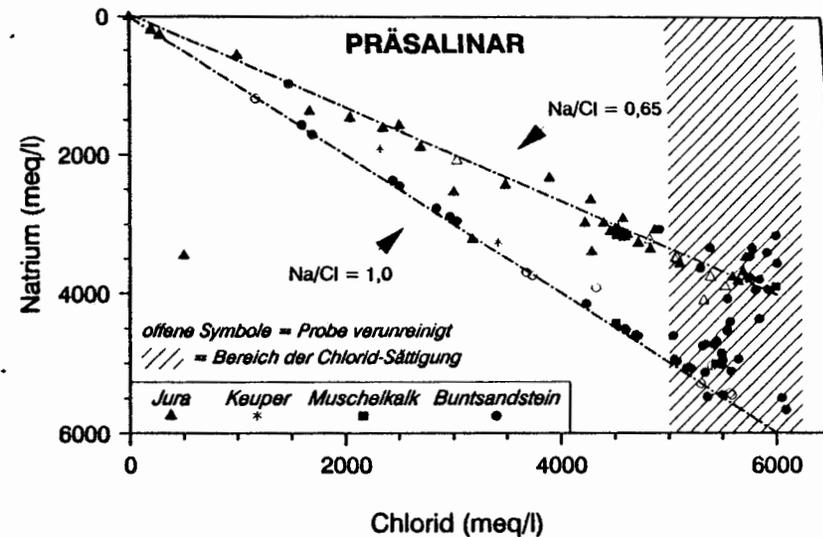
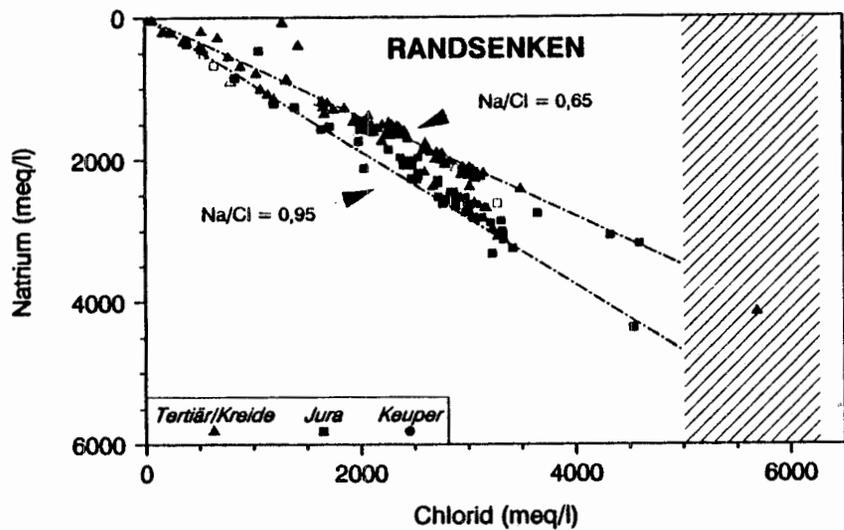


Abb. 13: Beziehung zwischen Chlorid und Natrium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

Chlorid/Calcium

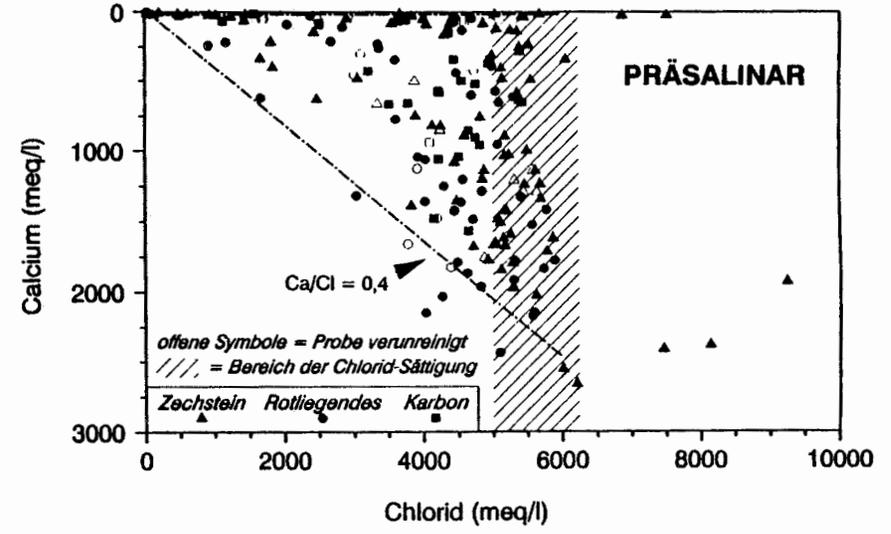
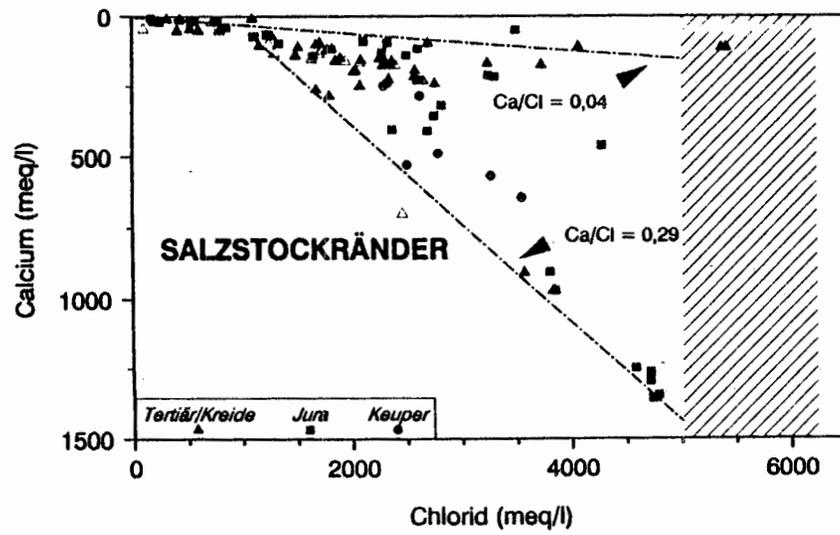
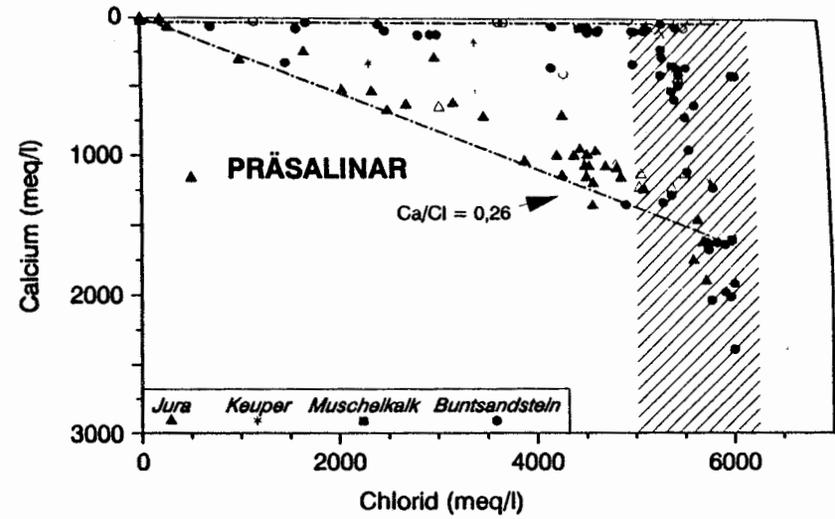
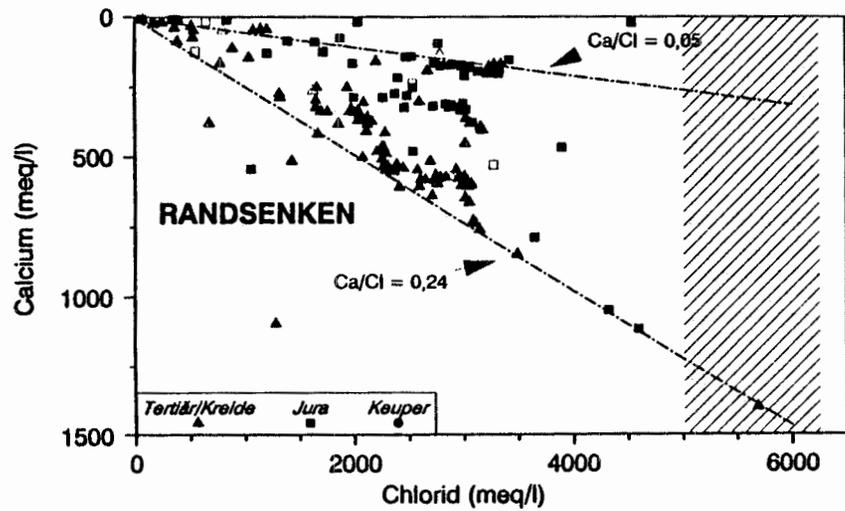


Abb. 14: Beziehung zwischen Chlorid und Calcium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

Chlorid/Magnesium

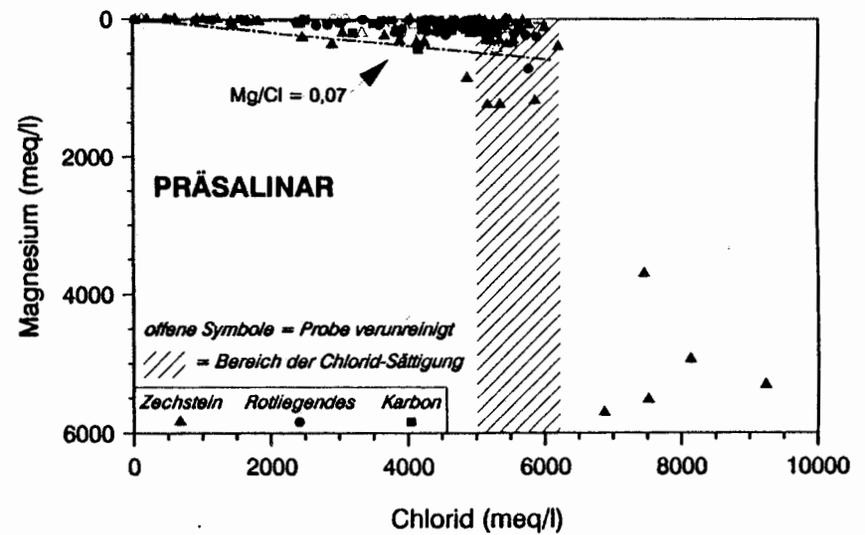
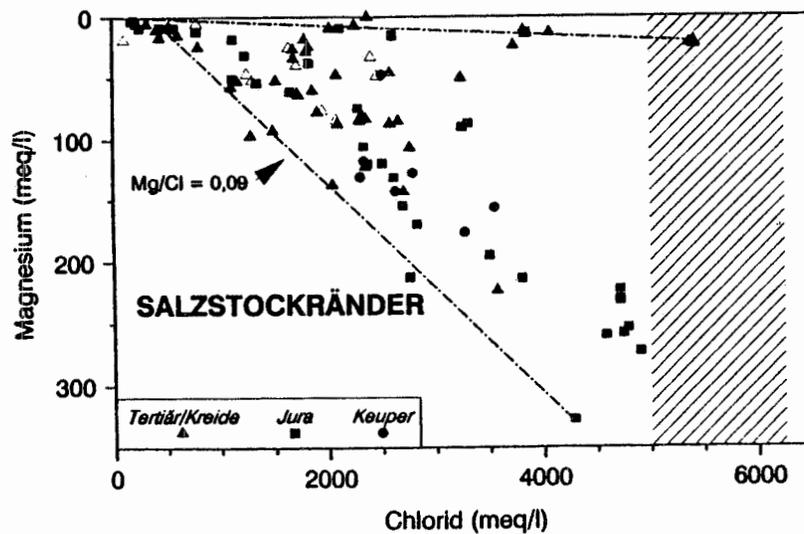
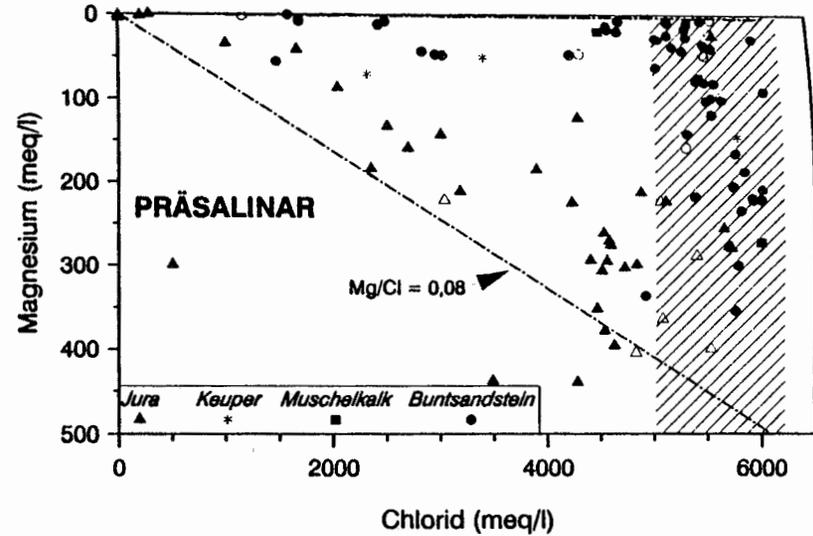
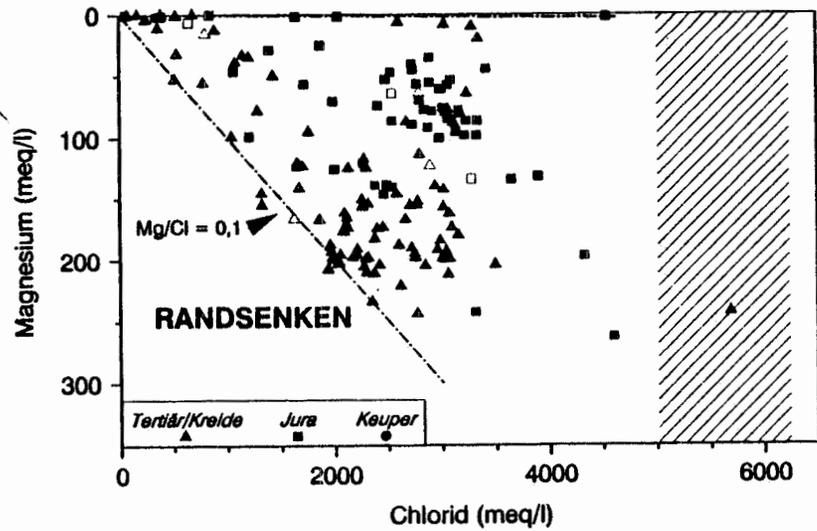


Abb. 15: Beziehung zwischen Chlorid und Magnesium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

Chlorid/Kalium

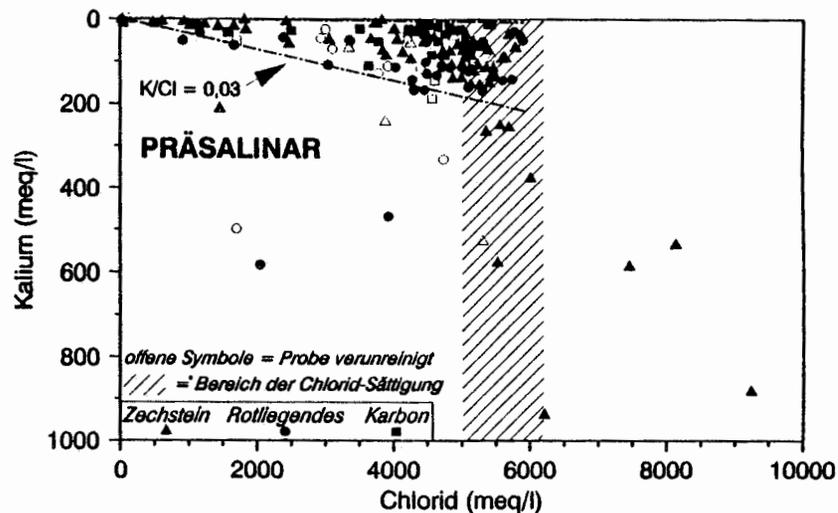
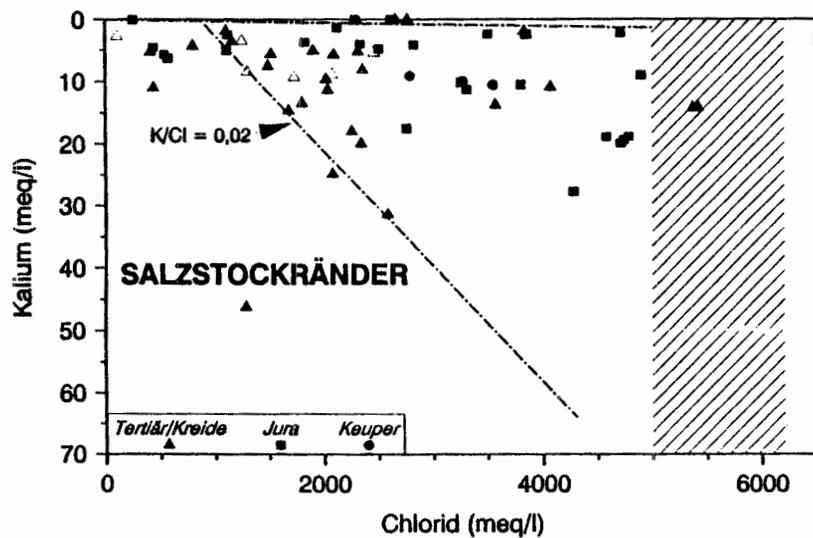
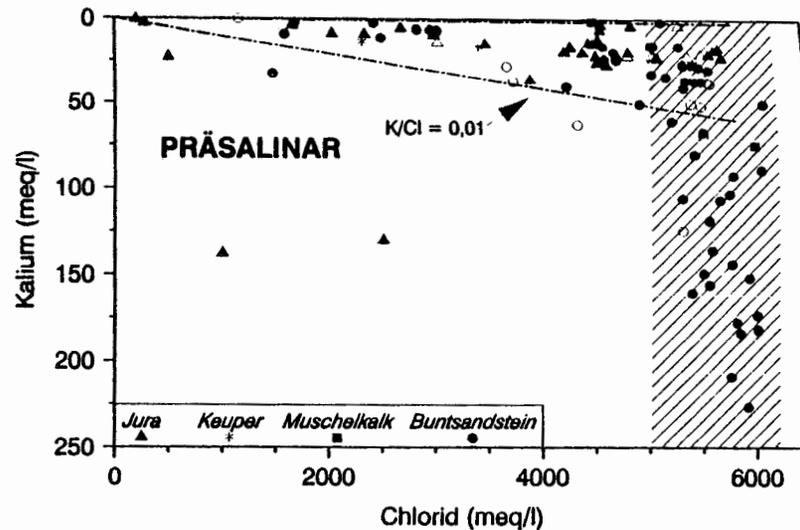
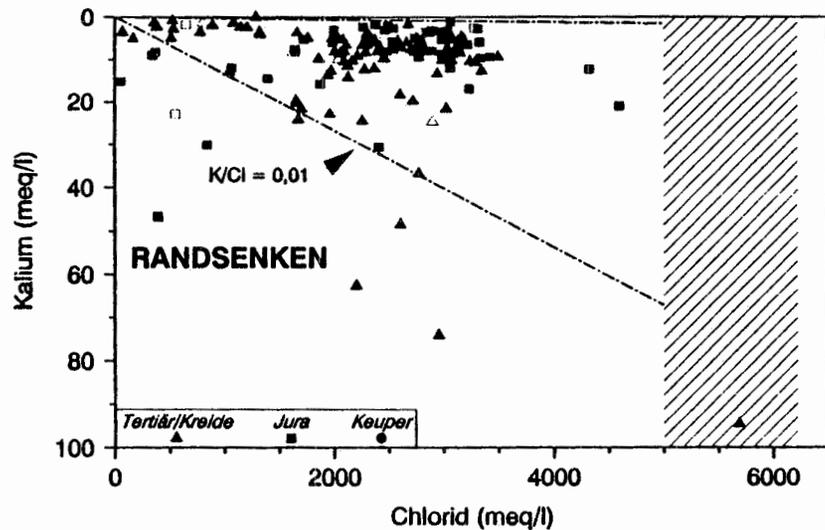


Abb. 16: Beziehung zwischen Chlorid und Kalium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

chen Chlorid und den einzelnen Kationen. Am deutlichsten zu erkennen ist diese Tendenz in den Korrelationsdiagrammen für  $\text{Na}^+$  und  $\text{Ca}^{++}$ , in denen sich die Datenpunkte entlang zweier Geraden gruppieren, die ihren Ausgangspunkt im Koordinatenursprung nehmen. Bei den Wässern des Postsalinars und den mesozoischen Wässern des Präsalinars können zwei diskrete Datengruppen unterschieden werden, während die Geraden bei den permischen und karbonischen Wässern den Charakter von Begrenzungslinien der Datenfelder annehmen. Entsprechende Korrelationsgeraden bzw. lineare Begrenzungslinien der Datenfelder können, wenn auch weniger deutlich, ebenfalls für und  $\text{Mg}^{++}$  und  $\text{K}^+$  unterschieden werden. Die beiden Korrelationsgeraden bzw. Begrenzungslinien lassen sich zwei voneinander verschiedenen Wassertypen zuordnen:

Zum einen Wässern vom Typus der Na-Cl-Wässer mit einem in etwa ausgeglichenen Verhältnis Na/Cl zwischen 0,9 und 1 und entsprechend geringen Gehalten  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  und  $\text{Mg}^{++}$ , zum anderen Wasser vom Typus der Na-Ca-(Mg)-Cl Wässer mit einer Äquivalentzusammensetzung von 50 bis 65 %  $\text{Na}^+$ , 25 - 40 %  $\text{Ca}^{++}$  und etwa 10 Prozent  $\text{Mg}^{++}$  und  $\text{K}^+$ .

Die charakteristische lineare Verteilung der Datenpunkte in den Korrelationsdiagrammen wird in der neueren Fachliteratur in Sinne einer linearen Mischungsreihe zweier Komponenten unterschiedlicher Salinität interpretiert ( [REDACTED] 1978, [REDACTED] 1989, [REDACTED] 1987). Da die angesprochenen Regressionsgeraden generell durch den Koordinatenursprung verlaufen, handelt es sich um Verdünnungslinien hochsaliner Wässer durch gering mineralisierte Wässer.

Dieser Verdünnungseffekt läßt sich schlüssig insbesondere an den Wässern des Präsalinars belegen. Aufgrund der unmittelbaren Nachbarschaft bzw. dem unmittelbaren Kontakt der Wasserleiter mit den permischen und triadischen Salinaren kann davon ausgegangen werden, daß zumindest die Wässer des Buntsandsteins und des Zechsteins - wie durch [REDACTED] (1975) dokumentiert - in den zentralen Beckenteilen durchgängig salzgesättigt sind. In ihrer chemischen Zusammensetzung gleichen die in den Abb. 13 bis 16 in die Zone der Salzsättigung fallenden Wasserproben weitgehend

den entsprechenden Wässern aus dem Gebiet der ehemaligen DDR. Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung finden sich alle Übergänge zwischen reinen Na-Cl-Wässern und Na-Ca-Mg-Cl-Wässern. Wässer mit geringeren Salzgehalten gruppieren sich entlang der bzw. zwischen den beschriebenen, durch den Koordinatenursprung verlaufenden Regressionsgeraden. Es kommt also zu einer Verdünnung der Wasser unter Beibehaltung ihrer chemischen Zusammensetzung.

Die Wässer des Postsalinars zeigen in den Korrelationsdiagrammen ein den Wässern des Präsalinars weitgehend gleiches Verteilungsmuster. Es ist demnach naheliegend, auch dieser Gruppe von Wässern eine Verfälschung durch Verdünnungseffekte zu unterstellen.

2.2.2 Wasseranalysen der Firma [REDACTED]

Von der Firma [REDACTED] wurden den NLF 943 Wasseranalysen aus dem Zeitraum von 1952 bis 1991 zur Verfügung gestellt (Tab. 4).

Datum der Probenahme	Zahl der Analysen
1952 - 1960	191
1961 - 1970	242
1971 - 1980	267
1981 - 1991	238
keine Angaben	5

Tab. 4: Analysen der Firma [REDACTED]  
Gegenüberstellung des Analysendatums und der Zahl der durchgeführten Analysen

Formation	Zahl der Analysen
Tertiär	4
Kreide	152
Jura	179
Keuper	6
Muschelkalk	3
Buntsandstein	60
Zechstein	125
Rotliegendes	75
Karbon	77

Tab. 5: Analysen der Firma [REDACTED]  
Gegenüberstellung der stratigraphischen Einheiten und der Anzahl der Wasseranalysen

Eine tabellarische Auflistung der Daten findet sich in Anhang 2 des Berichtes. Zum überwiegenden Teil handelt es sich dabei um Analysen von Formationswässern aus Kohlenwasserstoffprospektions- und -produktionsbohrungen (842 Analysen), zum geringeren Teil auch um Analysen von Verpreßwässern und Bohrspülungen (101 Analysen). Im Rahmen dieses Berichtes werden Analysen von Formationswässern mit vollständigen Bestimmungen aller Hauptbestandteile sowie Angaben über die beprobte Formation und die Entnahmetiefe berücksichtigt. Dies sind zusammen 683 Analysen, bei denen es sich je

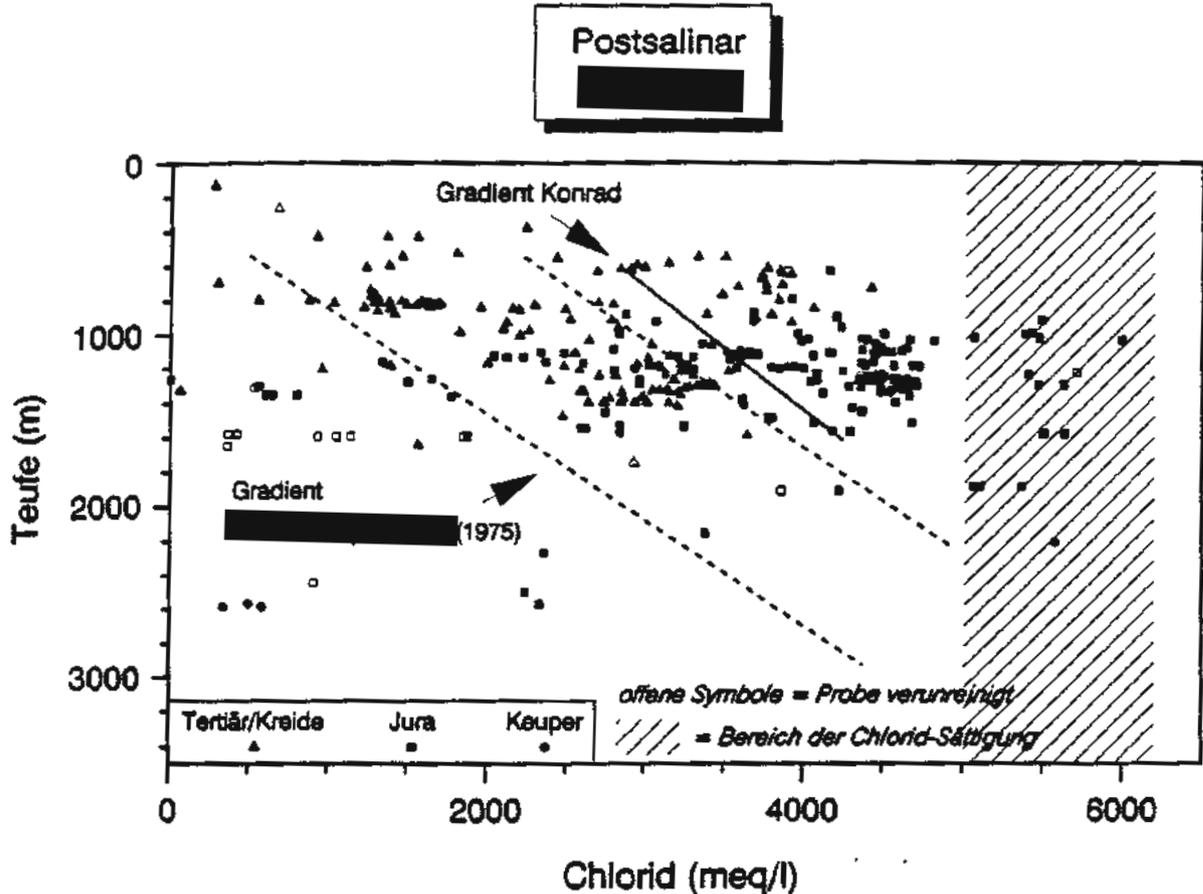


Abb. 17: Wasseranalysen der Firma [redacted]; Chloridkonzentration der Formationswässer des Postsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

zur Hälfte um Wasserproben aus den mesozoischen Erdölträgern sowie den paläozoischen und triadischen erdgasführenden Horizonten handelt (Tab. 5).

Die Diagramme in den Abbildungen 17 bis 19 geben einen Überblick über die Korrelation zwischen Entnahmetiefe und den Chloridgehalten als Bezugsgröße der Mineralisation für die verschiedenen Typen von Formationswässern.

Die Diagramme vermitteln das bereits bekannte Bild einer starken Streuung der Salzgehalte unabhängig von der Entnahmetiefe. Eine lineare Korrelation zwischen Tiefe und Chloridgehalt ist bei den Wässern des Komplexes Tertiär - Rhät nicht zu erkennen. Wässer des Präsalinars sind zum geringeren Teil gesättigt, zum größeren Teil wiederum deutlich untersättigt an Chlorid. Der Anteil an salzge-

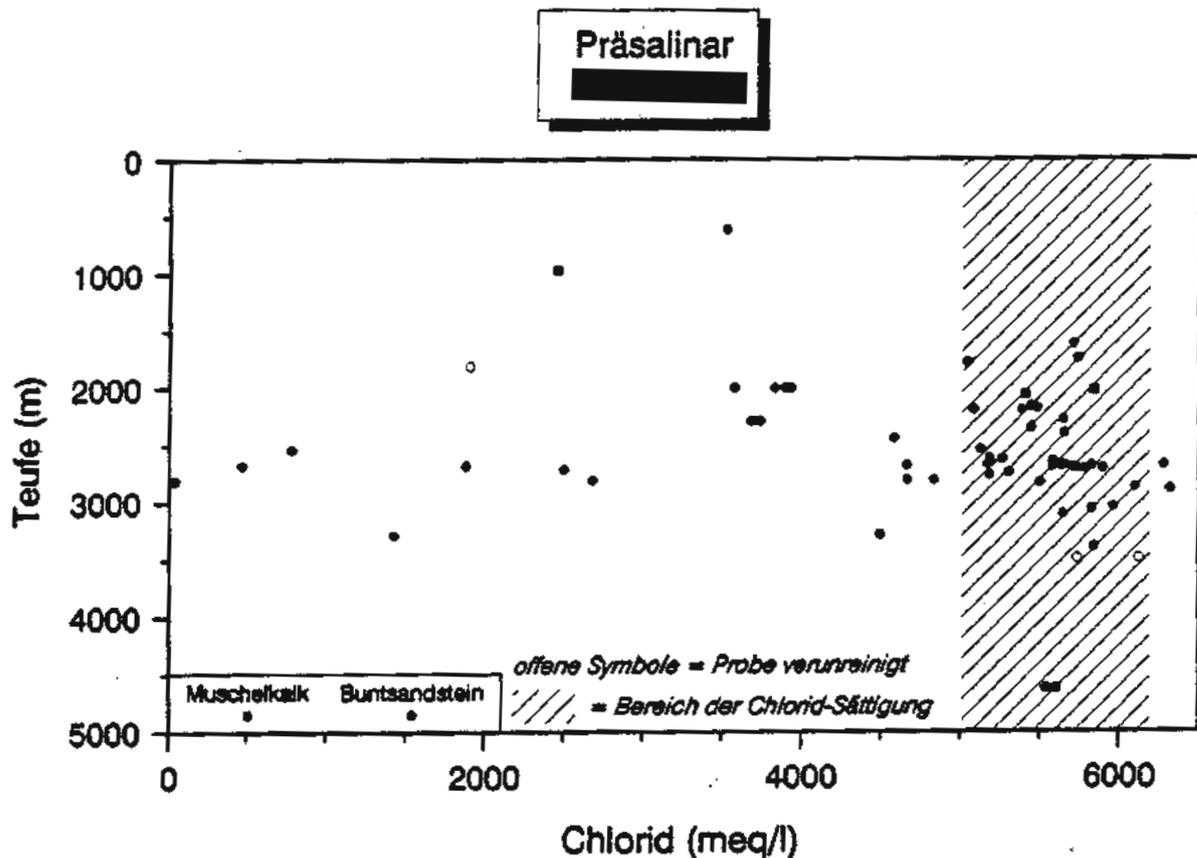


Abb. 18: Wasseranalysen der Firma [redacted] Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Muschelkalk - Buntsandstein)

sättigten Wässern ist wiederum an höchsten bei den Buntsandsteinwässern, während die Karbonwässer den geringsten Anteil an gesättigten Wässern aufweisen. Unterschiede zwischen dem Datenmaterial aus dem Archiv des NLFb und den Analysen der Firma [redacted] bestehen lediglich dahingehend, daß bei den Analysen der Firma [redacted] die Wässer des Postsalinars und die Karbonwässer einen deutlich höheren Anteil an salzgesättigten Wässern aufweisen.

Die Korrelationsdiagramme zwischen Chlorid und den Haupt-Kationenbestandteilen (Abb. 20 bis 23) gleichen ebenfalls den entsprechenden Diagrammen in den Abbildungen 13 bis 16. Kennzeichnend sind wiederum zwei durch den Koordinatenursprung verlaufende Verdünnungslinien, deren hochmineralisierte Endglieder von Wässern mit

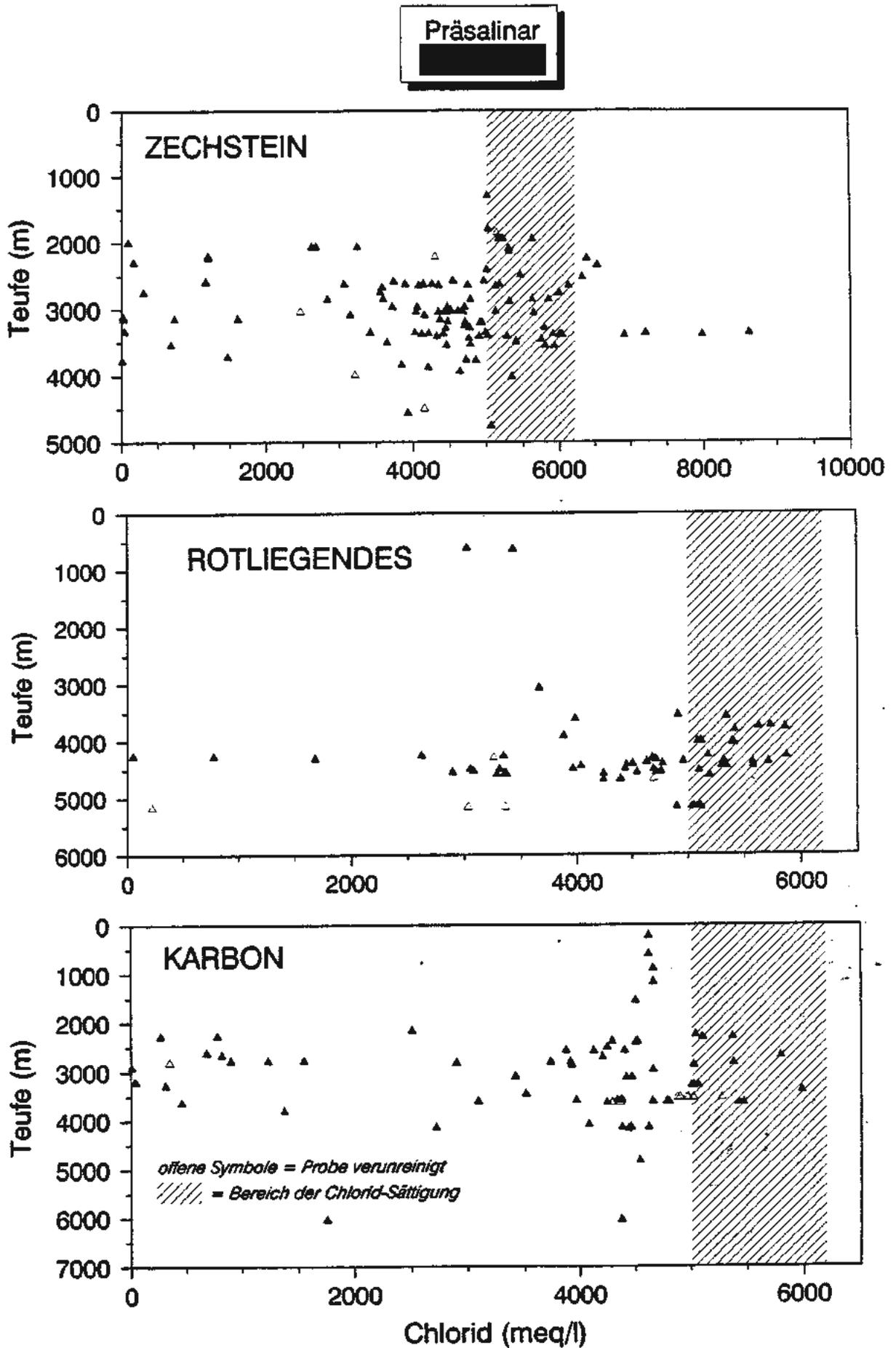


Abb. 19: Wasseranalysen der Firma [REDACTED] Chloridkonzentration der Formationswässer des Präsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage (Zechstein - Karbon)

## Chlorid/Natrium

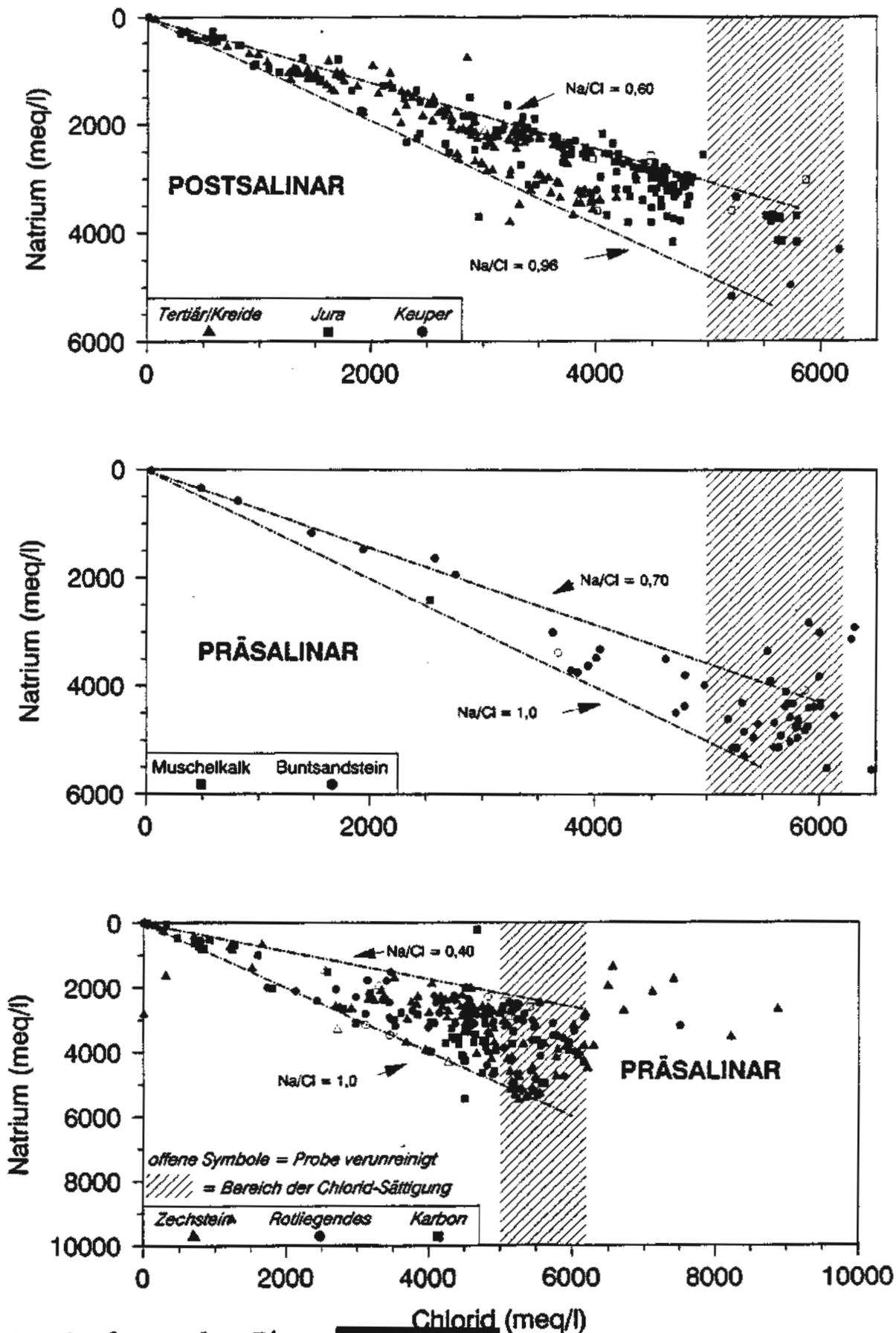


Abb. 20: Analysen der Firma [redacted];  
 Beziehung zwischen Chlorid und Natrium in Formationswässern des Niedersächsischen Beckens

## Chlorid/Calcium

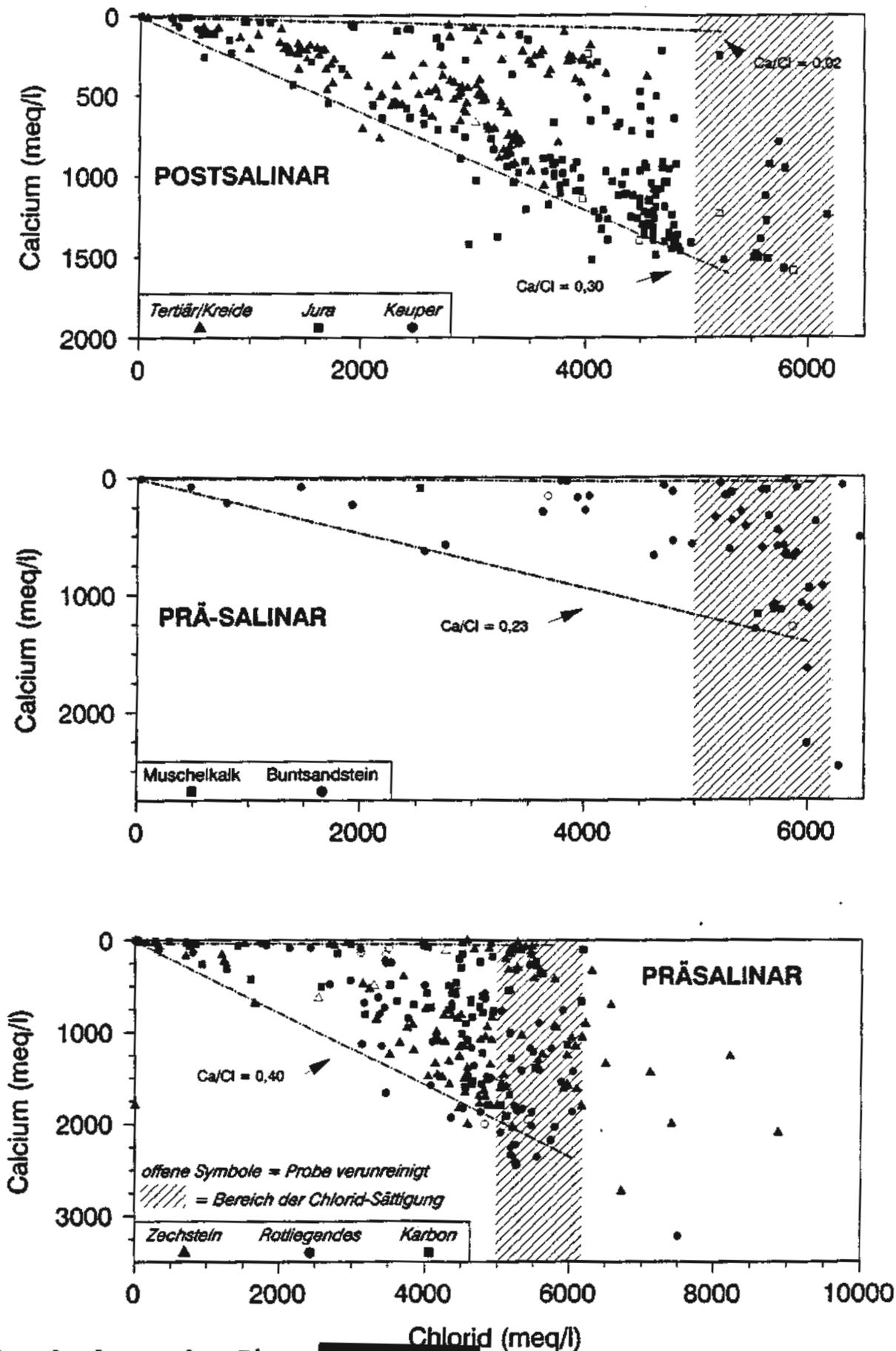


Abb. 21: Analysen der Firma [REDACTED];  
 Beziehung zwischen Chlorid und Calcium in Formations-  
 wässern des Niedersächsischen Beckens

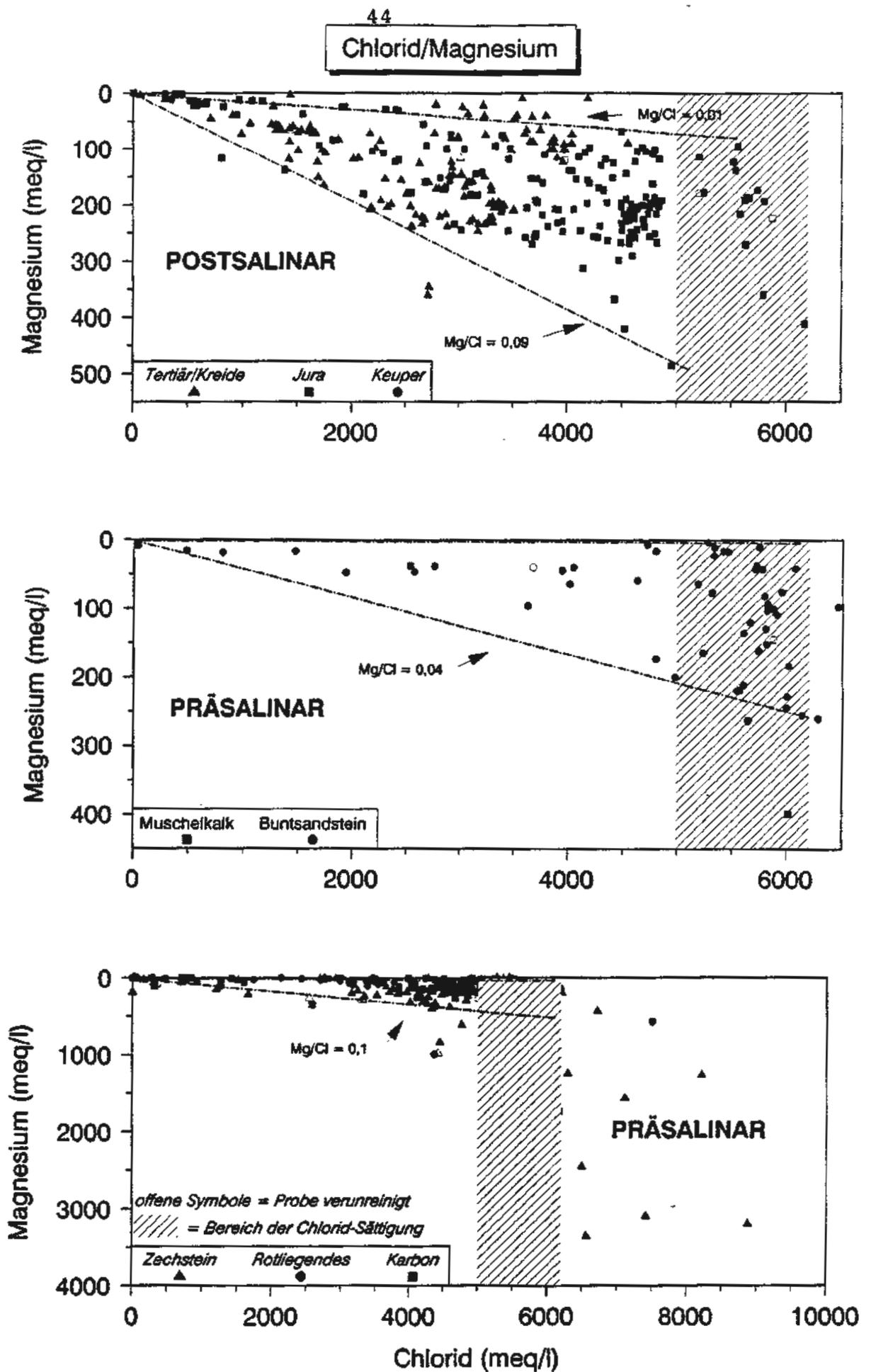


Abb. 22: Analysen der Firma [redacted];  
 Beziehung zwischen Chlorid und Magnesium in For-  
 mationswässern des Niedersächsischen Beckens

## Chlorid/Kalium

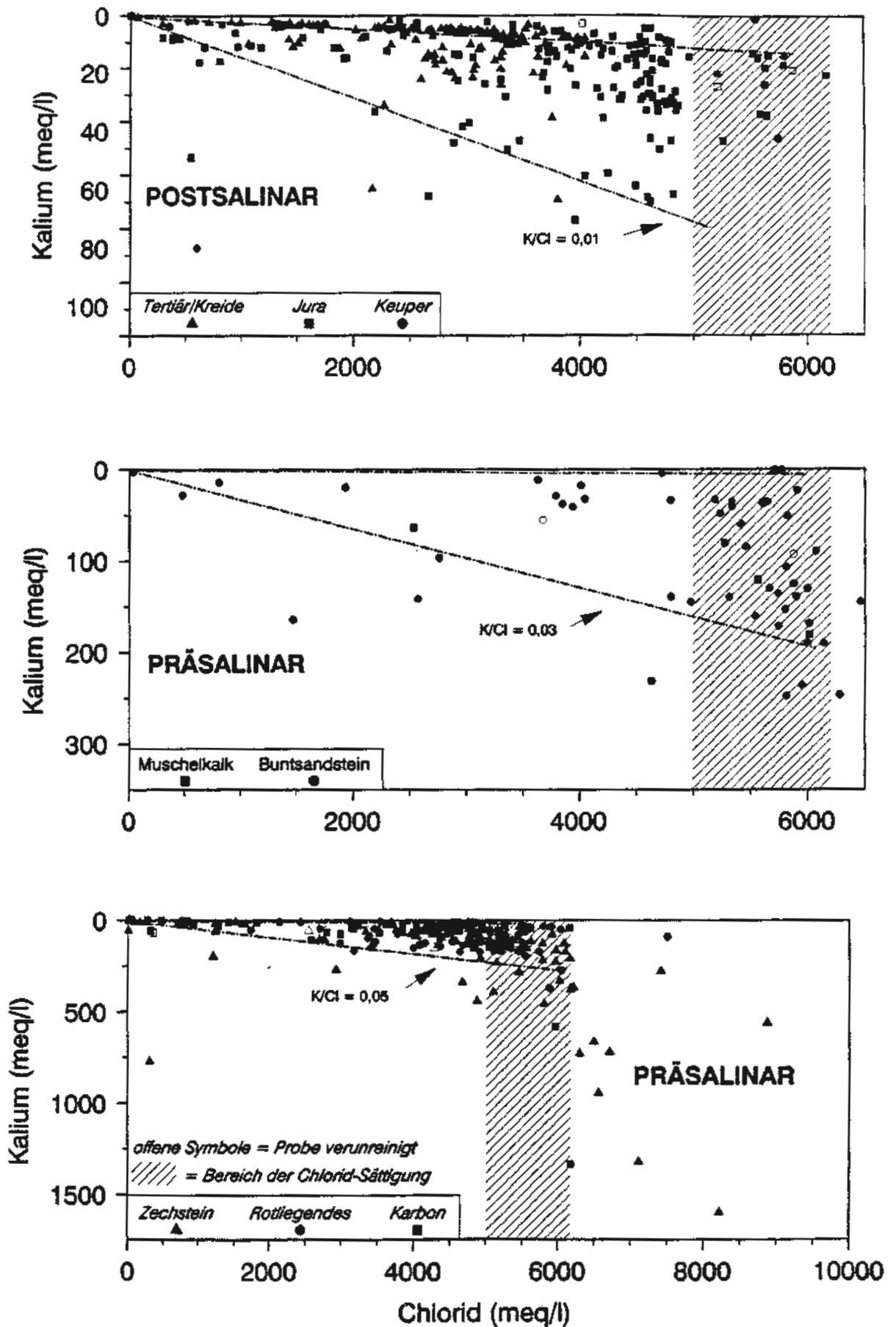


Abb. 23: Analysen der Firma [redacted];  
 Beziehung zwischen Chlorid und Kalium in Formations-  
 wässern des Niedersächsischen Beckens

einem stöchiometrischen Verhältnis Na/Cl bzw. Wässern vom Typus der Na-Ca-(Mg)-Cl-Wässer gebildet werden.

### 3. Schlußfolgerungen

Aus der Bearbeitung der Archivdaten des NLfB und der Wasseranalysen der Firma [REDACTED] ergibt sich als wesentliches Ergebnis, daß eine vertikale lineare Zunahme der Salzgehalte bei den Formationswässern des Postsalinars nicht zu erkennen ist. Kennzeichnend ist stattdessen das typisches Verteilungsmuster einer starken horizontalen, von der Entnahmetiefe weitgehend unabhängigen Streuung der Datenpunkte.

Entsprechende Analysen von Formationswässern aus dem Hangenden der Salinare im Gebiet der ehemaligen DDR zeigen andererseits eben dieses Verteilungsmuster einer linearen Abhängigkeit von Teufe und Salzgehalt der Wässer.

Es stellt sich somit die Frage nach den Gründen für derart gravierende Unterschiede zwischen beiden hinsichtlich ihrer Herkunft vergleichbaren Datengruppen.

Schließt man die Wässer aus dem Bereich von Salinaren und aus dem Liegenden der Salinare in die Betrachtungen ein, so ergeben sich auch hier wesentliche Differenzen. Formationswässer des Buntsandsteins, des Zechsteins und des Rotliegenden im Gebiet der ehemaligen DDR sind, abgesehen von Proben aus den randlichen Bereichen des Sedimentbeckens, durchgängig salzgesättigt. Der größere Teil von Wasserproben aus entsprechenden Formationen des Niedersächsischen Beckens zeigt dagegen eine deutliche, meist sogar eine starke Untersättigung an gelösten Salzen.

Bei den entsprechenden Proben handelt es sich um Formationswässer aus Wasserleitern, die in Teufen von mehreren tausend Metern in unmittelbarem Kontakt mit Salzgesteinen stehen. Eine Salzuntersättigung dieser Wässer ist daher in hohem Maße unwahrscheinlich. So gesehen vermitteln die Daten aus dem Gebiet der DDR ein in sich wesentlich stimmigeres Bild.

Darüber hinaus deutet die chemische Zusammensetzung der Wässer des Präsalinars aus dem Bereich des Niedersächsischen Beckens auf eine

verdünnung ursprünglich gesättigter Lösungen durch gering mineralisierte Wässer hin.

Es liegt somit die Vermutung nahe, daß die große Streuung in der Beziehung zwischen Salzgehalt und Teufe bei den Wässern des Post-salinars im Gebiet des Niedersächsischen Beckens ebenfalls auf eine Verfälschung der Wasserproben durch Bohrspülung zurückzuführen ist.

Da diese Wässer generell nicht den Grad der Salzsättigung erreichen, ist ein direkter Nachweis ist allerdings nur schwer zu führen.

Indirekte Hinweise auf eine sekundäre Veränderung der Wässer ergeben sich insofern, als bei diesen Wässern ebenfalls eine lineare Korrelation zwischen Chlorid und den Hauptkationen besteht und sich die Datenpunkte in den entsprechenden Korrelationsdiagrammen ebenfalls entlang von Verdünnungsgeraden anordnen. Darüber hinaus weisen die Wässer im Vergleich zu den Formationswässern aus dem Gebiet der ehemaligen DDR tendenziell niedrigere Salzgehalte auf.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann also davon ausgegangen werden, daß der überwiegende Teil der analysierten Wässer - im Gegensatz zu den Wasserproben aus dem Gebiet der ehemaligen DDR - in unterschiedlichem starkem Maße sekundär verdünnt und dadurch verfälscht wurde. In erster Linie ist dabei an eine Verdünnung der Formationswässer durch Bohrspülung, bei tiefliegenden Formationen mit Reservoirtemperaturen von z.T. mehr als 100 °C darüber hinaus auch an eine Verdünnung durch kondensierenden Wasserdampf zu denken.

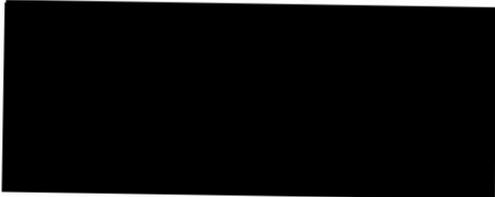
Das der BGR zugänglich gemachte Datenmaterial über die chemische Beschaffenheit von Tiefenwässern aus Niedersachsen ist daher mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht geeignet, Aussagen über die Existenz eines linearen Dichte- und Salinitätsprofils im Modellgebiet Konrad außerhalb des aufgeschlossenen Bereiches abzuleiten.

Die in der "Erläuternden Unterlage" EU 338 (██████████ 1990a) getrof-

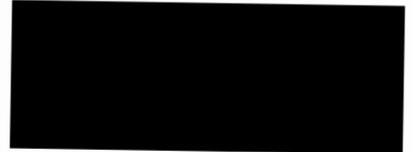
fenen Feststellungen über die Entstehung der Tiefenwässer in der Grube Konrad und ihre Bewegung werden dadurch weder eingeschränkt noch widerlegt.

**BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE**

**Im Auftrag:**



**Sachbearbeiter:**



#### 4. Literaturverzeichnis

- BERRY, F.A.F. (1969): Relative factors influencing membrane filtration effects in geologic environments. - *Chemical Geology*, Vol. 4, S 295-301.
- BREDEHOEFT, J.O.; BLYTH, C.R.; WHITE, W.A. & MAXEY, G.B. (1963): Possible mechanism for concentration of brines in subsurface formation. - *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologists*, 47, S.257-269.
- CARPENTER, A.B. (1978): Origin and chemical evolution of brines insedimentary basins. - *Oklahoma Geol. Surv. Circ.* 79, S. 60-77.
- CARPENTER, A.F.; TROUT, M.L. & PICKETT, E.E. (1974): Preliminary report on the origin and chemical evolution of lead-and-zinc-rich oil field brines in Central Mississippi. - *Economic Geology*, Vol. 69, No. 8, S. 1191-1206.
- DICKEY, P.A. (1968): Increasing concentration of subsurface brines with depth. - *Chemical Geology*, Vol. 4, S. 361-370.
- EGEBERG, K.P. & AAGAARD, P. (1989): Origin and evolution of formation waters from oil fields on the Norwegian shelf. - *Applied Geochemistry*, Vol. 4, S. 131-142.
- ENGELHARDT, von W. (1973): Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen. - *Sediment-Petrographie* (Hrbg. W.v.ENGELHARDT, H. FÜCHTBAUER, G. MÜLLER), Teil III, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- HAYDON, P.R. & GRAF, D.L. (1985): Studies of smectite membrane behavoir: Temperature dependance, 20-180 o C. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 50, S. 115-121.
- KHARAKA, Y.K.; MAEST, A.S.; CAROTHERS, W.W.; LAW, L.M.; LAMOTHE, P.J. & FRIES, T.L. (1987): Geochemistry of metal-rich brines from central Mississippi salt dome basin, U.S.A. - *Applied Geochemistry*, Vol. 2, S. 543-561.
- KHARAKA, K.Y. & BERRY A.F. (1973): Simultaneous flow of water and solutes through geological membranes - I. Experimental investigation. - *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 37, S. 2577-2603.

LAIER, T. (1989): Mapping of low enthalpy brines in Denmark for geothermal exploitation. - Proceedings of the 6th International Symposium on Water-Rock Interaction / Malvern, S. 409-412.

LAND, L.S. (1987): The major ion chemistry of saline brines in sedimentary basins. - Aus: Physics and chemistry of porous Media II (Hrsg. J.R. Banavar, J. Koplik u. K.W. Winkler) - American Institute of Physics Conference Proceedings 154, S. 160-179.

MANGELSDORF, P.C.; MANHEIM, F.T. & GIESKES, J.M.T.M. (1970): Role of gravity, temperature gradients, and ion-exchange media in formation of fossil brines. - American Assoc. Petrol. Geol. Bull., Vol. 54, No. 4, S. 617-626.

MANHEIM, F.T. & HORN, M.K. (1968): Composition of deeper subsurface waters along the Atlantic continental margin. - Southeast. Geol., Vol. 8, S. 215-236.

MÜLLER, E.P. & PAPENDIECK, G. (1975): Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. - Z. geol. Wiss., Jahrg. 3, H. 2, S. 167 - 196.

PLUMMER, L.N., PARKHURST, D.L., FLEMING, G.W. & DUNKLE S.A. (1988): A computer program incorporating Pitzer's equations for calculation of geochemical reactions in brines. - U.S. Geol. Surv., Water-Resources Report 88-4153.

TRUSHEIM, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. - Beih. Geol. Jb., H. 112.



WHITE, D.E. (1965): Saline waters of sedimentary rocks. - Aus:  
Fluids in subsurface environments (Hrsg. YOUNG, A. & GALLEY  
J.E.), Mem. Am. Ass. Petrol. Geol., Vol. 4, S. 342-366.