

Anwendbarkeit der Indikatoren *“teufenabhängige Mineralisation / Salzgehalt”* für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung *“keine oder langsame Grundwasserbewegung”*

Bericht an den AKEnd

Th. Brasser

W. Brewitz

Stand: 18.02.2002

GRS-A-2956

Inhaltsverzeichnis

| | |
|------------------------------|------------|
| Abbildungsverzeichnis | III |
|------------------------------|------------|

| | |
|----------------------------|----------|
| Tabellenverzeichnis | V |
|----------------------------|----------|

| | |
|----------------------------|----------|
| Tabellenverzeichnis | V |
|----------------------------|----------|

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Einführung | 1 |
| 1.1 | Aufgabenstellung | 1 |
| 1.2 | Arbeitsprogramm | 1 |
| 1.3 | Abgrenzung | 2 |
| 2 | Grundlagen | 4 |
| 2.1 | Übersicht geologischer Strukturen in Deutschland | 4 |
| 2.1.1 | Norddeutsche Senke | 4 |
| 2.1.2 | Mittleres Bergland | 5 |
| 2.1.3 | Östliches Bergland | 6 |
| 2.1.4 | Südliche Schichtstufenländer | 6 |
| 2.1.5 | Südliche Flachländer | 7 |
| 2.1.6 | Junges Faltengebirge | 7 |
| 2.2 | Grundwasservorkommen | 7 |
| 2.2.1 | Magmatite und Orthogesteine | 8 |
| 2.2.2 | Metamorphite | 8 |
| 2.2.3 | Gesteine des gefalteten Paläozoikums | 9 |
| 2.2.4 | Das Molassestockwerk des paläozoischen Gebirges | 10 |
| 2.2.5 | Sandsteine des Mesozoikums | 10 |
| 2.2.6 | Mergelsteine des Mesozoikums und des Tertiär | 11 |
| 2.2.7 | Wasserzirkulation in verkarstungsfähigen Gesteinen | 11 |
| 2.2.8 | Lockergesteine des Quartär und Tertiär | 12 |
| 2.3 | Beschaffenheit der Grundwässer in Deutschland | 13 |
| 2.3.1 | Allgemeines | 14 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.2 | Grundwässer im kristallinen Grundgebirge (Magmatite und Metamorphite) | 18 |
| 2.3.3 | Grundwässer in Sandsteinen | 19 |
| 2.3.4 | Grundwässer in Karbonatgesteinen | 19 |
| 2.3.5 | Tiefengrundwässer | 20 |
| 2.3.6 | Mineralwässer | 21 |
| 2.3.7 | Formationswässer | 22 |
| 2.3.8 | Grubenwässer | 23 |
| 2.4 | Grundwässer an ausgewählten Standorten | 23 |
| 2.4.1 | Grundwässer am Standort Gorleben | 24 |
| 2.4.2 | Grubenwässer der Schachtanlage Konrad | 25 |
| 2.4.3 | Grubenwässer im Ruhrgebiet | 26 |
| 2.4.4 | Tiefenwässer der Norddeutschen Senke und des Thüringer Beckens | 27 |
| 2.4.5 | Gruben- und Grundwässer des Erzgebirges | 28 |
| 2.4.6 | Zusammenfassung | 29 |
| 3 | Teufenabhängige Mineralisation | 31 |
| 3.1 | Einführung | 31 |
| 3.2 | Schachtanlage Konrad | 34 |
| 3.3 | Gorleben | 39 |
| 3.4 | Norddeutschland | 40 |
| 3.5 | Kristallgebiete | 48 |
| 3.6 | Unterfranken | 51 |
| 3.7 | Nordrhein-Westfalen | 52 |
| 3.8 | Sonstige Gebiete | 54 |
| 4 | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen | 57 |
| 5 | Literatur | 61 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Geologisch-tektonische Strukturkarte von Mitteleuropa | 5 |
| Abbildung 2: Großregionale Grundwasser-Zirkulationssysteme | 15 |
| Abbildung 3: Übersichtskarte der Tiefenwässer-Fazies | 15 |
| Abbildung 4: Schema der Genese und des Kreislaufs der Tiefenwässer..... | 16 |
| Abbildung 5: Faktoren und Prozesse bei der Entwicklung einer geogenen Grundwasserbeschaffenheit..... | 16 |
| Abbildung 6: Übersichtskarte der Konzentrationen der Tiefenwässer | 18 |
| Abbildung 7: Gesamtkonzentration unterschiedlicher Grundwässer im Verhältnis zur Tiefe in verschiedenen Regionen der U.S.A | 32 |
| Abbildung 8: Beziehung zwischen Salinität, chemischer Zusammensetzung und Teufe in mesozoischen Formationswässern Dänemarks..... | 33 |
| Abbildung 9: Salzkonzentrationen in Wasserproben als Funktion der Tiefe (Schachtanlage Konrad)..... | 36 |
| Abbildung 10: Chlorid-Sättigung der Wässer aus der Grube Konrad in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe..... | 37 |
| Abbildung 11: Bromid- und Chlorid-Konzentrationen im Grubenwasser der Schachtanlage Konrad im Vergleich zur Meerwasser-Evaporationslinie | 38 |
| Abbildung 12: Chloridgehalte der Randsenkenwässer des "Gifhorner Troges" in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage | 39 |
| Abbildung 13: Chloridgehalte norddeutscher Salzstockrandwässer in Abhängigkeit von der Tiefenlage | 41 |
| Abbildung 14: Cl-Konzentration des Postsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage | 41 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 15: Gesamtkonzentration der Schichtwässer des Nordteils der [ehemaligen] DDR und des Thüringer Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage | 43 |
| Abbildung 16: Gesamtkonzentration von Formationswässern Nord- und Nordwestdeutschlands in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage..... | 45 |
| Abbildung 17: Charakteristische Salinitäts-/Tiefen-Beziehungen für Grundwasser in unterschiedlichen Gesteinskomplexen (schematisiert, o. M.)..... | 45 |
| Abbildung 18: Durchschnittliche Werte der Quotienten rCa/rNa und $rCa+rMg/rNa+rK$ im Adsorptionskomplex von Tonproben kontinentaler (—) bzw. mariner (--) Tonablagerungen | 46 |
| Abbildung 19: Schoeller-Diagramme; <u>links:</u> „Normaltyp“-Grundwasser aus 3 Nordschweizer Tiefbohrungen; <u>rechts:</u> Spektrum oberflächennaher Grundwässer des Südschwarzwaldes und Mittelwerte von 35 Granitwässern aus Ostbayern ... | 50 |
| Abbildung 20: Abdampfrückstand der Tiefenwässer im Ruhr-Revier in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe | 53 |
| Abbildung 21: Geologisches Querprofil durch Schwäbische Alb und Molassebecken..... | 56 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Charakteristische Porositätswerte unterschiedlicher Lockersedimente | 13 |
| Tabelle 2: Klasifikation von Grundwässern anhand ihrer Gesamtkonzentration | 17 |
| Tabelle 3: Durchschnittsgehalte der im Jahre 1981 durchgeführten Analysenserie für das in den Pumpensümpfen in der Schachtanlage Konrad gesammelte Wasser | 26 |
| Tabelle 4: Konzentrationsbereiche von Anionen in Tiefenwässern der Norddeutschen Senke und des Thüringer Beckens | 27 |
| Tabelle 5: Salzgehalte in Grundwässern am Standort Konrad | 34 |
| Tabelle 6: Zusammenstellung von Leitfähigkeiten sowie NaCl-Gehalten in 25 verschiedenen GoHy-Bohrungen | 40 |
| Tabelle 7: Referenzgrundwässer im Kristallingestein | 51 |

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Mit Hilfe der dieser Studie zugrunde liegenden Recherchen sollte überprüft werden, ob eine teufenabhängige Zunahme der Grundwasser-Mineralisation als Indikator für „*keine oder langsame Grundwasserbewegung*“ (in der Endlagerteufe) benutzt werden kann und ob ohne weitere Expertisen entsprechende quantitative Kriterien formuliert werden können. Der Hintergrund für diese Fragestellungen liegt im Ziel des „Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ (AKEnd) begründet, letztendlich Kriterien zu entwickeln, die auf eine langsame Grundwassertransportgeschwindigkeit in einer großräumigen Region rückschließen lassen.

Der AKEnd hat bzgl. der o. g. Aufgabenstellungen deshalb einen Fragenkatalog formuliert, dessen Inhalt sich im wesentlichen darauf konzentriert, ob bzw. für welche geologische Gegebenheiten ein(e) großräumige(r), lineare(r), teufenabhängige(r) Mineralisation / Salzgehalt als Indikator für eine geringe Grundwassergeschwindigkeit dienen kann.

1.2 Arbeitsprogramm

Wichtigste Grundlage zur Beantwortung der o. g. Fragestellungen ist eine Literaturrecherche zum Chemismus tiefer Grundwässer und zu den hydraulischen Eigenschaften der zugehörigen Aquifere in unterschiedlichen großräumigen Regionen Deutschlands gewesen.

Diesbezüglich wurde eine gestufte Vorgehensweise gewählt:

- Darstellung von geochemischen Prozessen, welche die Zusammensetzung bzw. Mineralisation von tiefen Grundwässern beeinflussen (Basis: Literaturdaten).
- Ableitung grundsätzlich günstiger bzw. ungünstiger Bedingungen zur Erfüllung der allgemeinen Anforderung „*keine oder langsame Grundwasserbewegung*“.
- Zusammenstellung und Analyse wesentlicher Ergebnisse aus dem FuE-Vorhaben „*Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Fest-*

gesteinen“ (GRS-144) sowie aus einer Reihe von Felduntersuchungen, die entweder bereits in Berichtsform vorliegen oder relativ leicht beschafft werden konnten.

- Erweiterung der Recherchen auf hydrogeologische Fachpublikationen, geologische Landesämter sowie Diplom- und Doktorarbeiten bzw. Forschungsvorhaben zu diesem Themenkreis.

Aufgrund sehr unterschiedlicher Informationsdichten und einem begrenzten, vorgegebenen Arbeitsumfang konnte die Bearbeitung der einzelnen Teilaufgaben in vorliegenden der Studie auch nur in einem sehr unterschiedlichen Detaillierungsgrad erfolgen. Der vorliegende Bericht enthält als Ergebnis der Recherchen deshalb vereinbarungsgemäß einen **ersten Überblick** über den Sachstand und die Erfolgsaussichten weiterführender Untersuchungen. Er enthält weiterhin Hinweise darauf, inwieweit die ermittelten Informationen und Daten zur Beantwortung der o. g. Fragestellungen herangezogen werden können. Abschließend wird eine Empfehlung zur weiteren Vorgehensweise ausgesprochen.

1.3 Abgrenzung

Zum besseren Verständnis des spezifischen, auf die Fragestellung dieser Studie bezogenen Sachverhaltes dient ein kurzer Abriss über geologische Strukturen, Grundwasservorkommen sowie die generelle Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland. Grundwasserbeschaffenheit lässt sich wiederum auch als Salinität bzw. Mineralisation ausdrücken, so dass dieser Parameter wesentlicher Ausgangspunkt für die Prüfung der Fragestellung gewesen ist, ob eine teufenabhängige Zunahme der Grundwasser-Mineralisation (chemischer Parameter) als Indikator für den physikalischen Parameter „*keine oder langsame Grundwasserbewegung*“ benutzt werden kann. Zwangsläufig steht der vorliegende Bericht deshalb auch in einem inhaltlichen Zusammenhang mit dem +/-parallel erstellten Bericht *Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung „günstige hydrochemische Bedingungen“* (GRS-A-2939). Letzterer basiert ebenfalls auf der generellen Grundwasser-beschaffenheit, verfolgt aber das Ziel zu prüfen, ob sich hydrochemische Milieus ableiten und ggf. regional eingrenzen lassen, die einer Freisetzung und einem Transport von Radionukliden entgegenwirken.

Gewisse inhaltliche Überschneidungen sind dabei unvermeidbar, um den jeweiligen Sachverhalt in seinem Zusammenhang darzustellen. Dies gilt insbesondere für die beiden Standorte Gorleben und Konrad, da sich die im Rahmen der dort vorgenomme-

nen Standortuntersuchungen erzielten Ergebnisse als besonders beispielhaft zur Bearbeitung der Fragestellungen beider o. g. Studien herausgestellt haben.

Der im vorliegenden Bericht vermittelte Überblick über geologische Strukturen, Grundwasservorkommen sowie die generelle Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland wird deshalb im Bericht GRS-A-2939 zwar inhaltlich aufgegriffen, dann aber am Beispiel von vier Regionen (Norddeutsches Tiefland, Mesozoische Deckgebirgsstrukturen, Subvariszische Saumsenke sowie Molasse-Becken) aufgabenspezifisch vertieft.

2 Grundlagen

Zur Einführung in die Thematik dieser Studie erfolgt zunächst eine kurze Charakterisierung geologischer Strukturen sowie eine Kurzbeschreibung von Grundwasser-Vorkommen und Grundwasser-Beschaffenheiten, die i. w. dem GRS-Bericht 144 /MUE 97/ entnommen sind und einer besseren Orientierung bei der Darstellung der AP-spezifischen Resultate in Kapitel 3 dienen. Wo erforderlich, sind diese Ausführungen durch zusätzliche Zitate ergänzt.

2.1 Übersicht geologischer Strukturen in Deutschland

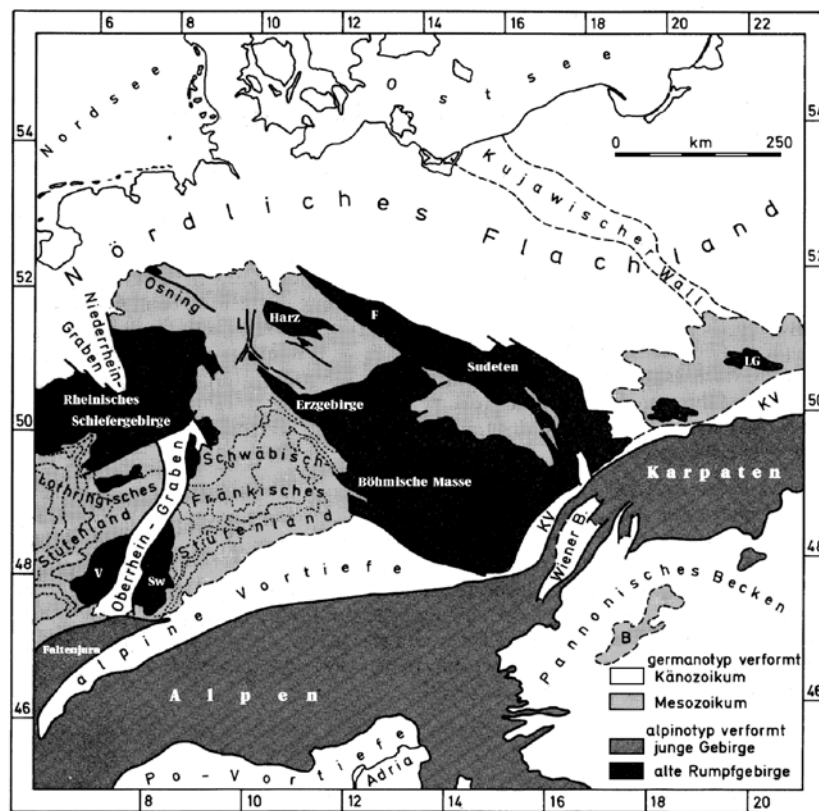
Die Gliederung geologischer Strukturen erfolgt im allgemeinen nach morphologischen und erdgeschichtlich-tektonischen Kriterien. Die Großgliederung des mitteleuropäischen Raumes in alte Rumpfgebirge, alpinotyp verformte junge Gebirge, Mesozoikum und germanotyp verformtes Känozoikum ist in Abbildung 1 dargestellt /CAR 75/.

Nachfolgend werden die in Deutschland vorhandenen Großlandschaften hinsichtlich auftretender Gesteinsformationen, deren geologischen Aufbau sowie ihrer erdgeschichtlichen Entwicklung kurz beschrieben.

2.1.1 Norddeutsche Senke

Der Unterbau der norddeutschen Senke besteht - insbesondere in deren Nordteil - aus Trias-Ablagerungen (Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper), in die Tröge mit mächtiger Unter- und Mitteljura-Entwicklung eingesenkt sind. Die im Oberen Perm in mehrfach zyklischer Folge gebildeten mächtigen Steinsalz-, Kali- und Magnesiumsalze traten im Keuper in ihr diapirisches Stadium. Aufgrund der Dichteunterschiede zwischen dem Salzgestein einerseits und dem Deckgebirge der Trias andererseits kam es, teilweise durch Sockelstörungen initiiert, zum Salzaufstieg. Die bis in die geologische Gegenwart anhaltende Halokinese führte im Nordwesten zur Ausbildung einer Vielzahl von Salzstöcken. Im Nordosten ist die Entwicklung weniger weit fortgeschritten, die Zechsteinsalze sind hier als Salzkissen ausgebildet. Die z. T. mächtigen Ablagerungen der Oberkreide werden von tonigen und sandigen Sedimenten des Tertiärs überdeckt. Die heutige Morphologie wird neben den Vorgängen des Salzaufstieges i. w. durch

glaziofluviale Sedimente des Quartärs - als Folge mehrerer Eisvorstöße aus Skandinavien bestimmt.



B = Bakony-Wald, F = Flechtinger Höhenzug, KV = Karpaten-Vortiefe, L = Leine-Graben, LG = Lysa Gora, O = Odenwald, S = Spessart, SW = Schwarzwald, T = Thüringer Wald, V = Vogesen

Abbildung 1: Geologisch-tektonische Strukturkarte von Mitteleuropa /CAR 75/

2.1.2 Mittleres Bergland

Eine große Einheit bildet das Rheinische Schiefergebirge mit seinen i. w. stark verfallenen, verschuppten und zerbrochenen devonischen Einheiten (u. a. Schiefer, Kalke, Sandsteine); randlich wird es von Unterkarbon überlagert. Ältere Schichten streichen nur an seinem Südrand im Taunus sowie in den Ardennen aus. Mit Ausnahme eines äußerst kleinen Areals an der belgischen Grenze fehlen posttektonische Granite. Im Oberkarbon entwickelte sich am Nordwestrand des Schiefergebirges als Folge tektonischer und sedimentärer Vorgänge eine Kohlelagerstätte, bestehend aus mehr als 100 aufeinander folgenden Kohlenflözen. In vielen Teilen des Rheinischen Schiefergebirges brachen in jüngerer erdgeschichtlicher Zeit zahlreiche Vulkane aus, so im Westerwald, Neuwieder Becken, Siebengebirge und in der Eifel. Mit dem Vulkanismus war die

Bildung syndimentärer Roteisensteinlager sowie sulfidischer Blei - Zink - Vererzungen verbunden.

Von ähnlichem Bau und Alter sind der Flechtinger Höhenzug, der Harz sowie das Thüringische Schiefergebirge. Die Lücken zwischen diesen in junger Zeit gehobenen und freigelegten Gebirgsblöcken sind durch mesozoische Schichten ausgefüllt, unter denen der Buntsandstein die größte Verbreitung besitzt. Erst in nördlichen Bereichen sind jüngere Formationen des Jura und der Kreide abgelagert und erhalten geblieben. Die wechselnde Verteilung der Schichten ist auf Verschiebungs- und Bruchvorgänge zurückzuführen. Im Münsterland und bei Aachen liegt die Kreide tafelförmig und waagrecht über gefaltetem kohleführendem Oberkarbon, das am nördlichen Rande des Rheinischen Schiefergebirges zutage tritt.

2.1.3 Östliches Bergland

Die ältesten Gebirgsteile in Mitteleuropa treten im Böhmischem Massiv mit Schichten des Algonkium, Kambrium, Silur und Devon zutage. Metamorphosegesteine (u. a. Gneise, Glimmerschiefer und Amphibolite) stehen dort großflächig an der Tagesoberfläche an. Die Gesteine des bayerischen Teils werden von jüngeren Granitplutonen durchsetzt. Als Folge hydrothormaler Lösungen sind Quarzgänge sowie abbauwürdige Flußspatgänge entstanden, die mit ihren Mineralfüllungen bergmännisch bis in 200 m Tiefe erschlossen worden sind.

Erdgeschichtlich etwas jünger ist das kristalline Erzgebirge. Die ältesten Gesteinsbildungen sind monoton gefaltete Gneisfolgen von 2.000 bis 3.000 m Mächtigkeit. Im Laufe der erdgeschichtlichen Entwicklung kam es auch hier, ähnlich der Entwicklung in den benachbarten alten Rumpfgeländen, zu Intrusionen mit der Bildung von Gebirgsgraniten sowie abbauwürdigen Erzlagerstätten.

2.1.4 Südliche Schichtstufenländer

Relativ einheitlich sind die Krustenbereiche Süddeutschlands mit breiten weitspannig verbogenen Gesteinsformationen der Trias und des Jura aufgebaut. Der Sockel dieses Gebietes zwischen Schwarzwald und Böhmischer Masse hat sich in seiner Struktur im Laufe der Erdgeschichte kaum verändert. Während der Trias kam es zur Ablagerung von Buntsandsteinsedimenten, Muschelkalk- und Keuperschichten. Im Jura bildeten

sich vornehmlich Tonsteine, Mergel sowie Flachwasserkalksteine. Das Tertiär ist durch die Ausbildung von wenigen größeren (z. B. Vogelsberg, Rhön) sowie zahlreichen kleineren Vulkangesteinsgebieten gekennzeichnet.

2.1.5 Südliche Flachländer

Neben dem einheitlich aufgebauten norddeutschen Flachland gibt es im Süden eine Anzahl kleinerer Flachländer unterschiedlicher geologischer Entstehung. So sind zwar der Oberrheintal-Graben und der außeralpidische Molasse-Trog dem nördlichen Flachland sowohl in der flächenhaften Ausdehnung wie auch der erdgeschichtlichen Entwicklung wenig vergleichbar. Allen drei Regionen ist jedoch eine tertiäre Sedimentbedeckung mit Mächtigkeiten von bis zu mehreren tausend Metern gemeinsam.

2.1.6 Junges Faltengebirge

Die Alpen stellen ein erdgeschichtlich junges Gebirge mit enger Faltung, hohem Metamorphosegrad und weitem Deckenschub dar. Die anschließende Hebung der tektonischen Körper, insbesondere im Jungtertiär und Quartär, hat ein ausgeprägtes Relief mit langen schmalen Tälern zur Folge. Die Hauptmasse der Abtragungsprodukte wurde hauptsächlich in die nördlich und südlich der Gebirge entstandenen Vortiefen sedimentiert.

2.2 Grundwasservorkommen

Grundwasservorkommen werden in der Literatur insbesondere durch Angaben zur Ergiebigkeit der Grundwasserspender beschrieben und bewertet. Je nach Art der Grundwasserspender werden die Ergiebigkeiten in Wassermenge pro Zeiteinheit angegeben bzw. zusätzlich auf Bohrtiefen oder auf die zu betrachtenden Grundwasserspendiflächen bezogen. Nachfolgend werden wichtige Grundwasservorkommen in Bezug auf die jeweiligen geologischen Formationen beschrieben.

2.2.1 Magmatite und Orthogesteine

Das präkambrische kristalline Grundgebirge besteht aus Intrusiv- und Effusivgesteinen sowie komplexen Serien von Sedimenten, die einen unterschiedlichen Metamorphosegrad und unterschiedliches Alter aufweisen. Das Hohlraumvolumen besteht fast ausschließlich aus Klüften, die durch Verwitterung oberflächlich geweitet oder (z. B. Marmor) tiefgründig verkarstet sind. Der Wasserspiegel kann dann ggf. erst in mehr als 100 m Tiefe angetroffen werden.

Entsprechend dem geologisch differenzierten Aufbau schwankt die Ergiebigkeit der Wasserzuläufe (Quellen, Brunnen oder Zulauf in Gruben) erheblich. Messungen im bayerischen Wald haben gezeigt, dass Quellschüttungen von $0,1$ bis 1 l s^{-1} auftreten und spezifische Ergiebigkeiten um Mittelwerte von $0,03 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ schwanken. In den westerzgebirgisch-vogtländischen Graniten liegt die spezifische Ergiebigkeit zahlreicher Bohrbrunnen, ähnlich wie in dem großen Granitgebiet der sächsischen Oberlausitz mit unterschiedlichen Granodioriten und Graniten, meist zwischen $0,01$ und $0,05 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, teilweise auch höher (bei Bohrtiefen bis 150 m). Im Fichtelgebirgsgranit wurden in Bohrungen spezifische Ergiebigkeiten von $0,01 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ festgestellt, während der Wasserzulauf in einem auflässigen Schacht mit $0,2 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ermittelt wurde.

2.2.2 Metamorphite

Petrographisch umfasst diese Gesteinsgruppe sehr unterschiedliche Festgesteinstypen (u. a. Gneise, Glimmerschiefer, Phyllite), hydrogeologisch haben sie jedoch wichtige Gemeinsamkeiten:

- eine relativ geringe bis sehr geringe Fugenbildung (bedingt durch ihre starke Schieferigkeit und den hohen Anteil an Glimmer- bzw. Tonmineralen) sowie
- eine oft sehr tiefgründige Verwitterung (mit tonig-schluffigen Zersetzungsprodukten).

Das Hohlraumvolumen beschränkt sich auch hier auf Klüfte und Störungen sowie Auflockerungszonen im Zusammenhang mit der Verwitterung. In Störungszonen kann die Verwitterung, die sich oft durch eine Verlehmung auszeichnet, Tiefen von bis zu 20 m erreichen.

Die spezifische Ergiebigkeit der Gneise im bayrischen Wald liegt im allgemeinen um $0,01 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, steigt aber z. B. in den Randzonen der Münchberger Gneismasse aufgrund der dort intensiven tektonischen Zerrüttung. Die Brunnenergiebigkeit beträgt bis 10 l s^{-1} bei Brunnentiefen von 40 bis 100 m. Im Erzgebirge liegt die Wasserführung der Gneise und Glimmerschiefer bei $0,01 \text{ l s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und darunter, so dass aus über 100 m tiefen Brunnen vielfach kaum mehr als 0,5 bis $0,8 \text{ l s}^{-1}$ zu gewinnen sind.

2.2.3 Gesteine des gefalteten Paläozoikums

Die Gesteine des gefalteten Paläozoikum umfassen u. a. Quarzite, Sandsteine, Konglomerate, Grauwacken, Siltsteine, Tonsteine, Diabase, Schalsteine, Keratophyre und Tuffe.

Die Quarzite des Unterdevon stellen sehr feste und dichte Gesteine dar, die kein nennenswertes Porenvolumen besitzen. Wegen ihrer Sprödigkeit sind sie bei der Gebirgsbildung stark zerbrochen und zerstückelt worden. Die zahlreich gebildeten Fugen ermöglichen aber eine gute Wasserbeweglichkeit. So sind z. B. im Taunusquarzit Brunnen mit einer Ergiebigkeit von 25 l s^{-1} erschlossen.

Die Sandsteine und Grauwacken des Unteren Mitteldevon können klüftig und damit wasserhöffig sein. Die Grundwasserspenden betragen hier i. d. R. $5 - 7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

Siltsteine und Tonsteine des Mittleren Unterdevon sind u. a. im zentralen Teil des Rheinischen Schiefergebirges zu finden. Die Voraussetzungen für eine Wasserhöffigkeit werden hier oftmals durch das Fehlen junger Störungen gemindert. Bekannt sind Grundwasserspenden von $0,9$ bis $1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

Bei Diabasen, Schalsteinen, Keratophyren und Tuffen ist die Kluftwasserführung sehr unterschiedlich ausgebildet. Massive Diabase und die Schalsteine erweisen sich als relativ unergiebig, Keratophyre und insbesondere Tuffe haben eine günstige bis mittelhohe Grundwasserführung. Viele stillgelegte Eisenerzgruben in diesem Bereich sind heute wichtige Grundwasserlieferanten, so in der Lahn-Dillmulde mit einem Zufluss von bis zu 100 l s^{-1} .

Die ungefalteten paläozoischen Vorlandsedimente zwischen Ruhrgebiet und Nordsee weisen eine Nutzporosität von 12 bis 28 % auf. Die Versenkung in größere Tiefen hat

allerdings die Verkittung der Porenräume durch Mineralbildung begünstigt, was die Wasserbeweglichkeit deutlich mindert.

2.2.4 Das Molassestockwerk des paläozoischen Gebirges

Die Molassetröge des Oberkarbon und des Perm (u. a. sächsisch-thüringischer Raum) zeichnen sich entsprechend ihrer überwiegend fluviatilen Entstehung, unregelmäßig verteilten Ergüssen und Intrusionen vulkanischer Gesteine durch einen sehr schnellen Fazieswechsel aus. Die Gesteine weisen, besonders im Unterrotliegenden, meist einen hohen Tonanteil, geringe Klüftung bzw. geringe Öffnung der Fugen und praktisch keine nutzbare Porosität auf.

Die Sandsteinkomplexe und Konglomerate, vor allem im Oberrotliegenden, zeigen demgegenüber günstigere hydrogeologische Verhältnisse. Poren und Kluft Hohlräume können beträchtlich sein (15 bis 20 %). Störungen und Zerrüttungszonen erhöhen die Ergiebigkeit von Bohrungen. Alte Steinkohlengruben in diesem Bereich wiesen beträchtliche Wasserzuflüsse auf. Die Grundwasserleitermächtigkeiten, oftmals in Form von Stockwerken, betragen insgesamt bis zu 200 m.

2.2.5 Sandsteine des Mesozoikums

Die Gesteinsdurchlässigkeit im Unteren und Oberen Buntsandstein der Trias ist, von Ausnahmen abgesehen, allgemein mäßig bis gering. Im Gegensatz dazu weist der Mittlere Buntsandstein mit seinen Konglomeraten ein erhebliches Hohlraumvolumen mit entsprechendem Speichervermögen und Gebirgsdurchlässigkeiten von bis zu $5 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ auf. Kernbohrungen aus verschiedenen Buntsandsteingebieten ergaben ein Porenvolumen von 2 bis 16 %.

Sandsteine der Kreide stellen Aquifere dar, die für die Wasserversorgung von Bedeutung sind bzw. werden können; so weist z. B. der Hilssandstein im Raum Salzgitter ein nutzbares Porenvolumen von 19 % auf. Die Sandsteinkomplexe weisen entsprechend ihrer lateralen Unterschiede in den Sand- und Tonanteilen unterschiedliche Porositäten bzw. Durchlässigkeiten auf. Die unterschiedliche Verfestigung bei der Diagenese, vorwiegend durch karbonatische Bindemittel, hat in mehr kleinregionalem Maß die Durchlässigkeit der Gesteine beeinflusst.

Die geologische Zeit hat offensichtlich keine entscheidende Rolle bei der Verfestigung der Gesteine gespielt, so dass es Sandsteine mit stark unterschiedlichen Porositäten gibt und Verfestigungen in allen mesozoischen Formationen, oft lagenweise, unterschiedlich stark ausgebildet sind. Die Gebirgsdurchlässigkeiten werden überwiegend durch das Trennflächengefüge bestimmt, daneben können Störungen ein großes Hohlraumvolumen bewirken.

2.2.6 Mergelsteine des Mesozoikums und des Tertiär

Im Mesozoikum und Tertiär treten weit verbreitet und z. T. in sehr großer Mächtigkeit mergelige, feste und halbfeste Gesteine auf, deren petrographische Ausbildung und hydrogeologische Eigenschaften großen Schwankungen unterliegen können. Je nach ihrem Sand-, Ton- und Karbonatanteil ändern sich Porosität, Klüftigkeit, Festigkeit und Verwitterbarkeit, Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit. Die Porendurchlässigkeit ist bei sandigen Gesteinstypen von Bedeutung, z. B. bei den Halterner Sanden mit einem nutzbaren Porenvolumen von 22,5 % und k_F -Werten von 10^{-3} bis 10^{-5} m s^{-1} . In Mergelsteinen kann die Durchlässigkeit auf Klüften mit k_F -Werten von 10^{-4} bis 10^{-7} m s^{-1} angegeben werden.

2.2.7 Wasserzirkulation in verkarstungsfähigen Gesteinen

Karbonatgesteine weisen eine begrenzte Löslichkeit auf, die in erster Linie vom CO_2 -Gehalt, aber auch von der petrographischen Beschaffenheit abhängig ist. Porosität und Durchlässigkeit sind außerordentlich unterschiedlich und reichen von dichten, porenfreien Bildungen bis zu hohlraumreichen, extrem durchlässigen Ablagerungen. Häufig gemessene Werte der Porosität junger Kalkablagerungen liegen zwischen 9 und 11 %, bei kompakten älteren Kalken unter 4 %, insbesondere bei kristallinen Kalken unter 1 %. Bezüglich der Wasserbewegung ist aber darauf zu verweisen, dass die nutzbare Porosität meistens nur einen Bruchteil der Gesamtporosität ausmacht.

Dolomitisierung erhöht die vorhandene Porosität, da die Umwandlung von Kalkspat in Dolomit eine Volumenreduktion des Gesteins von 13 % beinhaltet; insgesamt führen aber diagenetische Prozesse generell zur mechanischen Verdichtung und Zementation und damit zu einer Verminderung der Porosität. Spätdiagenetische Dolomite weisen deshalb i. d. R. eine Porosität unter 5 % auf.

Die Gebirgsdurchlässigkeit ist bei Karbonatgesteinen erheblich größer als die Gesteinsdurchlässigkeit, da die Grundwasserbewegung fast ausschließlich auf Trennfugen erfolgt. Die Gebirgsdurchlässigkeit in Gips- und Anhydritgesteinen ist ebenso in erster Linie auf Trennfugen zurückzuführen. Die hohe Löslichkeit dieser Gesteine führt zur Ausbildung von z. T. großräumigen Karsterscheinungen mit bevorzugter Fließrichtung. Die Löslichkeit von CaSO_4 steigt zudem in Gegenwart von NaCl .

2.2.8 Lockergesteine des Quartär und Tertiär

Die unverfestigten Lockergesteine des Quartär und Tertiär sind als geologisch jüngste Formationen insbesondere im Norddeutschen Raum weitflächig mit z. T. sehr unterschiedlichen Mächtigkeiten verbreitet. Das Hohlraumvolumen der Grob- bis Mittelsande ist aufgrund der hohen Porosität deutlich größer als das der meisten Festgesteine. Die Lockergesteine des Quartär und Tertiär stellen eine Grundwasserlagerstätte dar, die zur Gewinnung als Trinkwasser wie als Brauchwasser im großen Umfang genutzt wird. Gespeist wird die Lagerstätte bei unverdeckter Lagerung durch infiltrierendes Niederschlagswasser, welches während einer mehr oder weniger langen Verweilzeit in der wasserungesättigten Zone unter dem Einfluß der Schwerkraft bis zur Grundwasseroberfläche absinkt und zu Grundwasser wird.

Der Mittelwert der „tonkorrigierten Porosität“ (entspricht dem nutzbaren bzw. effektiven Porenvolumen), wird z. B. für den Standort Gorleben /BGR 94/, wie in Tabelle 1 zusammengestellt, angegeben.

Die Lockergesteinssedimente bilden z. T. weit aushaltende Aquifere mit Mächtigkeiten von lokal über 100 m. Wasserstauende Tone, wie z. B. der Rupelton, bilden die untere Grenzfläche der Lagerstätten und schirmen oftmals den Aquifer gegen den Aufstieg hochmineralisierter Wässer aus dem Mesozoikum und dem Zechsteinsalinar ab.

Tabelle 1: Charakteristische Porositätswerte unterschiedlicher Lockersedimente
/BGR 94/

| Hauptbestandteile | Mittelwert der tonkorrigierten Porosität |
|---------------------|--|
| Grobsand | ca. 32 % |
| Mittel bis Feinsand | ca. 28 % |
| Schluffsand | ca. 15 % |
| Schluff | ca. 10 % |
| Ton | ca. 7 % |

2.3 Beschaffenheit der Grundwässer in Deutschland

Bei den Datenbanken GEOFIZ Hannover, Fachinformation Technik und des UBA ist unter den Schlagwörtern: *Tiefengrundwasser, Grundwasser, Grubenwasser, Grundwasserchemismus, Grundwasserinhaltsstoffe und Grundwasserbeschaffenheit* eine Literaturrecherche durchgeführt worden /MÜH 97/. Der überwiegende Teil der recherchierten Zitate stellt die Ergebnisse von hydrogeologischen und geochemischen Untersuchungen von Grundwässern an definierten Standorten dar. Die Untersuchungen richten sich dabei u. a. auf Genese und Herkunft der Wässer, Chemismus und Mineralisation sowie im Untergrund ablaufende Transportvorgänge.

Grundlegende Arbeiten zur Hydrogeologie und Hydrochemie sind u. a. von /MAT 90/, /VOI 90/, /KAR 81/, /HÖL 80/, /ZÖT 74/ und /RIC 75/ sowie von /CAR 75/ bzgl. Mineral- und Thermalwässer publiziert. Tiefengrundwässer finden besondere Berücksichtigung u. a. in den Arbeiten von /BAT 94/, /BGR 94/, /LEH 74/, /MÜL 75/ und /PUC 64/. Kriterien zur Klassifikation bzw. Typologie von Grundwässern werden u. a. in den Arbeiten von /JÄC 70/, /GER 58/ und /GER 53/ diskutiert.

/HÖL 70/ unterscheidet verschieden zusammengesetzte Tiefenwässer entsprechend Abbildung 3, die auf der Grundlage von Anionen-Verhältnissen erstellt worden ist: ziemlich reine Cl-Wässer sind vorwiegend in Norddeutschland verbreitet, während im Bereich der Mittelgebirge überwiegend Hydrogencarbonat- oder Sulfat-Wässer angetroffen werden; die übrigen Gebiete sind durch Mischfazies gekennzeichnet. (Relativ) hydrogencarbonat-arme Wässer sind dabei konzentrationsreich und umgekehrt. /HÖL 70/ beschreibt auch eine gesetzmäßige Abfolge unterschiedlicher Wassertypen (von oben nach unten), die besonders in Süddeutschland ausgeprägt ist:

CaHCO₃ - CaSO₄ - Na₂SO₄ - NaCl

sowie folgende hydrochemische Zonen:

- bis 300 m: Zone des aktiven Kreislauf, Dominanz von HCO₃-Wässern
- bis 600 m (Tafelgebiete; in Faltungsgebieten bis 2.000 m): Zone erschwerter Zirkulation, HCO₃- und SO₄-/Cl-Wässer stärkerer Konzentration
- darunter: Zone stagnierender Wässer mit sehr verzögertem Wasseraustausch, hoch mineralisierte Cl-Wässer

Im Tiefengrundwasserleiter nimmt die Mineralisation des Grundwassers durch chemische Reaktionen zwischen Grundwasser und Kontaktgestein i. a. zu. Bei langsam fließendem Grundwasserstrom und großer innerer Oberfläche des Grundwasserleiters besteht eine verstärkte Tendenz zur Einstellung eines thermodynamischen Gleichgewichtes, das aufgrund von häufigen Störungen aber i. d. R. nicht erreicht wird.

Unabhängig von Durchlässigkeiten der grundwasserführenden Schichten sind Grundwasserfließgeschwindigkeiten in tiefen Aquiferen aufgrund geringer hydraulischer Gradienten i. a. sehr gering; eine Entnahme von Tiefengrundwasser führt zu starken Veränderungen im Strömungsfeld, so dass auch tiefere Schichten erfasst und hoch mineralisierte Wässer beigezogen werden können /DVW 87/. (Abbildung 2)

2.3.1 Allgemeines

Die Beschaffenheit der Grundwässer hängt i. w. von der Menge und Zusammensetzung der Niederschlagswässer und von den im Untergrund ablaufenden geochemischen Prozessen ab. Auf seinem Weg durch den geologischen Untergrund wird das Grundwasser durch Änderungen im Gehalt an gelösten Bestandteilen verändert. Das Ausmaß der Veränderung ist dabei u. a. abhängig von der durchfließenden Wassermenge, der Verweilzeit, der lithologischen Beschaffenheit der Gesteine, der Temperatur, sowie den Lösungseigenschaften des Grundwassers selbst. Die Wechselwirkungen zwischen Gestein und Wasser werden u. a. durch Vorgänge wie Hydrolyse, Auflösung, Ausfällung, Sorption, Ionenaustausch und Redoxprozesse bestimmt. Auch biologische Vorgänge, z. B. durch mikrobiellen Stoffumsatz, werden bis in größere Tiefen beschrieben.

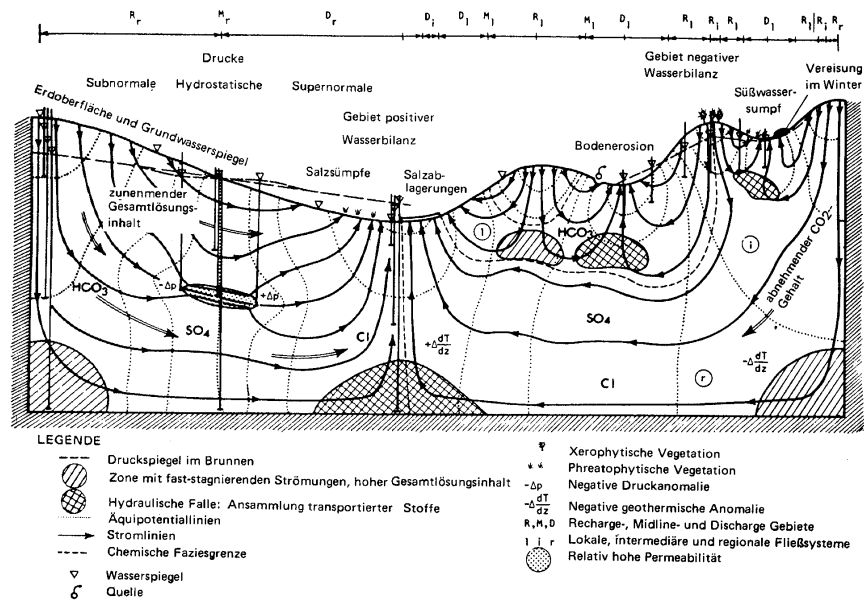


Abbildung 2: Großregionale Grundwasser-Zirkulationssysteme /DVW 87/

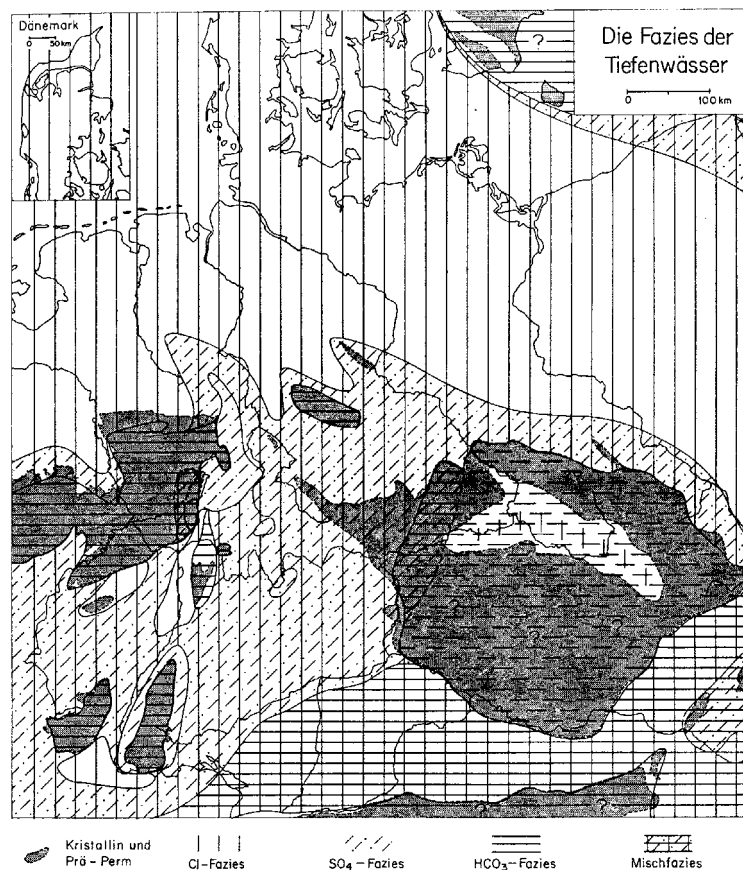


Abbildung 3: Übersichtskarte der Tiefenwasser-Fazies /HÖL 70/

Mit zunehmender Tiefe gewinnen Vorgänge wie Diagenese und Metamorphose an Bedeutung. Die Genese sowie der Charakter von Wässern in größerer Tiefe lassen

sich oftmals auch auf eine Überprägung von in früherer Erdgeschichte entstandenem Wasser zurückführen. Graphische Umsetzungen der Beschaffenheitsgenese sind in Abbildung 4 sowie Abbildung 5 dargestellt.

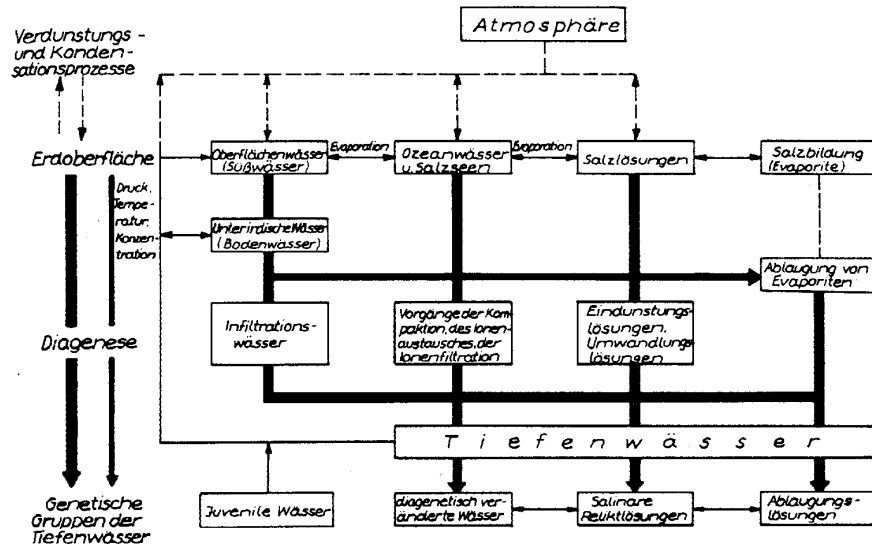


Abbildung 4: Schema der Genese und des Kreislaufs der Tiefenwässer /MÜL75/

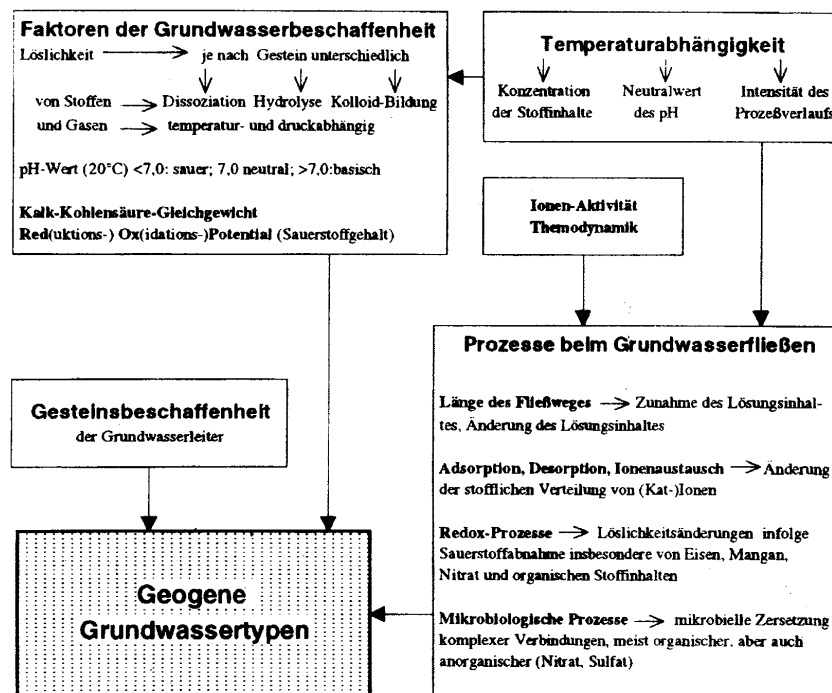


Abbildung 5: Faktoren und Prozesse bei der Entwicklung einer geogenen Grundwasserbeschaffenheit /DVW99/

Die Darstellung von Grundwasser-Eigenschaften erfolgt in der Literatur /MAT 90/ bevorzugt auf Grundlage analytisch ermittelter Inhaltsstoffe, also der gelösten Haupt- und Nebenbestandteile (Anionen, Kationen, nicht ionisierte Teile, gelöste Gase) und ggf. ungelösten Bestandteile (suspendierte Substanzen) sowie der Temperatur, der Leitfähigkeit und des pH-Wertes; darüber hinaus werden ggf. auch Daten zur Dichte, zum Redox-Potential sowie zur Konzentration bestimmter Isotope (insb. für die Altersbestimmung) herangezogen.

Nach der Gesamtkonzentration an gelösten Bestandteilen lassen sich Grundwässer generell einteilen in (Tabelle 2):

Tabelle 2: Klassifikation von Grundwässern anhand ihrer Gesamtkonzentration

| Grundwasser | Konzentration |
|-------------|-------------------------------------|
| Süßwasser | < 1.000 mg l ⁻¹ |
| Brackwasser | 1.000 - 10.000 mg l ⁻¹ |
| Salzwasser | 10.000 - 100.000 mg l ⁻¹ |
| Sole | > 100.000 mg l ⁻¹ |

Zur leichteren (und z. T. normierten) Auswertung wird oftmals eine graphische Auftragung von Analysendaten in Diagrammen vorgenommen. Eine Typisierung anhand der prozentualen Verteilung der Kationen und Anionen mit bis zu sechs Angaben der Hauptionen (Na, Ca, Mg, Cl, SO₄ und HCO₃) der Lösung findet dabei bevorzugt Anwendung. Die Art der Typisierung ist einfach und anschaulich, Besonderheiten der Wässer werden dabei allerdings nicht miterfasst.

Möglich ist auch die Typisierung anhand des pH-Wertes (saure, neutrale und alkalische Wässer), sowie des Eh-Wertes (Normal- bzw. Reduktionstyp). Besonderheiten, wie z. B. die relativ hohe Konzentration einzelner Wasserinhaltsstoffe (u. a. Kohlensäure, Schwefel, Eisen, Jod, Arsen, Radon), dienen ebenfalls direkt einer Typisierung oder werden gesondert angegeben.

Zahlreiche Autoren bevorzugen bei der Darstellung und Typisierung von Grundwässern den direkten Bezug zum dazugehörigen Aquifersystem (z. B. Buntsandsteinwasser, Keuperwasser). Eine Gliederung erfolgt teilweise auch nach Tiefenlage des Grundwasservorkommens sowie nach der Art der Nutzung der Grundwässer.

Nachfolgend werden die generellen Grundwasserbeschaffenheiten relevanter Festgesteinsaquifere beschrieben und in Ergänzung hierzu die in diesem Zusammenhang gebräuchlichen Termini Tiefengrundwasser, Formationswasser und Grubenwas-

ser erläutert. Charakteristische Konzentrationsbereiche von Tiefenwässern (Abbildung 6) sind der Publikation von /HÖL 70/ entnommen.

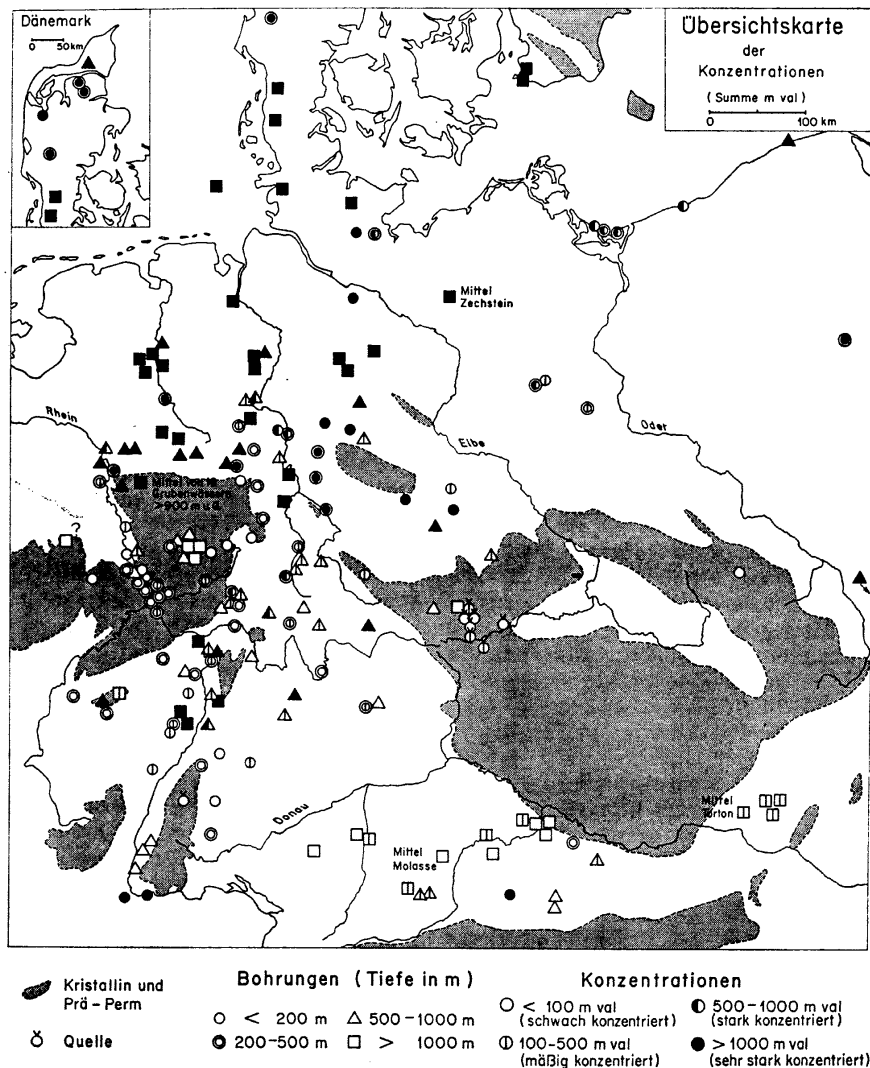


Abbildung 6: Übersichtskarte der Konzentrationen der Tiefenwässer /HÖL 70/

2.3.2 Grundwässer im kristallinen Grundgebirge (Magmatite und Metamorphite)

Die Beschaffenheit der Grundwässer in Metamorphiten sowie Magmatiten ist bei ähnlicher chemischer Beschaffenheit der Gesteine vergleichbar. Grundwässer in kristallinen Gesteinen enthalten als Folge der langsamen Silikatverwitterung im allgemeinen nur geringe Gehalte an festen gelösten Bestandteilen. Charakteristisch sind jedoch erhöhte SiO_2 -Gehalte. Merkliche Eisengehalte treten dann auf, wenn reduzierende Verhältnisse vorliegen. Hohe Sulfatgehalte stammen zumeist aus der Oxidation der Sulfide, insbesondere von Pyrit. Der bisweilen geringe Chlorgehalt ist durch den geringen Cl-Gehalt

der entsprechenden Gesteine verursacht. Werden Cl-Wässer angetroffen, so sind sie meist allochthon, also in einer anderen geologischen Formation entstanden.

Die Wässer sind allgemein sehr weich bis weich und aufgrund eines oftmals instabilen Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts aggressiv (Säuerlinge). In Bereichen von Erzlagern bzw. Schwefel- oder Arsenkieslagern ist der „normale“ Grundwasserchemismus überprägt; die Wässer weisen dann u. a. auch erhöhte Schwermetallgehalte auf. Die Filterwirkung des Gebirges ist insgesamt gering; an Verwitterungsprodukten (Schluffe und Tone) wird jedoch bevorzugt Kalium fixiert.

2.3.3 Grundwässer in Sandsteinen

Der Lösungsinhalt von Grundwässern in Sandsteinformationen hängt in erster Linie von deren Stoffbestand, insbesondere aber auch vom vorhandenen Bindemittel ab. Die Grundwässer aus Sandsteinschichten des Oberrotliegenden und des Mesozoikum weisen beispielsweise eine sehr unterschiedliche Mineralisation auf. Sandsteine ohne leicht lösliches Bindemittel führen Grundwässer mit niedrigen Gehalten an festen Bestandteilen, wobei der CO₂-Gehalt bei Basenarmut des Gesteins die Wässer leicht sauer einstellt. Bei Grundwässern in Sandsteinen mit löslichem Bindemittel treten dagegen beträchtliche Gehalte an SO₄, Cl, Na, Mg und Ca auf.

In Randgebieten der Sandsteinverbreitung sind aktive Wasseraustausch-Verhältnisse nachgewiesen worden, in becken tieferen Teilen herrschen dagegen erschwerte bis stagnierende Verhältnisse vor /MÜL 75/. Allgemein nimmt zur Tiefe hin die Mineralisation der Wässer zu (s. u.). So weisen z. B. die Tiefengrundwässer des Rotliegenden in Norddeutschland (vom Typ Na-Ca-Mg-Cl sowie Ca-Na-Mg-Cl) eine Salzkonzentration von bis zu 360 g l⁻¹ auf.

2.3.4 Grundwässer in Karbonatgesteinen

Da Karbonate kaum eine primäre Porosität aufweisen, ist der Kontakt Wasser - Gestein im wesentlichen auf die Flächen von Trennfugen begrenzt. Der Gehalt an gelösten Bestandteilen ist daher verhältnismäßig gering. Die Wässer dichter Kalksteine sind Hydrogenkarbonatwässer mit geringen Anteilen an SO₄- und Cl-Ionen. Bei feinkörnigen Kalksteinen erhöht sich der Anteil der leichtlöslichen Ionen (SO₄ und Cl) aufgrund der größeren vorhandenen Kontaktflächen.

Die Grundwässer in Dolomitgesteinen unterliegen ähnlichen Diagenesebedingungen wie die der Kalkgesteine. Das Äquivalentverhältnis Mg/Ca ist aufgrund der geringeren Löslichkeit des Magnesiums im Grundwasser kleiner als im Gestein.

Grundwässer der z. T. oberflächennahen Karbonatgesteine des Jura und der Kreide unterscheiden sich erheblich von denen aus tieferen Formationen (Plattendolomit und Zechsteinkarbonat). Allgemein nimmt auch hier die Mineralisation zur Tiefe hin zu, die Wässer zeichnen sich dann u. a. durch einen hohen Chlorid- und Sulfatanteil aus. So werden beispielsweise im Plattendolomit Mg-reiche, sehr hoch konzentrierte Salzlösungen vom Typ Mg-Ca-Na-Cl und Mg-Na-Ca-Cl mit Konzentrationen von bis zu 600 g l^{-1} angetroffen, allerdings mit äußerst geringer Ergiebigkeit. Die Schichtwässer im Staßfurtkarbonat zeigen im Chemismus eine größere Variationsbreite bei Konzentrationen von $1 - 360 \text{ g l}^{-1}$. Es handelt sich dabei um salinare Reliktlösungen sowie infiltrativ beeinflusste Wässer.

2.3.5 Tiefengrundwässer

Für den Begriff "Tiefengrundwasser" gibt es in der Literatur keine eindeutige Definition. Einige Autoren lassen Tiefengrundwasser (in der Tiefe) dort beginnen, wo das Grundwasser chemisch einen bestimmten, weltweit anzutreffenden Habitus /SEI 83/ annimmt. Andere sehen Tiefengrundwasser dort anstehen, wo nur eine sehr eingeschränkte Grundwasserbewegung vorhanden ist. In neueren Arbeiten wird die Abgrenzung zwischen oberflächennahem Wasser bzw. Tiefengrundwasser auch anhand des Alters der Wässer vorgenommen. Die Altersbestimmung erfolgt dabei durch Messung der Konzentration bestimmter Isotope bzw. Isotopenkombinationen. (u. a. Isotope des Wasserstoffs, des Sauerstoffs und des Kohlenstoffs). Nach unterschiedlichen DVWK-Schriften (zusammengestellt in /HOF 90/) sind folgende Charakteristika bezeichnend für Tiefengrundwässer:

- aus tiefem Stockwerk stammend
- langsame Zirkulation
- hohes Alter (Tritium-frei, C14-arm oder -frei)
- meist hoher Gehalt an gelösten Mineralstoffen
- frei von anthropogenen Verunreinigungen
- frei von atomarem Sauerstoff und Nitrat (reduzierende Eigenschaften)
- erhöhte Temperaturen
- Neubildung in einem vielfach nicht näher bekannten Regenerationsgebiet

Alternativ für „Tiefengrundwasser“ werden teilweise auch die Begriffe Formationswasser, Tiefenwasser, Tiefenstandsgrundwasser, Ölfeldwasser, Randwasser, Grubenwasser, Erdölwasser, connate water, fossiles Meerwasser, juveniles Wasser verwendet /MIC 74/, wobei diese Begriffe nicht immer völlig gleichbedeutend sind und durchaus auch inhaltliche Abgrenzungen existieren (s. u.).

2.3.6 Mineralwässer

Mineral- bzw. Heilwässer sind in Deutschland flächendeckend gut untersucht und in Bohrungen erschlossen, treten frei zutage oder aus Stollen aus. Die Mineralisation (Gehalt $> 1 \text{ g kg}^{-1}$ Wasser) erfolgt durch Auflösung der löslichen Gesteinsbestandteile im Untergrund. In Deutschland treten Mineralwässer insbesondere in Gebieten des Zechstein, des Muschelkalk und des Keuper auf, ebenso im Bereich von Erzlagerstätten, Ganggesteinen oder tertiären Vulkaniten. Die Verbreitung zeigt aber auch, dass sie in allen Gesteinsarten auftreten können, sowohl in Fest- als auch in Lockergesteinen.

Die meisten in Deutschland vorkommenden und genutzten Mineralwassertypen gehören zur Gruppe der salinaren Wässer. Hierzu zählen die echt- oder vollsalinaren Wässer (Na-Cl-Wässer), sowie die minder salinaren Sulfat-Wässer (Ca-SO₄-Wässer).

Ebenfalls zu dieser Gruppe werden Calcium-Chlorid-, Natrium-Sulfat- und Magnesium-Sulfat-Wässer gerechnet.

Der Untergrund der weit ausgedehnten Norddeutschen Senke ist von stark- bis hochkonzentrierten Salzwässern erfüllt. Die Genese der Wässer wird vorwiegend im Zusammenhang mit den Ablagerungen des Perm (Rotliegendes und Zechstein) gesehen. In Mittel- und Süddeutschland enthalten insbesondere die Gebiete des Buntsandsteins sowie des Keuper-Sandsteins Natrium-Sulfat- aber auch Natrium-Chlorid-Mineralwässer. In tieferen Bohrungen im Oberrheintalgraben werden stets Salzwässer angetroffen, auch in der alpinen Vortiefe sind Salzwässer nicht selten.

Die aus der Tiefe stammenden salzigen Wässer werden genetisch in zwei Gruppen eingeteilt: a) durch Subrosion von Salzstöcken, Salzmergeln und Gipskörpern entstandene sowie b) aus fossilen Lösungen oder Porensalzen stammende, meist streng formationsgebundene Wässer (Formationswässer). In Abhängigkeit von der geologischen Gesamtsituation können die Wässer diagenetisch verändert oder auch aus ihren Bildungsräumen ausgewandert sein (allochthone Wässer).

Mineralwässer unterscheiden sich von den in Bergwerken (Grubenwässern) oder Bohrungen zulaufenden Wässern oftmals nicht im Gesamtchemismus, sondern ausschließlich in der Art der nachfolgenden Nutzung. Viele Mineralwässer stellen Mischwässer mit Einflüssen aus mehreren Formationen dar. Ihre Herkunft kann, wenn auch ein grundsätzlicher Zusammenhang mit den Gesteinen im Untergrund meist herzustellen ist, nicht in jedem Fall eindeutig geklärt werden.

2.3.7 Formationswässer

Als Formationswässer werden Wässer bezeichnet, die - an eine bestimmte geologische Formation gebunden - weitgehend stagnierend sind und in einem nur sehr geringen Austausch mit Wässern anderer Formationen stehen. Derartige Wässer befinden sich weitgehend im chemischen Gleichgewicht mit dem umgebenden Gestein. Die z. T. sehr hohe Salinität der Formationswässer hat ihre Ursache in der Auflösung von Porensalzen bzw. dem Vorhandensein salzhaltiger fossiler Lösungen. Verallgemeinerte Angaben zum Chemismus von Formationswässern einzelner Formationen, wie z. B. Rotliegendes, Staßfurtkarbonat, Buntsandstein, Plattendolomit oder Keuper sind im direkten Datenvergleich schwierig zu bewerten. Ein deutlich abweichender Wasserchemismus, insbesondere das Vorkommen von sehr gering mineralisierten Wässern in

größeren Tiefenlagen, weist auf stärkeren Wasseraustausch und somit den nicht-formationsspezifischen Charakter dieser Wässer hin.

2.3.8 Grubenwässer

Grubenwässer sind Grundwässer, die einem Grubengebäude aus dem Nebengestein zufließen. Wässer mit geringer Mineralisation sind dabei i. d. R. vom Niederschlagswasser bestimmte Wässer. Sie erreichen, von der Erdoberfläche kommend, mit unterschiedlicher Verweil- bzw. Transportzeit über Porenräume, Fugen, Klüfte oder Störungen bzw. über bergbaubedingte Wegsamkeiten im Gebirge das Grubengebäude. Hoch bis sehr hoch mineralisierte Wässer treten meist aufgrund eines vorhandenen hydraulischen Potentials aus benachbarten Horizonten in das Grubengebäude. Die Herkunft dieser Wässer kann nicht in jedem Fall zweifelsfrei geklärt werden.

Grubenwässer weisen an verschiedenen Standorten entsprechend der Geologie des umliegenden Gebirges einen standortspezifischen Charakter auf. Die Grubenwässer in der Ruhrkohle, im Uran-, Erz- oder Granitbergbau sind aufgrund der erdgeschichtlich unterschiedlichen Entstehungsgeschichte des gesamten geologischen Umfeldes auch in ihrer Mineralisation qualitativ und quantitativ unterschiedlich. Die Deutung der Genese der Wässer erfolgt weniger anhand der jeweiligen Hauptbestandteile, sondern vielmehr anhand der Konzentration (bzw. von Konzentrationsverhältnissen) bestimmter Elemente, wie z. B. Lithium, Brom, Strontium, Barium, Bor und Jod.

2.4 Grundwässer an ausgewählten Standorten

Im Zusammenhang mit der Erkundung von Grundwässern für die Trink- und Brauchwasserversorgung ist eine Vielzahl von Grundwasserdaten ermittelt worden, die nur z. T. veröffentlicht, in der Mehrzahl ausschließlich beispielsweise bei Wasserwirtschaftsämtern einzusehen sind. Die Untersuchungen beziehen sich in diesem Zusammenhang bevorzugt auf den Wasserbedarf sowie die erforderliche Wasserqualität. Es handelt sich dabei zumeist um oberflächennahe, schwachmineralisierte Grundwässer vom Hydrogenkarbonat-Typ, wobei die Nutzung der Wässer unmittelbar im Vordergrund steht. Informationen über Tiefengrundwässer stammen überwiegend aus Bergbau- und Explorationsbereichen, insb. Thermal- und Mineralwässer für balneologische Zwecke. Eine Sonderstellung nehmen hydrogeologische Standortuntersuchungen im Zusammenhang mit der Planung von Endlagern in tiefen geologischen Formationen

ein, deren Zielsetzung und Analysenumfang bzw. Analysenqualität den Belangen des vorliegenden Arbeitspaketes wesentlich besser gerecht wird. Von den nachfolgend ebenfalls aufgeführten Standorten Ruhrgebiet und Erzgebirge liegt z. T. aus größerer Tiefe eine Vielzahl hydrogeologischer Daten im Zusammenhang mit der Erkundung und dem Abbau der dort vorhandenen Kohle- bzw. Erzlagerstätten vor. Daneben werden nachfolgend auch Tiefengrundwässer der Norddeutschen Senke und des Thüringer Beckens kurz dargestellt.

2.4.1 Grundwässer am Standort Gorleben

Der Gorlebener Salzstock ist eine von zahlreichen Salzstrukturen des norddeutschen Flachlandes. Er besteht aus mächtigen Salzfolgen des Zechsteins, die im Verlauf der Halokinese gehoben und intensiv verfaltet wurden, mit Randsenken im Nordosten und Südwesten. Die Abdeckung des Salzstockes besteht aus Sedimenten des Tertiär und Quartär.

Die Grundwässer über dem Salzstock von Gorleben und dessen Umgebung sind im Zusammenhang mit der Erkundung des Standortes im Hinblick auf dessen Eignung als Endlager für radioaktive Abfälle intensiv untersucht worden. Die Schichtenfolgen über dem Salzstock und dessen Umgebung bestehen aus bis zu 280 m mächtigen sedimentären Grundwasserleitern mit unregelmäßig vertikal und horizontal nicht überall zusammenhängend eingeschalteten Grundwassernichtleitern bzw. Grundwasserhemmern des Quartär und Tertiär. Die Grundwässer lassen sich folgenden Wassertypen zuordnen /BGR 94/:

- Ca-SO₄-Wasser
- Ca-HCO₃-Wasser
- Na-HCO₃-Wasser
- Na-Cl-Wasser

Sowohl die Gesamtversalzung als auch die räumliche Verteilung der Grundwassertypen zeigen generell eine deutliche Tiefenabhängigkeit. Im Bereich bis 50 m werden fast ausschließlich Süßwässer (Mineralisation < 1 g l⁻¹) angetroffen, vorherrschend als Ca-SO₄-Wässer. Diese werden mit zunehmender Tiefe von Ca-HCO₃-Wasser (bis

160 m) abgelöst. Grundwässer vom Typ Na-HCO₃ haben ihre größte Verbreitung in Tiefen von 80 bis 140 m. In Tiefen von > 120 m dominieren Salzwässer (> 10 g l⁻¹) vom Typ Na-Cl.

Die Ca-SO₄- und Ca-HCO₃-Wässer werden vorwiegend in quartären Aquiferen angetroffen und zeigen einen deutlichen Einfluss der Wechselwirkungen mit entkalktem, aber auch karbonathaltigem Aquifermaterial. Die Genese der sowohl in den tertiären wie quartären Aquiferen auftretenden Na-HCO₃-Wässer ist vor allem auf Ionenaustauschprozesse zurückzuführen. Der Chemismus der Na-Cl-Wässer wird als Mischwasser aus hochkonzentrierter Na-Cl-Lauge und schwach mineralisiertem Ca-HCO₃-Wasser gedeutet.

Die Mischwässer mit relativ niedrigen Cl-Gehalten sind aufgrund der Zunahme der Natrium- und der Abnahme der Erdalkalikonzentrationen durch Ionenaustausch-Reaktionen deutlich alkalisiert (Na-HCO₃-Wasser) und infolge intensiver Sulfatreduktion stark an Sulfat abgereichert. Bei höheren Cl-Gehalten sind die Wässer vor allem durch Calcium und Strontium erdalkalisiert. Beim Überschreiten der Sättigung für die Minerale Gips, Calcit und Cölestin ist mit einer Ausfällung sekundärer Sulfate bzw. Karbonate zu rechnen.

2.4.2 Grubenwässer der Schachtanlage Konrad

In der Schachtanlage Konrad sind bis 1976 marin-sedimentäre Eisenerze des Oberjura (Malm) abgebaut worden. Über dem Grubengebäude stehen Ton-, Mergeltonsteine sowie Sand- und Kalksteine der Kreide an. Abgedeckt werden die Gesteinsformationen durch Sedimente des Quartär und Tertiär.

Die Schachtanlage Konrad ist insgesamt eine relativ trockene Grube, wobei sich die Wasserzuläufe in allen Pumpensümpfen an unterschiedlichen Stellen der Grube auf insgesamt ca. 5 l min⁻¹ belaufen /BRE 82/. Der Chemismus der Wässer ist relativ einheitlich vom Typ Na-Ca-Mg-Cl und in den Ionenkonzentrationsbeziehungen vergleichbar mit einem Großteil der Tiefenwässer in Norddeutschland (Tabelle 3).

Tabelle 3: Durchschnittsgehalte der im Jahre 1981 durchgeführten Analysenserie für das in den Pumpensümpfen der Schachtanlage Konrad gesammelte Wasser /BRE 82/

| Element | Gehalt [mg l ⁻¹] | Element | Gehalt [mg l ⁻¹] |
|-----------|---------------------------------|---------|---------------------------------|
| Natrium | 77.722 | Chlorid | 135.556 |
| Kalium | 212 | Sulfat | 832 |
| Lithium | 1 | Bromid | 822 |
| Calcium | 8.939 | Jodid | 28 |
| Magnesium | 2.761 | Borat | 84 |
| Strontium | 376 | | |

Die Gehalte an Brom, Jod und Bor sind im Vergleich zu benachbarten Formationswässern leicht erhöht. Ein Einfluss durch oberflächennahe Wässer ist nicht zu erkennen, in der Literatur werden die Wässer als diagenetisch verändertes Meerwasser gedeutet.

2.4.3 Grubenwässer im Ruhrgebiet

Die Steinkohlenformationen des Ruhrkarbon sind im wesentlichen im Oberkarbon abgelagert worden. Die teils mit taubem Gestein durchsetzten Flöze sind konkordant in das Nebengestein, bestehend aus Sandstein, Sandschiefer, Schiefer, Tonschiefer oder Konglomerat eingelagert und werden von mächtigen Deckschichten der Oberkreide (Tonmergel- und Kalksteine) diskordant überlagert.

Die in den Kohlegruben des Ruhrgebietes anfallenden Grubenwässer sind überwiegend hoch mineralisierte Wässer. Grubenwässer mit geringem Salzgehalt treten im Bereich des ausstreichenden Karbon im Süden auf /PUC 64/. Der in Wässern mit hoher Salinität häufigste Bestandteil ist Natriumchlorid. Chlorid ist stets mit mehr als 90 % der Anionenäquivalente bei Konzentrationen von z. T. mehr als 100 g l⁻¹, Natrium mit Gehalten von 50 g l⁻¹ vertreten. Die Wässer mit geringerem Salzgehalt enthalten als Anionen vornehmlich Sulfat und Hydrogenkarbonat, Chlorid tritt dann prozentual stark zurück. Bei den Kationen überwiegen hier deutlich Calcium und Magnesium. Lithium kommt in den Wässern des Ruhrgebietes in deutlichen Mengen vor, sein Gehalt wächst proportional mit dem Gesamtsalzgehalt. Die Strontiumgehalte steigen bei sulfatfreien Proben z. T. deutlich an.

Der einheitliche Chemismus der tieferen Grundwässer, also der Wässer mit keinem bzw. sehr geringem Einfluss durch oberflächennahe Wässer, legt den Schluss einer gemeinsamen geochemischen Entwicklung dieser Wässer nahe.

2.4.4 Tiefenwässer der Norddeutschen Senke und des Thüringer Beckens

Die Konzentration der Tiefenwässer sedimentärer Ablagerungen der Norddeutschen Senke und des Thüringer Beckens umfasst ein breites Spektrum. Die Wässer sind mehr oder weniger hoch mineralisiert, mit Konzentrationen von 5 g l^{-1} bis 600 g l^{-1} . Chlorid tritt als vorherrschendes Anion mit einer Konzentration von 10 bis 350 g l^{-1} auf. Die übrigen Anionen sind untergeordnet in folgenden Konzentrationsintervallen vorhanden (Tabelle 4):

Tabelle 4: Konzentrationsbereiche von Anionen in Tiefenwässern der Norddeutschen Senke und des Thüringer Beckens /MÜL 75/

| Anion | Konzentrationsintervall [mg l^{-1}] |
|---------------------|--|
| Br^- | 10 - 5.000 |
| J^- | 1 - 100 |
| SO_4^{--} | 100 - 7.000 |
| HCO_3^{--} | 10 - 5.000 |

Aufgrund der vorherrschenden Kationenverhältnisse können die Wässer generell in sechs Grundwassertypen unterteilt werden:

- Na-Ca-Mg-Cl-Typ
- Ca-Na-Mg-Cl-Typ
- Mg-Ca-Na-Cl-Typ
- Mg-Na-Ca-Cl-Typ
- Na-Mg-Ca-Cl-Typ
- Ca-Mg-Na-Cl-Typ

Die Tiefenwässer der oberen Trias (Rät) und der Unterkreide gehören dem Na-Ca-Mg-Cl-Typ an, die Konzentrationen schwanken zwischen 30 und 250 g l^{-1} . Zwischen der Konzentration und der Tiefenlage besteht eine direkte Abhängigkeit. Die Schichten

dieses Komplexes bilden ein einheitliches hydrodynamisches Stockwerk, wobei die wasserführenden Horizonte hydraulisch miteinander verbunden sind.

Die Buntsandsteinwässer in diesem Raum weisen Konzentrationen von 1 bis 360 g l⁻¹ auf und gehören zum Wassertyp Na-Ca-Mg-Cl. Zu beobachten ist eine Veränderung der Wässer zum Beckenrand, was mit einem aktiven Wasseraustausch im Randbereich zu erklären ist. Die im Zechstein (Plattendolomit, Staßfurtkarbonat) angetroffenen Tiefenwässer sind Wässer vom Typ Mg-Ca-Na-Cl und Mg-Na-Ca-Cl. Daneben werden weitere Wassertypen angetroffen, deren Chemismus eine große Variationsbreite mit Konzentrationen von 1 bis 360 g l⁻¹ aufweist. Die Wässer sind infiltrativ beeinflusst bis stagnierend. Die Rotliegendeschichtwässer sind hochkonzentrierte Salzlösungen mit Konzentrationen von 40 bis 360 g l⁻¹. Geringere Konzentrationen treten nur im Randbereich auf. Die Wassertypen im Rotliegenden stellen Na-Ca-Mg-Cl- und Ca-Na-Mg-Cl-Wässer dar. Stellenweise konnte eine Schichtung der Wässer im Rotliegenden nachgewiesen werden.

Die Entstehung hochmineralisierter Tiefenwässer in evaporitführenden Sedimentbecken kann unterschiedlich gedeutet werden. Die Wässer setzen sich im wesentlichen aus Ablaugungslösungen, salinaren Reliktlösungen, Infiltrationslösungen und/oder diagenetisch veränderten Wässern zusammen. Die diagenetisch veränderten Wässer werden dabei aus in den Sedimenten eingeschlossenem Meerwasser abgeleitet. Ablaugungslösungen von Evaporiten sind in sämtlichen Stufen vom Prä-Perm bis zum Tertiär anzutreffen. Sie können den Chemismus der diagenetisch veränderten Schichtwässer überprägen, so dass eine geochemische Unterscheidung zwischen beiden Prozessen außerordentlich schwierig ist. Infiltrationswässer mit oberflächennahem Charakter weisen eine geringere Konzentration auf. Sie treten in Gebieten mit oberflächennahem Schichtausstreichen bei aktiv-erschwerten Wasseraustauschverhältnissen auf.

Bei den Anionen dominiert eindeutig das Chlorid. Die Tiefenwässer sind hier ausschließlich als Chlorid-Typ anzusprechen.

2.4.5 Gruben- und Grundwässer des Erzgebirges

Das Erzgebirge stellt eine von ca. 200 bis 800 m ü. N.N. nach Süden aufsteigende, schwach wellige Hochebene kristalliner Gesteine (u. a. Gneise, Granite, Glimmerschiefer und Phyllite) dar. Am Nordrand treten eine Vielzahl von Erzlagerstätten auf, die z. T.

durch Jahrhunderte alten Bergbau bis in größere Tiefen erschlossen sind. Abgebaut wurden u. a. Kobalt-Nickel-Arsenide, Silbererze, Bleiglanz, Zinkblende, Schwerspat, Flußspat, Zinnkies und Uranerze.

Die Altbergbaue sind ohne Ausnahme wasserführend, mit Zuflüssen von bis zu mehreren 1000 m³ pro Tag. Die zufließenden Grubenwässer stellen zumeist von Niederschlägen gespeiste Grundwässer mit relativ geringen Verweilzeiten im Deckgebirge dar. Die vorwiegend auf Fugen und Klüften transportierten Wässer sind entsprechend dem geringen Lösungsangebot kristalliner Gesteine zumeist gering mineralisiert, aber z. T. deutlich lagerstättenüberprägt. So weisen einige Wässer u. a. sehr hohe Gehalte an Eisen, Mangan, Zink, Cadmium, Kupfer, Nickel, Kobalt und / oder Arsen auf. Ange troffen werden i. w. Sulfat- sowie Hydrogenkarbonatwässer, wobei in der Mehrzahl der Sulfatanteil der Wässer als Folge der Sulfatation (Oxidation der Sulfide, insbesondere von Pyrit) überwiegt.

Die Mehrzahl der Grubenwässer im Erzgebirge lässt sich folgenden Wassertypen zuordnen:

- Ca - SO₄ - Typ
- Ca - HCO₃ - Typ
- Ca - Mg SO₄ - Typ
- Ca - Mg - HCO₃ SO₄ - Typ
- Na - Ca - HCO₃ - Typ

2.4.6 Zusammenfassung

Oberflächennahe Wässer mit geringerem Salzgehalt enthalten als Anion vornehmlich Sulfat (SO₄) und Hydrogenkarbonat (HCO₃), Chlorid tritt prozentual stark zurück. Bei den Kationen überwiegen meist die Anteile des Calcium. Wässer aus tieferen Formationen weisen eine z. T. hohe bis sehr hohe Salzkonzentration auf, wobei eindeutig Chlorid dominiert. Bei den Kationen können neben Natrium auch Calcium und Magnesium mit hohen bis sehr hohen Konzentrationen vertreten sein. Austauschwässer vom Typ Na-HCO₃ können bevorzugt in Tiefen von 10 bis 200 m auftreten, diese Wässer entstehen u. a. im Kontakt mit den Aquifergesteinen infolge eines Austausches von Calcium durch Natrium.

Zur Tiefe hin nimmt allgemein die Mineralisation der Wässer zu, die Verweilzeit ist länger und die Beweglichkeit nimmt, auch aufgrund der zumeist geringeren Durchlässigkeit und des geringeren Porenvolumens, generell ab. Oberflächennahe Wässer sind zumeist junge, von Niederschlägen gespeiste Wässer. Mit zunehmender Tiefe gewinnen die Vorgänge der Diagenese und der Metamorphose an Einfluss. Die Wässer in größerer Tiefe werden als Relikt-, Infiltrations- und Ablaugungslösung sowie überprägtes, in früher Erdgeschichte entstandenes Wasser gedeutet.

3 Teufenabhängige Mineralisation

3.1 Einführung

Eine Zunahme der Mineralisation mit der Tiefe ist ein bekanntes Phänomen, auf das schon seit längerem immer wieder hingewiesen wird (z. B. /BRE 82/, /KLI 90/, s. u.). Eine umfassende Studie zu dieser Thematik stammt aus dem Jahre 1969 /DIC 69/. Nach Untersuchungen in verschiedenen Sedimentbecken im Süden der U.S.A. stellt der Autor fest, dass - entgegen dem oft als abrupt beschriebenen Übergang Süß - Salzwasser - die Konzentration tiefer Laugen normalerweise mit der Tiefe zunimmt (Abweichungen nur in Beckenrandlagen). Dabei werden Raten bzgl. Konzentrationszunahme von

$$50 - 300 \text{ mg l}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

bei einer Linearität über mehrere tausend Fuß ausgewiesen und zwar unabhängig von Lithologie und fazieller Ausbildung der Wasserleiter (Abbildung 7). Als Ursachen werden in der Arbeit verschiedene Mechanismen diskutiert; am meisten akzeptiert sind nach /DIC 69/ "salt sieving" oder "reverse osmosis" (die er allerdings beide für geologisch nicht plausibel erachtet, ohne einen Lösungsvorschlag zu unterbreiten). Weitere mögliche Mechanismen sind "molecular diffusion", "gravitational segregation of ions" und "thermal diffusion". Die Linearität der Konzentrationszunahme sowie der Zunahmerate scheinen für Laugen prä-tertiärer Sedimente in ungestörten Bereichen auf der ganzen Welt charakteristisch zu sein (z. B. auch Wolga-Ural-Region). /DIC 69/ weist aber auch bereits darauf hin, dass

- Diffusion Übergangszonen in tiefenabhängigen Konzentrationsprofilen schaffen kann
- Wasseranalysen aus Erdöl-Bohrungen (der bedeutendsten Quelle für Analysen tiefer Grundwässer) oft verfälscht sind, ein Sachverhalt, der auch bei Analysen aus Deutschland /KLI 91/ die Verwertbarkeit der Ergebnisse stark einschränkt (s. u.)
- In Abhängigkeit von der regionalen Geologie durchaus auch umgekehrte Verhältnisse auftreten können.

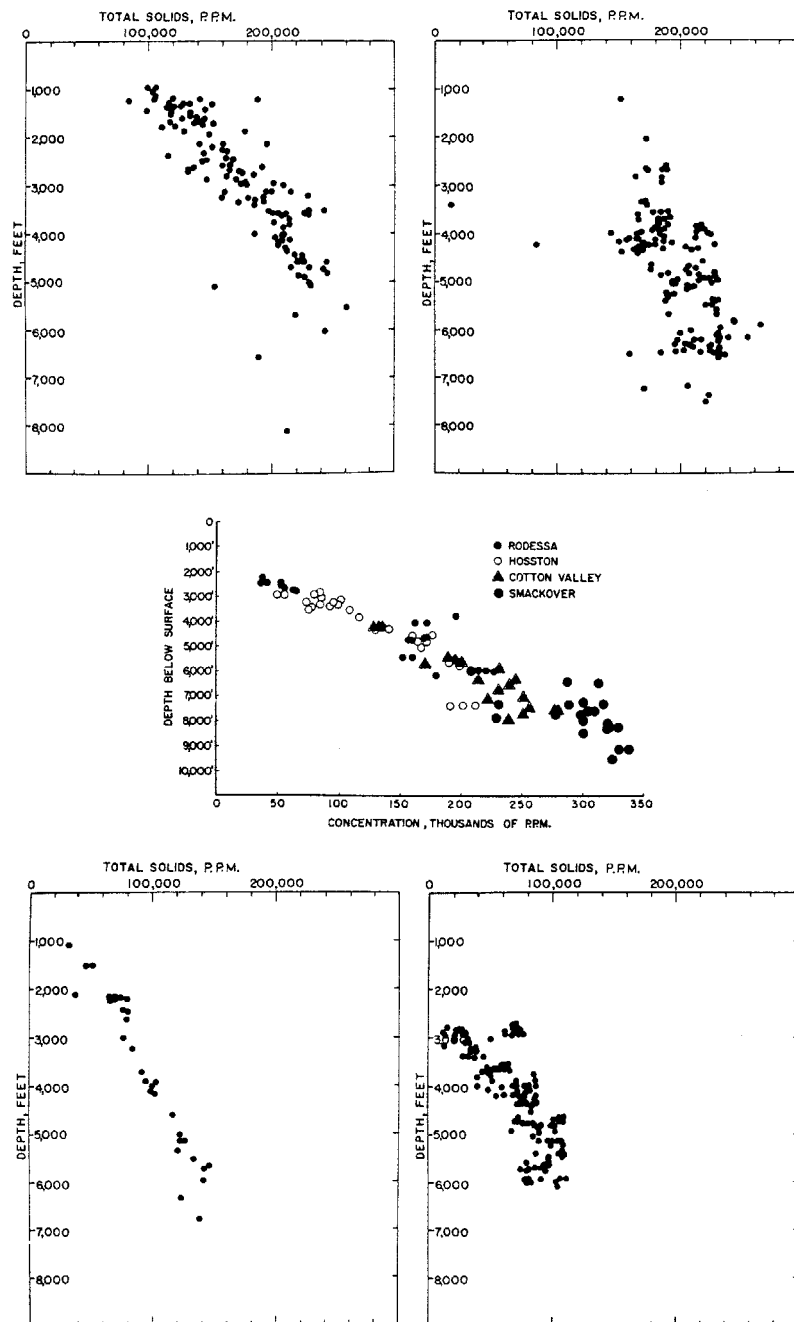


Abbildung 7: Gesamtkonzentration unterschiedlicher Grundwässer im Verhältnis zur Tiefe in verschiedenen Regionen der U.S.A; o. l.: ölführende Sande der „Pennsylvanian Cherokee Group“, Oklahoma; o. r.: ordovizische „Wilcox“- und „Simpson“-Sande, Oklahoma; Mitte.: Zufallsproben unterschiedlicher Horizonte (Jura-Kreide), Süd-Arkansas und Nord-Louisiana; u. l.: eozäne „Wilcox“-Sande, Zentral-Louisiana; u. r.: kretazische „Woodbine“- und „Eagle Ford“-Formationen, Ost-Texas /DIC 68/

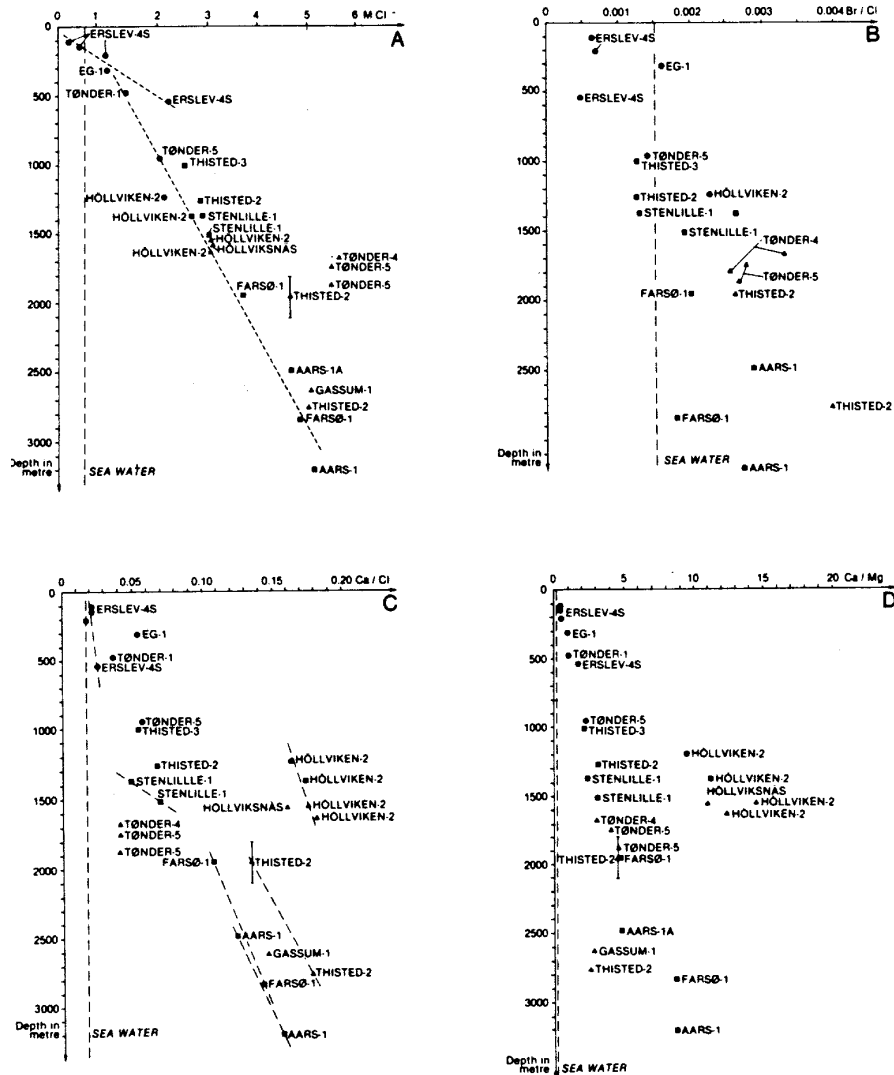


Abbildung 8: Beziehung zwischen Salinität, chemischer Zusammensetzung und Tiefe in mesozoischen Formationswässern Dänemarks /LAI 89/

Aus einer Veröffentlichung von /LAI 89/ (zitiert in /KLI 91/) ergeben sich ebenfalls Hinweise auf einen vertikalen Anstieg von Salzgehalten im Grundwasser (Abbildung 8).

In Ergänzung dieser Resultate ist aber festzuhalten, dass in Deutschland beispielsweise auch noch in 4.800 m Tiefe gering mineralisierte Tiefengrundwässer bekannt sind /UDL 77/.

3.2 Schachtanlage Konrad

Einen guten Ausgangspunkt für die vertiefende Diskussion einer teufenabhängigen Mineralisation im Sinne der in diesem Bericht zu bearbeitenden Fragestellungen bilden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Umfeld der Schachtanlage Konrad. Bereits in der 1982 abgeschlossenen Eignungsprüfung /BRE 82/ wird festgestellt, dass sich anhand einer Sortierung der aus Bohrungen analysierten Wasserproben - von Ausnahmen abgesehen - ein teufenabhängiger Anstieg der Hauptionen Na^+ und Cl^- ergibt und zwar scheinbar unabhängig von der geologischen Formation, mit der das Wasser Kontakt hat. Dabei vollzieht sich, von regionalen Sonderfällen abgesehen, ab Teufen von 250 m eine stetige und rasche Zunahme des NaCl-Gehaltes, wie es für den Bereich der norddeutschen Tiefenwässer allgemein bekannt ist (Tabelle 5). Die Gesamtlösungsinhalte beziehen sich i. w. auf Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} und SO_4^{2-} . Generell nehmen sie mit den NaCl-Gehalten in der Tiefe zu, zeigen im Gegensatz zu diesen allerdings eine größere Schwankungsbreite (formationsspezifische Faktoren).

Tabelle 5: Salzgehalte in Grundwässern am Standort Konrad /BRE 82/

| Formation | Teufe [m] | Na^+ [g l ⁻¹] | Cl^- [g l ⁻¹] | Ges. Lösungs- Inhalt [g l ⁻¹] |
|-----------------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Wealden | 165 | 18 | 31 | 53 |
| Lias-Rhät | 250 | 30 | 57 | 92 |
| Wealden | 350 | 41 | 86 | 140 |
| Wealden | 530 | 62 | 104 | 171 |
| Korallenoolith | 600 | 49 | 98 | 160 |
| Dogger beta | 600 | 56 | 95 | 160 |
| Serpulit | 600 | 65 | 122 | 200 |
| Dogger beta | 700 | 47 | 87 | 135 |
| Valendis | 750 | 76 | 144 | 288 |
| Konrad Korallenoolith | 1.000 | 66 | 129 | 210 |
| Oberkeuper | 1.050 | 90 | 195 | 318 |
| Dogger beta | 1.500 | 70 | 115 | 195 |
| Dogger beta | 1.700 | 65 | 125 | 190 |
| Oberkeuper | 1.850 | 88 | 152 | 250 |

Ein direkter Vergleich von Korallenoolith- und Hilswasser aus Schacht 2 hat darüber hinaus einen ähnlichen Charakter beider Wässer gezeigt, wobei das Korallenoolithwasser aufgrund seiner größeren Tiefenlage höher salinar ist als das Wasser aus

dem Hilsbereich. Sollten Teufe und Chemismus in einer direkten Beziehung zur Verweilzeit der Tiefenwässer in ihrer geologischen Umgebung stehen, dann kann auf einen längeren Abschluss der Korallenoolithwässer geschlossen werden /BRE 82/.

Einschränkend stellt aber auch bereits die Eignungsprüfung beispielsweise fest, dass der o. g. Hils sandstein in der (nicht weit entfernten) Ringelheimer Mulde noch in Teufen bis 1.100 m ein Süßwasserträger ist; hochmineralisiertes Hilswasser im unmittelbaren Standortbereich kann dagegen als fossiles Tiefenstandswasser ohne Grundwassereinfluss gedeutet werden.

Den in Tabelle 5 exemplarisch dargestellten Tatbestand haben rund 10 Jahre später Klinge et al. /KLI 90/, /KLI 92/ aufgegriffen und vertiefend untersucht. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Grundwässer aus den sog. Plänerkalken (< 150 m Tiefe) weisen durchgängig geringe Salzgehalte auf (< 1 g l⁻¹); unterhalb 150 m erfolgt ein rascher Anstieg der Salzgehalte auf bis zu 30 g l⁻¹.
- Im Grubengebäude selbst werden wesentlich höhere Salzgehalte beobachtet und ein **kontinuierlicher** Anstieg der Salzgehalte von 180 g l⁻¹ (1. Sohle, 800 m Tiefe) bis auf 220 g l⁻¹ (6. Sohle, 1300 m) festgestellt.
- An diese Tendenz passt sich auch Hils sandsteinwasser an, obwohl Hils sandstein und Korallenoolith durch mehr als 200 m gering durchlässige Unterkreidetone getrennt werden (ebenso Cornbrash-Wasser aus dem Liegenden - Der Salzgehalt einer Wasserprobe aus 1000 m tiefem Cornbrash entspricht nahezu dem Salzgehalt der Korallenoolith-Wässer in 1000 m).
- Im Bereich der Schachtanlage Konrad besteht näherungsweise eine horizontale, formationsübergreifende Salinitätsschichtung; der Salzgehalt der Wässer wird - unabhängig von lithologischer Ausbildung und stratigraphischer Position des Wasserleiters - allein von der Tiefenlage des Entnahmeortes bestimmt.
- Ein derartiges lineares, formationsübergreifendes Salinitätsprofil (Abbildung 9) wird als Indiz dafür gewertet, dass im Nahbereich des geplanten Endlagers die Diffusion (Transportmechanismus mit sehr kleinen Transportraten) gelöster Salze den dominierenden Transportmechanismus darstellt; Konvektion kann dementsprechend -

entgegen der Konzeption und den Ergebnissen bisheriger Süßwasser-Modellrechnungen - nur untergeordnet wirksam sein. Diese Aussage weist nach Meinung der Autoren eine hohe Sicherheit auf, weil die lineare Verteilung sowohl in den Geringleitern Korallenoolith und Cornbrash als auch im Hilssandstein, einem hoch durchlässigen Porenleiter, ausgebildet ist. Die flächenhafte, vertikal gerichtete Diffusion gelöster Salze ist - im Gegenzug - schlüssige Erklärung dafür, dass Korallenoolith- und Cornbrash-Wässer im Bereich der 3. Sohle identische Zusammensetzung aufweisen.

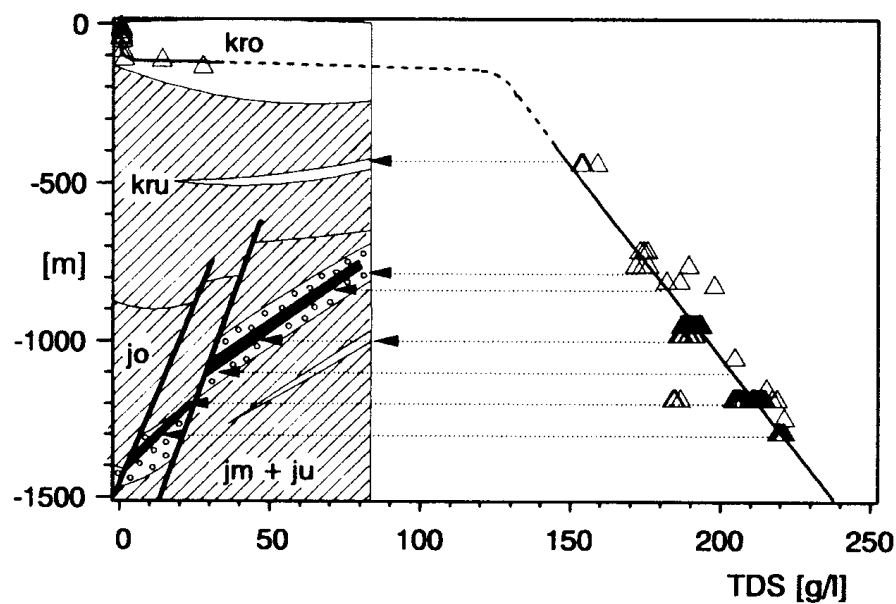


Abbildung 9: Salzkonzentrationen in Wasserproben als Funktion der Tiefe (Schachtanlage Konrad) /KLI 92/

- Ein linearer Anstieg der Salzgehalte von Porenwässern zur Tiefe hin ist in tiefen Sedimentbecken weltweit anzutreffen /DIC 68/ (s. o.).
- Bei Salzablagerungen im Untergrund eines Sedimentbeckens erreichen die Porenwasserkonzentrationen in auflagernden Sedimenten in den überaus meisten Fällen die Sättigungskonzentration für NaCl.
- Auch im Gebiet der Schachtanlage Konrad ist es nahe liegend, dass sich der im Tiefenbereich 470 bis 1.300 m erkennbare lineare Trend der Salinitäten zur Tiefe hin fortsetzt und die Salzkonzentrationen unterhalb 2.000 m im Bereich der NaCl-Sättigung liegen.

- Die Chlorid-Sättigung der Wässer aus der Schachtanlage Konrad in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe ist in Abbildung 10 dargestellt. Eine Verlängerung der Regressionsgeraden erreicht in ca. 2.100 m Tiefe die Sättigungskonzentration für Cl, was näherungsweise der Tiefenlage des Muschelkalksalzes entspricht.

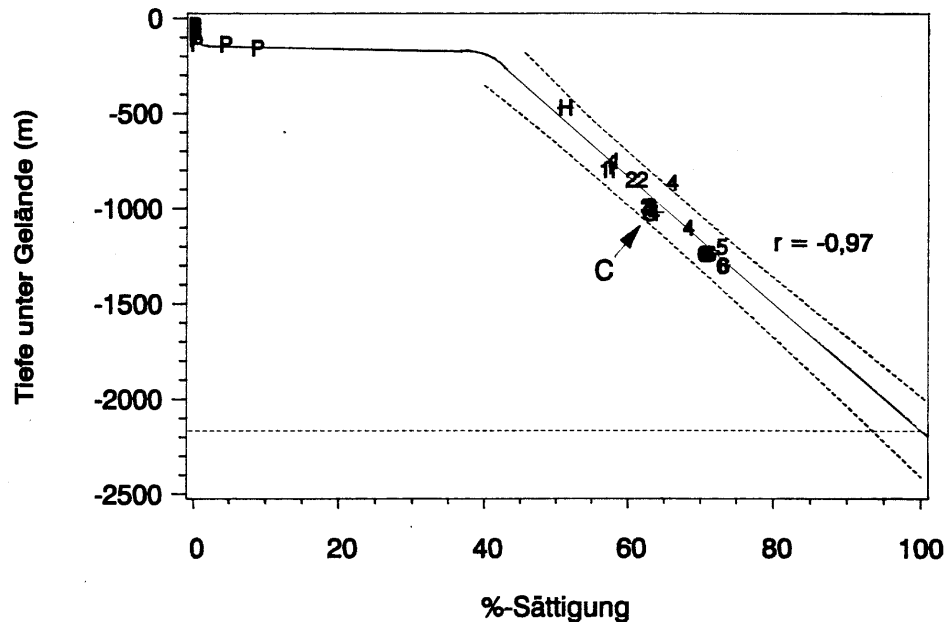


Abbildung 10: Chlorid-Sättigung der Wässer aus der Grube Konrad in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe /KLI 90/

- Die wahrscheinlichste Hypothese zur Genese der Wässer aus der Grube Konrad ist - unter Berücksichtigung eines linearen Anstiegs der TDS-Werte sowie des Ca/Cl- und Br/Cl-Verhältnisses (Abbildung 11) eine Mischung von marinen Porenwässern mit konzentrierten Ablaugungswässern plus einer zusätzlichen Diffusion gelöster Salze (konzentrierter evaporitischer Restlösungen aus tiefliegenden Sedimenten), was zu einer Überprägung der chemischen Zusammensetzung der Wässer geführt hat.

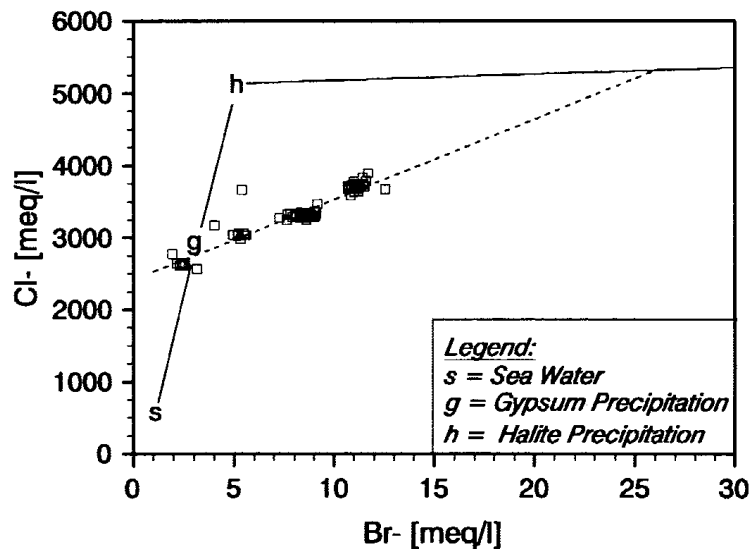


Abbildung 11: Bromid- und Chlorid-Konzentrationen im Grubenwasser der Schachtanlage Konrad im Vergleich zur Meerwasser-Evaporationslinie /KLI 92/

- Zur Unterstützung der Richtigkeit o. g. Annahmen ziehen die Autoren die Ergebnisse mathematischer Salz- / Süßwassermodele heran, nach denen sich unter den standortspezifischen Gegebenheiten ebenfalls eine nahezu lineare vertikale Dichteverteilung einstellt /KLI 92/.
- In der Anwendung auf standortspezifische Langzeitsicherheitsbetrachtungen führt die Nichtberücksichtigung der Salzgehalte in Tiefenwässern zu einer starken Überschätzung eines möglichen Schadstoffaustrages aus dem Endlager.
- Insgesamt herrscht am Standort der Schachtanlage Konrad eine weitgehend fehlende Grundwasserbewegung vor; die erhöhte Dichte der tiefen Grundwässer ist Ursache dafür, dass das auf Höhenunterschieden im Salzgitter-Höhenzug basierende Süßwasserpotential (standortspezifisch) nicht als Antriebsmotor für tief reichende GW-Bewegungen wirksam werden kann.

Eine lineare Zunahme der Salinität ist im Bereich der Schachtanlage Konrad allerdings nur für den näheren Schachtbereich nachgewiesen. Das von /KLI 90/ bzw. /KLI 92/ aufgestellte "Diffusionsmodell", das einen äußerst geringen Grundwassertransport in der Endlagerteufe umfasst, besitzt deshalb ausschließlich Standort-Gültigkeit. Für den Effekt einer linearen Zunahme der Mineralisation mit der Teufe existieren grundsätzlich auch andere Erklärungsmodelle (s. Kap. 3.3).

Das von der BGR zusätzlich analysierte Datenmaterial aus norddeutschen Bohrungen (s. Kapitel 3.4) ist mit hoher Wahrscheinlichkeit **nicht geeignet**, Aussagen über die Existenz eines linearen Dichte- und Salinitätsprofils im Modellgebiet außerhalb des aufgeschlossenen Bereiches abzuleiten. Bereits eine Zusammenstellung entsprechender Analysen aus dem Gifhorner Trog (Abbildung 12) vermag den am Standort Konrad ermittelten und rechnerisch belegten Befund nicht zu unterstützen.

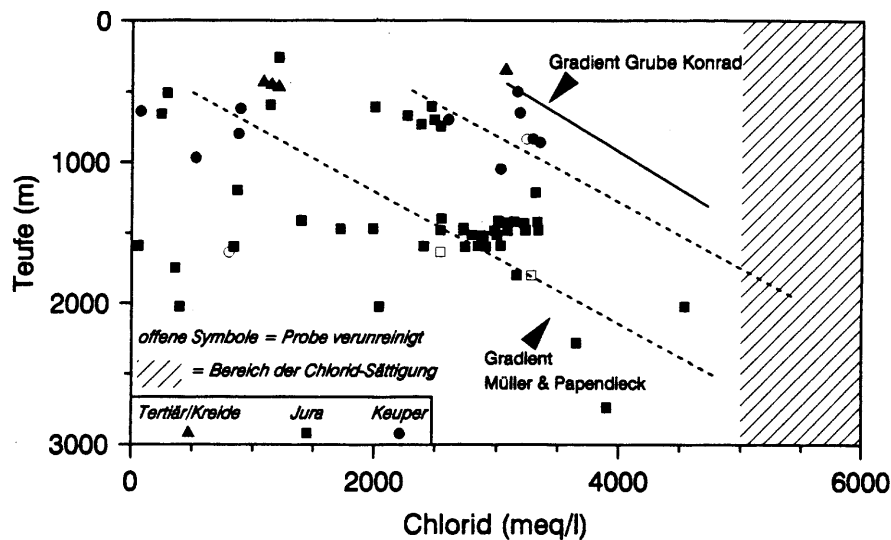


Abbildung 12: Chloridgehalte der Randsenkenwässer des "Gifhorner Trog" in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage

3.3 Gorleben

Auch am Standort Gorleben zeigen sowohl die Gesamtversalzung als auch die räumliche Verteilung der hydrochemischen Hauptgruppen eine deutliche Tiefenabhängigkeit /ALB 91/ (Tabelle 6). Statistisch lassen sich vier nach unterschiedlicher Gesamtmineralisation abgegrenzte Gruppen von Wasseranalysen in verschiedenen Tiefenbereichen darstellen: im Bereich von 0 bis 50 m u. GOK wurden fast ausschließlich Süßwässer angetroffen, während mit zunehmender Tiefe höher mineralisierte Wässer in der Reihenfolge Brackwasser - Salzwasser - Sole auftreten.

In den oberflächennächsten Schichten (0 - 10 m) herrschen CaSO_4 -Wässer vor. In Tiefen > 20 m kommen keine Wässer dieser Gruppe mehr vor (steigender Anteil von CaHCO_3 -Wässern). Mit steigender Gesamtversalzung wird generell Cl zum vorherrschenden Anion. Salzwässer und Solen gehören fast ausschließlich dem NaCl-Typ an (häufig hohe SO_4 -Konzentrationen; erhöhte Br, J, Li, Sr-Gehalte).

Tabelle 6: Zusammenstellung von Leitfähigkeiten sowie NaCl-Gehalten in 25 verschiedenen GoHy-Bohrungen (nach /ALB 91/)

| Teufe [m] | LF [$\mu\text{S cm}^{-1}$] | Na ⁺ [mg l ⁻¹] | Cl ⁻ [mg l ⁻¹] | Teufe [m] | LF [$\mu\text{S cm}^{-1}$] | Na ⁺ [mg l ⁻¹] | Cl ⁻ [mg l ⁻¹] |
|-----------|---------------------------------|--|--|--------------|---------------------------------|--|--|
| 11 | 4.200 | 910 | 440 | 126 | 12.210 | 2.400 | 4.180 |
| 53 | 4.500 | 470 | 90 | 138 | 9.190 | 2.060 | 700 |
| 62 | 18.550 | 1.600 | 944 | 144 | 25.690 | 6.700 | 7.080 |
| 69 | 3.260 | 1.030 | 249 | 145 | 8.830 | 1.900 | 372 |
| 69 | 12.490 | 1.300 | 114 | 170 | 41.380 | 9.400 | 16.590 |
| 76 | 5.720 | 660 | 730 | 172 | 24.280 | 6.200 | 8.110 |
| 85 | 3.350 | 400 | 169 | 180 | 42.690 | 10.300 | 16.640 |
| 86 | 3.730 | 1.010 | 216 | 183 | 36.100 | 9.500 | 13.790 |
| 86 | 4.180 | 290 | 81 | 184 | 36.830 | 8.500 | 13.720 |
| 91 | 2.940 | 760 | 254 | 207 | 22.530 | 5.300 | 6.930 |
| 98 | 2.450 | 340 | 237 | 220 | 35.540 | 9.300 | 14.530 |
| 109 | 41.380 | 2.710 | 6.180 | 230 | 23.070 | 5.800 | 6.360 |
| 121 | 8.830 | 2.100 | 192 | | | | |

Die Tiefenlage eines bestimmten hydrochemischen Wassertyps kann aber auch in verschiedenen Teilbereichen über bzw. neben dem Salzstock sehr unterschiedlich sein.

Insbesondere treten NaCl-Wässer auch in geringeren Tiefen auf, vor allem in Gebieten, in denen die Süß-/Salzwassergrenze aufgrund des Aufstiegs salzhaltiger Grundwässer ungewöhnlich hoch liegt. Dies kann auf begrenzte vertikale Wegsamkeiten und/oder auch anthropogen verursachte Potentialdifferenzen aufgrund großräumiger Druckentlastungen (Entwässerung des Marschengebietes) /BRÜ 83/ zurückgeführt werden.

3.4 Norddeutschland

In Ergänzung bzw. zur Unterstützung der in Kapitel 3.2 dargestellten Ergebnisse hat - im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens Schachtanlage Konrad - das NLfB von der BGR zusätzliche Nachweise zur Salinitätsverteilung innerhalb und außerhalb des Modellgebietes Konrad gefordert (insb. Daten aus der Erdölindustrie). Als Ergebnis der Auswertung von knapp 1.500 Analysen von Formationswässern im Bereich des Niedersächsischen Beckens wird von /KLI 91/ festgestellt, dass bei den Formationswäs-

sern des Sedimentkomplexes Tertiär bis Rhät (aus dem Hangendbereich der Salinare) **keine lineare Korrelation** zwischen Salzgehalt und Tiefe besteht, sondern vielmehr eine starke, von der Entnahmetiefe weitgehend unabhängige Streuung der Salzgehalte zu beobachten ist (Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14).

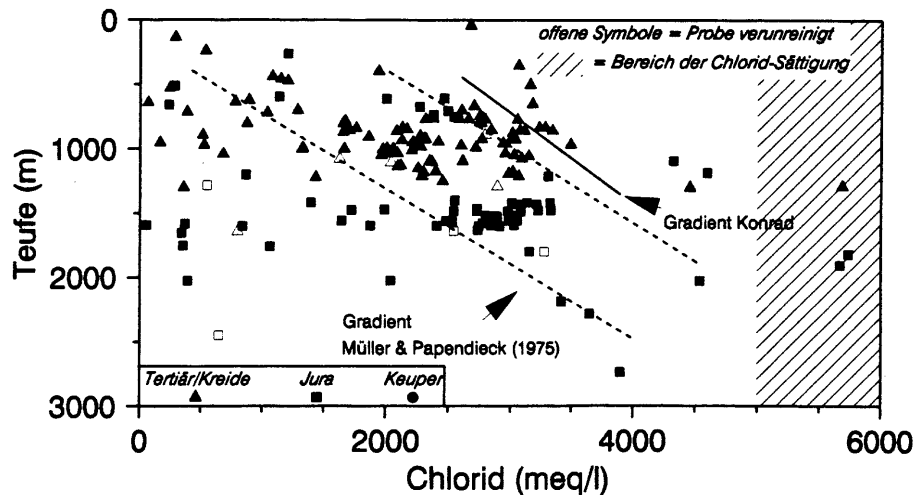


Abbildung 13: Chloridgehalte norddeutscher Salzstockrandwässer in Abhängigkeit von der Tiefenlage /KLI 91/

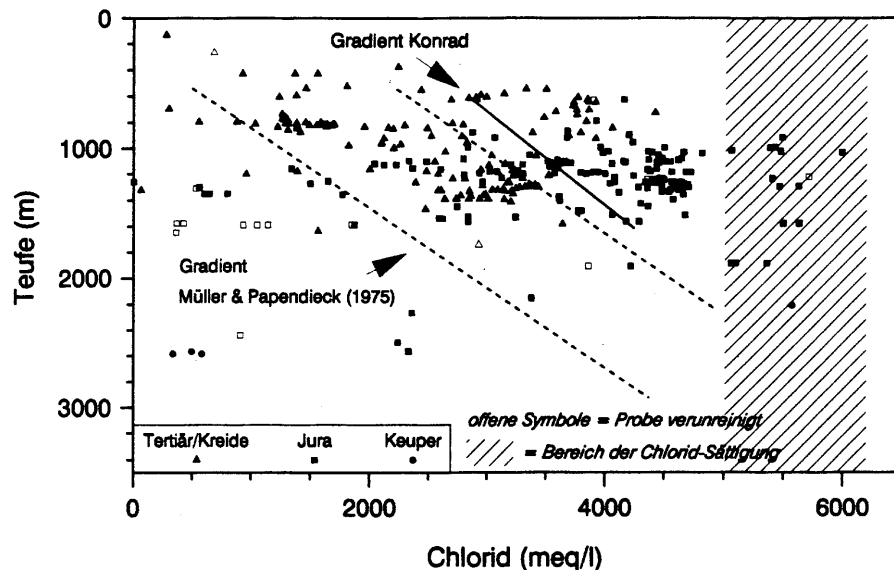


Abbildung 14: Wasseranalysen der Fa. Wintershall; Cl-Konzentration des Postsalinars im Niedersächsischen Becken in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage /KLI 91/

Als Ursache für die o. g. starke Streuung der Salzgehalte wird eine weitgehende Verfälschung der Analysenergebnisse vermutet, die auf Verunreinigung mit Bohrspülung,

Verdünnung und damit verbundene fehlerhafte Probennahme vermutet (s. auch /DIC 69/). Als Indiz hierfür kann die Tatsache herangezogen werden, dass die Wässer aus dem Niedersächsischen Becken im Vergleich zu Analysen von Formationswässern aus dem Gebiet der ehemaligen DDR tendenziell niedrigere Salzgehalte aufweisen. Ungeachtet dessen sind auf Basis der erwähnten Datenlage keine belastbaren Aussagen zu einer linearen Teufenabhängigkeit der Grundwassermineralisation möglich.

Eine zusammenfassende Veröffentlichung aus der ehemaligen DDR /MÜL 75/, die auf Analysen von mehreren hundert Grundwasseranalysen aus der Schichtenfolge Tertiär bis Karbon (200 - 5000 m Teufe) basiert, zeigt - im Gegensatz zu den o. g. norddeutschen Grundwasseranalysen - teilweise direkte Abhängigkeiten zwischen Konzentration und Teufenlage der Wässer (Abbildung 15), wobei wenig konkrete Vorstellungen hinsichtlich der Entstehung eines Salinitätsgradienten bestehen. Diskutiert werden insbesondere a) ungehinderte Porenwasser-Bewegungen in Sedimentbecken über geologische Zeiträume hinweg, die zu Dichteschichtungen führen, b) gravitatives Absinken gelöster Ionen sowie c) thermoelektrische Effekte an Tonmembranen und zwar:

- Komplex Rät - Unterkreide / Paläogen (Tertiär, Kreide, Jura, z. T. Trias): **direkte Abhängigkeit zwischen Konzentration und Teufenlage** bei Salzgehalten zwischen 30 und 250 g l⁻¹ bei einer Teufe zwischen 250 und 2.400 m. Das entspricht nach /KLI 91/ einem **Salinitätsgradienten von 110 mg l⁻¹m⁻¹** und einer Salinitäts- und Dichteverteilung, die sich bei einem vorherrschend diffusiven, vertikal zur Oberfläche gerichteten Stofftransport gelöster Salze im stationären Zustand einstellt.
- Rotliegendes: Bei Salzgehalten zwischen 40 und 360 g l⁻¹ besteht in Randbereichen eine deutlich ausgeprägte Abhängigkeit zwischen Konzentration und Tiefenlage; in tieferen Beckenbereichen herrscht Salinarbeeinflussung vor; in Teilgebieten liegt eine **Inversion** der Salzkonzentration bzw. Salinitätsschichtung vor, die durch abwärts gerichteten, diffusiv gesteuerten Stofftransport gelöster Salze des Zechsteinsalinars erklärt werden kann /KLI 91/.
- In Schichten des Prä-Perm, Staßfurtkarbonat, Plattendolomit und z. T. der Trias liegt **keine Teufenabhängigkeit** der Grundwasser-Mineralisation vor.

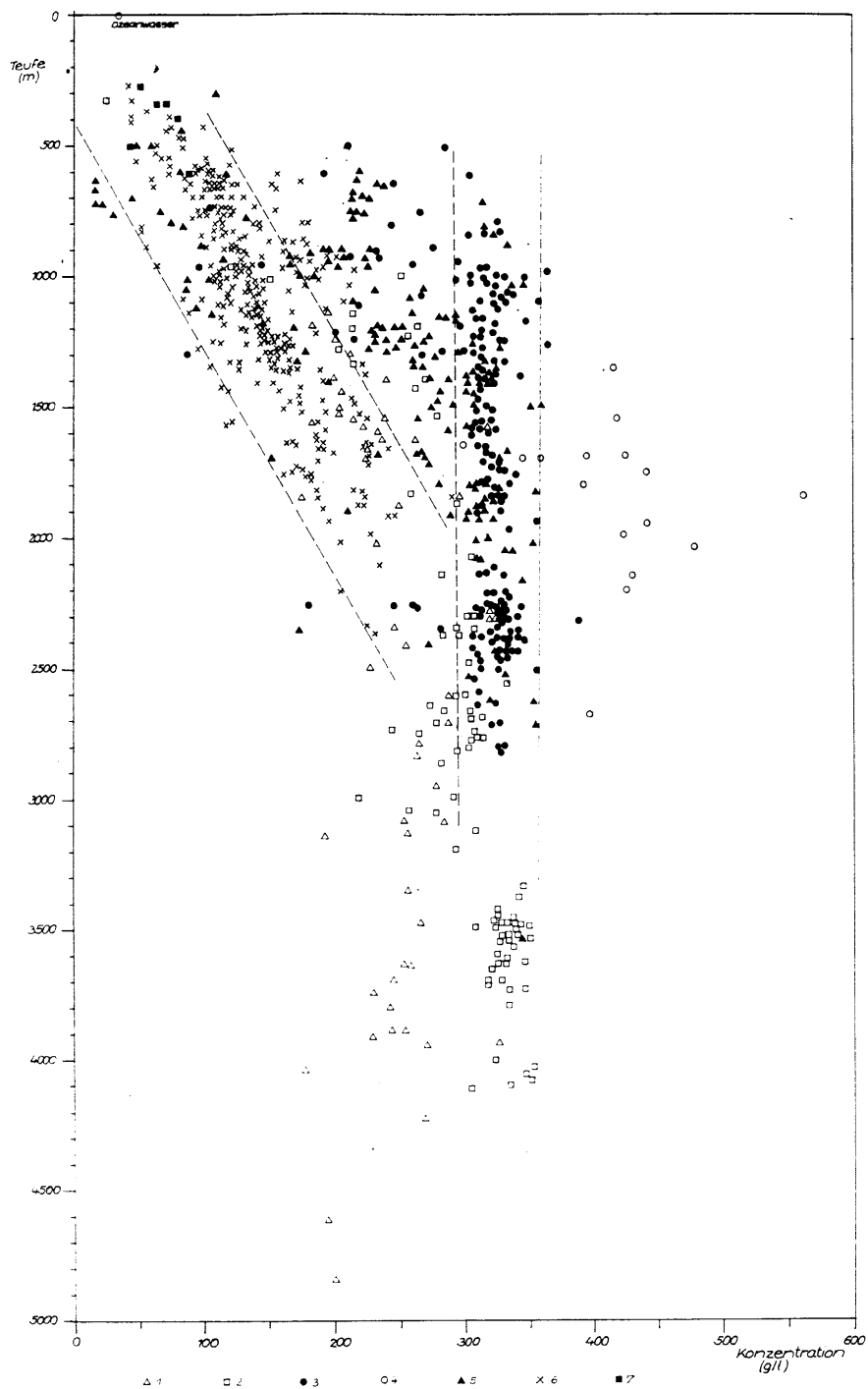


Abbildung 15: Gesamtkonzentration der Schichtwässer des Nordteils der [ehemaligen] DDR und des Thüringer Beckens in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage /MÜL 75/ (1 Prä-Perm, 2 Rotliegendes, 3 Staßfurtkarbonat, 4 Plattendolomit, 5 Trias, 6 Rät-Unterkreide, 7 Tertiär)

Bei Zusammenfassung der norddeutschen Wasseranalysen /KLI 91/ in einer entsprechenden Darstellung (Abbildung 15) /MÜL 75/, zeigen sich noch einmal die gravierenden Unterschiede zwischen beiden Datengruppen /KLI 91/:

- 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 niedersächsischen Beckens (Abbildung 16) 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 Prä-Perm 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 ist.

Bei einem Vergleich der am Standort Konrad ermittelten bzw. abgeleiteten Ergebnisse /KLI 90/, /KLI 92/ mit der in ostdeutschen Tiefengrundwässern festgestellten teufenabhängigen Konzentrationszunahme (/MÜL 75/ mit Interpretationsergänzungen von /KLI 91/) ist zu beachten, dass im ersten Fall ein konkreter Standort (kleinräumig) untersucht worden ist, im zweiten Fall eine großräumige Zusammenstellung mehrerer hundert Analysen aus einer Vielzahl von Bohrungen erfolgt ist. Ob bzw. inwieweit hier in einer einzelnen Bohrung bzw. einer einzelnen Lokation ebenfalls eine lineare Konzentrationszunahme zu beobachten ist, kann nicht beurteilt werden.

Von Voigt /VOI 00/ wird eine lineare Zunahme der Salinität mit der Teufe grundsätzlich als Indikator für ein **offenes System** interpretiert, wobei eine im Grundwasser (durch Auflösung von Gesteinskomponenten) vorhandene Mineralisation durch Infiltration von (Niederschlags-) Wasser an der Erdoberfläche verdünnt wird; dieser Verdünnungsvorgang nimmt generell mit zunehmender Teufe ab, so dass - den obigen Abbildungen ganz ähnliche - Salinitäts-/Tiefen-Beziehungen resultieren (Abbildung 17).

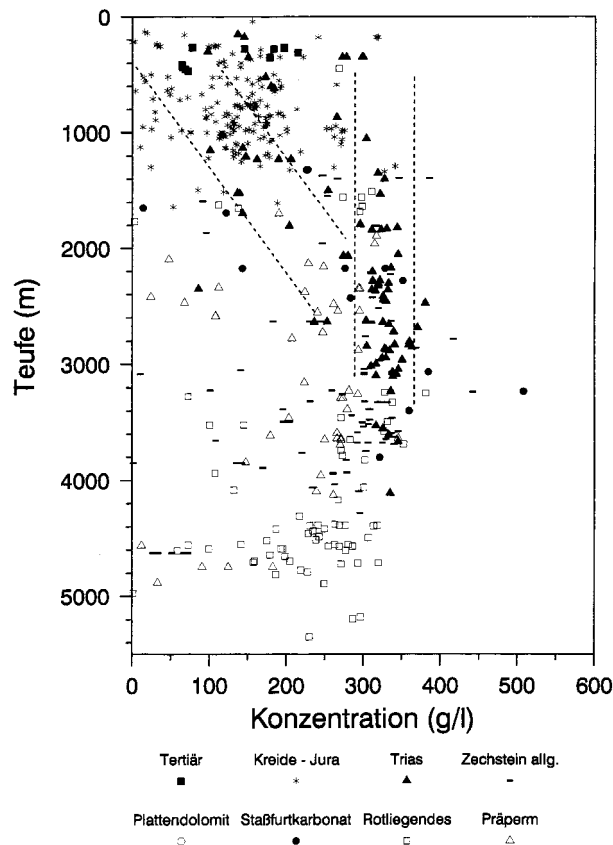


Abbildung 16: Gesamtkonzentration von Formationswässern Nord- und Nordwest-deutschlands in Abhängigkeit von ihrer Tiefenlage /KLI 91/

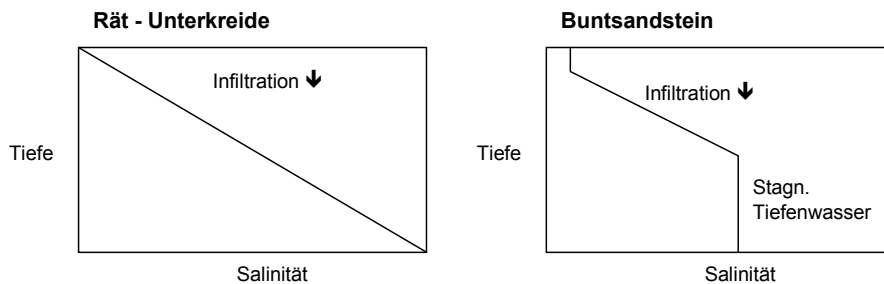


Abbildung 17: Charakteristische Salinitäts-/Tiefen-Beziehungen für Grundwasser in unterschiedlichen Gesteinskomplexen (schematisiert, o. M.) /VOI 00/

Auch bei dieser Interpretation können in der Tiefe sehr geringe Grundwassergeschwindigkeiten vorliegen, die durchaus mit Diffusionswerten vergleichbar sind.

Die von /KLI 90/, /KLI 92/ beschriebene Diffusion der Grundwässer durch unterschiedliche Formationen hindurch differiert in einem gewissen Umfang mit den Beobachtungen von /VOI 75/, /VOI 90/. Demnach sind die Eigenschaften von Tonen (insbes. auch die Austauschkapazität) abhängig vom Bildungsmilieu (kontinental / marin) und damit

letztendlich auch für bestimmte Alter charakteristisch. Kontinentalablagerungen zeichnen sich durch $r\text{Ca}/r\text{Mg}$ -Verhältnisse der Austauschbasis von 6-22 und durch $r\text{Ca} + r\text{Mg}/r\text{Na} - r\text{K}$ -Verhältnisse von 6-28 aus, wogegen für marine Tone diese Koeffizienten durch Werte unter und um 1 charakterisiert werden. Vergleicht man die in oberflächlich anstehenden Tonen ermittelten Ionenverhältnisse mit denen von Tonen, die sich in größeren Tiefen im Einflussbereich NaCl-betonter Wässer befinden, zeigt sich analoges Bild (Abbildung 18).

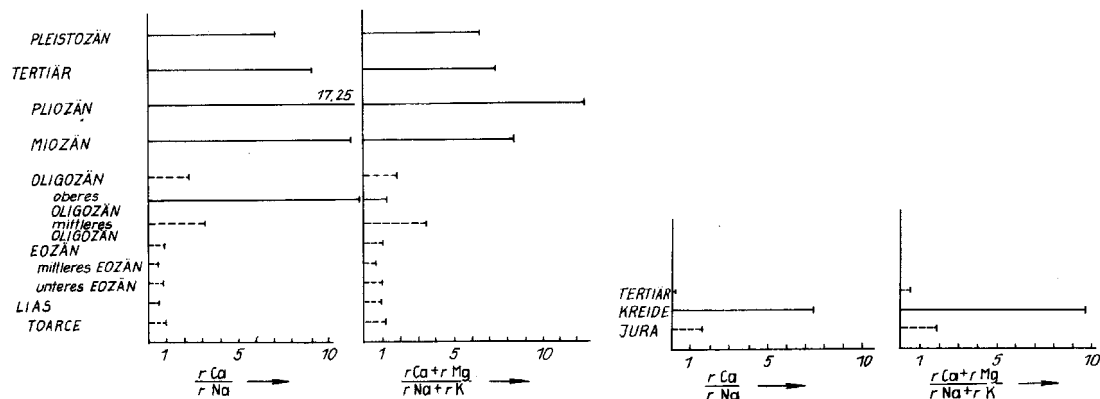


Abbildung 18: Durchschnittliche Werte der Quotienten $r\text{Ca}/r\text{Na}$ und $r\text{Ca}+r\text{Mg}/r\text{Na}+r\text{K}$ im Adsorptionskomplex von Tonproben kontinentaler (—) bzw. mariner (--) Tonablagerungen (links: oberflächlich anstehende Tone; rechts: Tone aus größeren Teufen im Einflussbereich NaCl-betonter Wässer) /VOI 90/ (r bezeichnet die Äquivalentmengen)

Die hydrogeologische Schlussfolgerung hieraus ist, dass Tonschichten aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit auch bei veränderten äußeren Bedingungen kationenaustauschseitig keinen Einfluss auf den Chemismus benachbarter Grundwässer ausüben (im Unterschied zu dispers verteilten Ton- und Schluffpartikeln) und somit die Rolle des Kationenaustausches zwischen Grundwasser und tonigen Ablagerungen sehr einzuschränken ist. Für die Fragestellung der vorliegenden Studie ist aber auch bei einer /VOI 00/, /VOI 90/ folgenden Interpretation festzuhalten, dass fehlende Austauschprozesse und fehlende Diffusion durchaus im Sinne einer Dichtheit des Systems und damit fehlender Ausbreitungsmöglichkeiten für die im tiefen Grundwasser enthaltenen Schadstoffe bewertet werden können.

Grundsätzlich verweist /VOI 75/ darauf, dass sich in den meisten Grundwasserbecken **keine** geradlinige Abhängigkeit der Dichte von der Teufe erkennen lässt (Ausnahmen: s. /MÜL 75/).

Auch /HEC 00/ vertritt die Ansicht, dass eine zur Erdoberfläche hin niedrigere Mineralisation in erster Linie durch verstärkte Auslaugung (aufgrund hohen Grundwasserstroms) und nicht durch einen Diffusionsgradienten von der Tiefe her verursacht wird. Eine hohe Mineralisation in der Tiefe, die einen Salinitätsgradienten vorspiegeln kann, ist auch bei (dort) starker Wasserbewegung möglich. Letztendlich sind Kluftzonen und hydraulische Verbindungen für ein in der Tiefe angetroffenes Grundwasser entscheidend, nicht generell die Tiefenlage.

An anderer Stelle /DVW 87/ wird darauf verwiesen, dass Salzaufstieg im Untergrund und die Auswirkungen mehrerer Vereisungsperioden in großen Teilen der Norddeutschen Tiefebene zu z. T. komplizierten und oft nicht klar erfassbaren Aquifersystemen führen. Da der Kenntnisstand über die Verbreitung nutzbaren Tiefenwassers noch nicht ausreichend ist, besteht besonders hier eine Gefährdung durch lateral zusetzendes Salzwasser /UDL 77/.

Carlé beschränkt in seiner umfassenden Monographie über die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa /CAR 75/ seine Beobachtung von Besonderheiten in der Konzentrationsverteilung auf salinare Wässer in Nordwest-Deutschland: *Salinare Wässer in Klüften und Poren des Untergrundes von Nordwestdeutschland zeigen eine eigenartige Verteilung der Konzentration im Hinblick auf die Tiefe, ohne Rücksicht auf die das Wasser bergende Formation. Salzstock-Nähe oder -Ferne, marine oder limnische Fazies spielen keine Rolle. Von der Oberfläche an nimmt die maximale Chlorid-Konzentration zwischen 100 und 300 m Tiefe von 20 auf 160 g Cl/kg zu. Ein allmählicher Rückgang der Maximalwerte wird bis 1200 m Tiefe mit 110 g Cl/kg erreicht, während die Konzentration bis 1500 m wieder auf 180 g Cl/kg zunimmt. Da die gemittelte Tiefenlage der Salzspiegel etwa 400 m tief liegt, ist das obere Konzentrations-Maximum durch Ablaugung der Tops zu erklären, während das untere Maximum eine Folge von Ablaugung flächenhaft liegender Zechstein-Salze ist; die Flanken erscheinen geschützter.*

Aussagen zur tiefenabhängigen Mineralisationszunahme müssen also ggf. differenzierter betrachtet werden. Die "obere" Konzentrationszunahme wird in o. g. Zitat beispielsweise auf Subrosion zurückgeführt, die dann einsetzt, wenn Tagwässer Wege zu Salzlagern finden /CAR 75/. Weder Subrosion, die darunter bis 1200 m Tiefe festgestellte Konzentrationsabnahme noch die postulierte Auflösung schichtig und etwa waa-gerecht liegender Salzflöze können im Sinne eines Indikators für keine bzw. geringe

Grundwasserbewegung schlüssig verwendet werden. Im endlagerrelevanten Teufenbereich ist danach sogar eine Mineralisations**abnahme** charakteristisch.

3.5 Kristallingebiete

Neben Norddeutschland (Erdöl- / Erdgas Explorationsbohrungen) sind auch in Kristallingebieten eine Reihe von Tiefenwasseruntersuchungen verfügbar. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang insbesondere die zusammenfassenden Arbeiten von /STO 93/, /STO 00/, die sich i. w. auf Analysenergebnisse aus dem gesamten kristallinen Schwarzwald incl. seiner Randgebiete konzentrieren. Dabei schwanken die bekannten Ionenverhältnisse in weiten Grenzen, so dass der Chemismus von Grundgebirgswässern recht vielfältig zu sein scheint. Generell ändern sich der Chemismus von Grundgebirgswässern mit der Tiefe und der Wassertyp vom Ca-Na-HCO₃ - über den Na-Ca-SO₄-HCO₃ - bis zum Na-Cl - Typ. Insbesondere wird auch auf eine generelle Cl-Zunahme mit der Tiefe hingewiesen (nach /STO 00/ wird weltweit von salinaren, hochmineralisierten Wässern in größeren Tiefen im kristallinen Grundgebirge berichtet, so dass salinare Wässer eigentlich den "Normalfall" und nichtsalinare Wässer eher eine "Ausnahme" darstellen).

/BRÄ 94/ hat für Kristallingebiete den Versuch eines prinzipiellen Modells für eine teufenabhängige Zonierung unternommen:

- oberflächenbeeinflusstes Wasser (Süßwasser), Ca-Na-(Mg)- oder Na-Ca-HCO₃-(SO₄)-Typ,
- Mischzone zwischen Oberflächen- und Tiefenwässern,
- Tiefenwasser < 2000 m Tiefe, salin, Na-Ca-SO₄-HCO₃-Typ, i. d. R. > 10000 a
- Tiefenwasser > 2000 m, salin, „brines“

Feststoffgehalte schwanken in den obersten 200 - 300 m u. GOK zwischen 100 und 4000 mg kg⁻¹, betragen unterhalb 300 m immer mehr als 1000 mg kg⁻¹ und erreichen in großen Tiefen (> 2000 - 3000 m) Werte > 5000 mg kg⁻¹. CO₂-Aufstieg und Verwitterungsreaktionen spielen für die Aufmineralisation der Wässer eine große Rolle. Bei allen untersuchten "echten" Granitwässern handelt es sich ausschließlich um Thermalwässer, die aus der Tiefe aufsteigen und die dortige Hydrochemie widerspiegeln. Als Folge hiervon sind lithologisch bedingte Unterschiede nicht feststellbar. Nach

/STO 93/ bereitet die Herleitung der Chloridmengen für die Erklärung der Salzgehalte hochmineralisierter Tiefenwässer aus "normalen" Kristallingesteinen Schwierigkeiten. Diskutiert werden insbesondere:

- geöffnete Flüssigkeitseinschlüsse (als alleiniger Lieferant nicht ausreichend; jedoch genetischer Zusammenhang zwischen freien Fluiden und sehr viel älteren Paläofluiden vorhanden),
- radiolytische Zersetzung von Wasser unter Einfluss unterirdischer Neutronenflüsse (in geologisch sehr alten Systemen): Ionisierung der Wassermoleküle (durch Strahlung radioaktiver Akzessorien) soll eine relative Cl-Anreicherung bis zur Brine-Konzentration bewirken können und
- gravitatives Absinken von Formationswässern aus dem ehemaligen sedimentären Deckgebirge in das geklüftete kristalline Grundgebirge; zusätzliche Konzentrationserhöhung durch Wechselwirkungen mit dem Gestein.

Ein salinarer Einfluss aus dem Oberrheingraben oder aus dem Muschelkalk ist nach /STO 93/ nicht erforderlich und kann nach /STO 00/ sogar ausgeschlossen werden. Diese Aussage steht allerdings in Widerspruch zu /VOI 00/, der auf die hohen Anfangsporositäten (bis zu 80 %) bei der Ablagerung von Salzen im Oberrheingraben und die hieraus resultierenden hohen Auspressmengen salinarer Lösungen bei Anstieg des Überlagerungsdruckes verweist. Eine Infiltration dieser salinaren Lösungen in das Grundgebirge des Schwarzwaldes ist demzufolge durchaus möglich.

Die internationale Diskussion um die Herkunft der Salinität in Grundgebirgswässern konzentriert sich auf folgende Möglichkeiten einer Cl-Anreicherung:

- Herkunft aus dem Gestein selbst (Mineralgitter, Fluideinschlüsse, Korngrenzen),
- aus benachbarten salinaren Ablagerungen,
- Intrusion von Meerwasser sowie
- Membranfiltration

/BRÄ 94/ bestätigt die in den meisten Fällen deutlich mit der Tiefe zunehmende Mineralisation der Grundwässer, schränkt aber ein, dass weitreichende Übergangszonen existieren, die oft eine eindeutige Grenzziehung oder Einteilung in bestimmte Stockwerke unmöglich machen. Infolgedessen kann, im Gegensatz zu einzelnen Sediment-

becken (s. o.) im Kristallin auch kein Gradient einer Salinitätszunahme angegeben werden. Nach /KAN 87/ gibt es ausdrücklich **keine gesetzmäßige Zunahme der Salinität mit der Tiefe**. Derselbe Autor fasst auch zusammen, dass in allen Schweizer Granitwässern hohe Cl-Konzentrationen allein durch intergranular lösliches Cl zu erklären sind; "fluid-inclusions", wie sie beispielsweise in Stripa postuliert werden, sind nicht erforderlich.

Große Kristallinegebiete stellen Hauptinfiltrationsgebiete für tief reichende Grundwasser-Systeme dar. Die durch tief greifende Kluftsysteme bedingte Zirkulationstiefe in Graniten des Schwarzwaldes wird mit 2000 - 4000 m angegeben /STO 00/, die Zirkulationsdauer mit 8000 - 10000 Jahren. Ein Beispiel für charakteristische Unterschiede zwischen oberflächennahen und tiefen Granitwässern ist in Abbildung 19 /KAN 87/ dargestellt, die beispielsweise den Anstieg von Na^+ , Cl^- und SO_4^{2-} mit der Tiefe um mehr als eine Zehnerpotenz verdeutlicht.

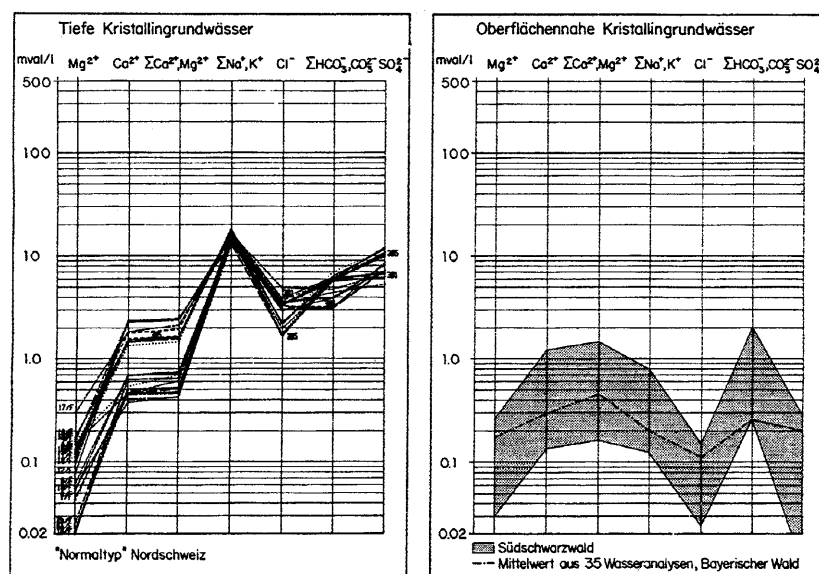


Abbildung 19: Schoeller-Diagramme; links: „Normaltyp“-Grundwasser aus 3 Nordschweizer Tiefbohrungen; rechts: Spektrum oberflächennaher Grundwässer des Südschwarzwaldes und Mittelwerte von 35 Granitwässern aus Ostbayern /KAN 87/

Tiefengrundwasser im Kristallin ist nach /BRÄ 94/ in Deutschland nur punktuell, meist im Zusammenhang mit Tiefbohrungen für unterschiedliche Vorhaben untersucht. Die zahlenmäßig bedeutenden Thermal- und Mineralbohrungen sind meist nicht tiefer als 300 m und befinden sich überwiegend in stark wasserführenden Störungszonen. Ein

Problem, das nicht nur für Kristallgebiete Gültigkeit besitzt, ist die Tatsache, dass besonders bei älteren Bohrungen die jeweiligen Randbedingungen einer Probennahme und Analyse nur lückenhaft und schlecht nachvollziehbar sind. Besonders kritisch sind dabei pH- und Eh-Messungen zu bewerten.

Tabelle 7: Referenzgrundwässer im Kristallingestein /BRÄ 94/

| | Westschweiz | Ostschweiz |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------|
| pH | 7,66 | 7,68 |
| Eh [mV] | -180 | -300 |
| Na ⁺ [mg l ⁻¹] | 323,8 | 177 |
| Mg ²⁺ | 0,3 | 1,1 |
| Ca ²⁺ | 14 | 11,5 |
| F ⁻ | 12,2 | 11,8 |
| Cl ⁻ | 128 | 26 |
| SO ₄ ²⁻ | 296 | 135 |
| HCO ₃ ⁻ | 285 | n.n. |
| CO ₃ ²⁻ | 2,7 | n.n. |
| B(OH) ₃ | 3,4 | 0,9 |
| O ₂ | 0,0005 | 0,008 |

Eine detaillierte Bearbeitung von Analysen erfolgt meist nur für spezifische Standortuntersuchungen, so dass ein Vergleich mit anderen Lokationen schwierig bis unmöglich ist. Im Rahmen einer Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein hat /BRÄ 94/ deshalb zwei Referenzwässer ausgewählt, die zum einen saline Wässer und zum anderen Wässer aus dem Süßwasserbereich repräsentieren.

3.6 Unterfranken

Auch für den unterfränkischen Raum ergibt sich nach /HOF 90/ - ähnlich den obigen Darstellungen - eine Gliederung in 3 Grundwasserstockwerke, die folgendermaßen charakterisiert sind:

- HCO₃-Wässer-Stockwerk mit relativ schneller Grundwasser-Strömung, hohem Sauerstoffgehalt und insgesamt geringer Mineralisation,
- SO₄-Wässer-Stockwerk mit geringem bis fehlendem Sauerstoffgehalt, Rückgang von HCO₃ und Zunahme der Gesamtmineralisation sowie

- Cl-Wässer-Stockwerk mit SO_4 - Rückgang, weiterer Zunahme der Mineralisation und deutlicher NaCl-Vormacht in Tiefengrundwässern, bes. im Zentrum des fränkischen Beckens.

Die Salinitäts- / Dichtezunahme zur Tiefe hin basiert hauptsächlich auf einer Zunahme der Steinsalzlösung im Grundwasser; Gas-Lift-Effekte beeinflussen lokal die Lage der Süß- / Salzwassergrenze. Druckentlastungen an Störungen oder künstlichen Aufschlüssen (hierzu gehören beispielsweise auch Tiefbohrungen) können darüber hinaus eine lokale Umkehrung der Dichte - Tiefen - Funktion verursachen.

Um ein Fließen von Grundwasser im tiefen Untergrund zu ermöglichen, muss das System an einer oder mehreren Stellen geöffnet sein; dabei regelt nicht immer das maximale Potentialgefälle, sondern der geringste Abflusswiderstand die Strömungsrichtung. Im hier dargestellten Untersuchungsgebiet findet die Strömung von Tiefengrundwasser zum überwiegenden Teil auf tektonisch angelegten Gesteinsöffnungen, wasserweg-samen Klüften und Störungen mit einer hydraulischen Wirksamkeit bis über 1000 m Tiefe statt. Fließstrecken können nach /HOF 90/ viele 10er bis 100er von Kilometern betragen, wobei sich diese Wässer aufgrund ihrer hohen Dichte meist unterhalb geringer mineralisierter autochthoner Grundwässer bewegen (sog. "Wandersolen"). Lokaler Aufstieg von Tiefengrundwasser kann beispielsweise durch CO_2 -Entgasung, hydraulisch bedingte Aufwärtsströmung sowie Diffusion verursacht sein. Jede Bewegung von Tiefengrundwasser bedingt chemisch-thermodynamische Veränderungen in der Zusammensetzung der Lösungsinhalte.

/UDL 77/ beschreibt, dass salzfreie bzw. salzarme Tiefengrundwässer im Bereich des Fränkischen Schichtstufenlandes bis auf das Kristallin herab reichen, die genaue Ausdehnung der NaCl-armen Zone aber noch nicht bekannt ist.

3.7 Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen sind nach /MIC 74/ Tiefengrundwässer - wie auch in anderen Gebieten - mehr oder minder mineralisiert; das tiefste Grundwasser ist dem NaCl-Typ zuzuordnen.

Auch nach /WED 95/ bestehen die tiefen Grundwässer des Ruhrkarbons meistens aus hochkonzentrierten Na-Cl- oder untergeordnet Na-(Ca)-Cl-Wässern, wobei im allge-

meinen die Salzkonzentration mit der Teufe zunimmt (Abbildung 20). Neben Na-Cl-Wässern treten insbesondere im deckgebirgsfreien Südteil des Steinkohlengebirges Sulfat- und Hydrogencarbonat-Wässer auf. Die erhöhten Sulfatgehalte resultieren aus Oxidationsprozessen von Eisendisulfiden (Pyrit), die in den Schichten des Karbons weit verbreitet sind. Ein annähernd linearer Anstieg im Salzgehalt der Wässer wird von /WED 95/ ab einer Teufe von -300 m NN bis -450 m NN festgestellt. Oberhalb dieser Teufe ist aufgrund der Grundwasserzirkulation keine deutlich ausgeprägte Tendenz in der Salinität zu beobachten.

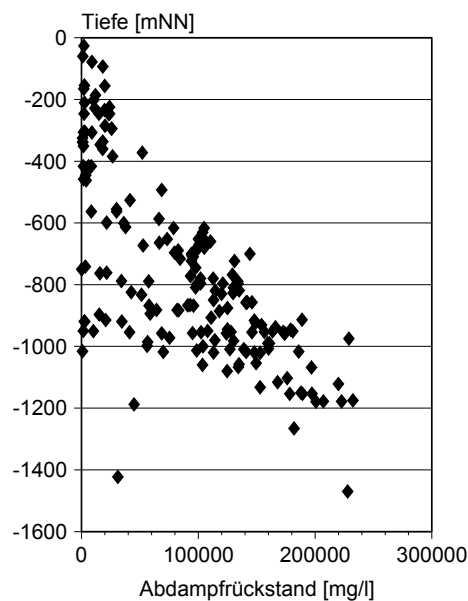


Abbildung 20: Abdampfrückstand der Tiefenwässer im Ruhr-Revier in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe /WED 95/

Trotz des deutlich erkennbaren generellen Trends bleibt für eine definierte Tiefe eine große Variationsbreite an festgestellten Gesamtmineralisationen bestehen. Nach /WED 95/ stammen Proben mit für die entsprechende Entnahmetiefe zu geringen Konzentrationswerten aus höheren Niveaus mit geringeren Salinitäten oder stellen mit Brauchwasser kontaminierte Proben dar.

In einem Ansatz zur Interpretation "deutet" ein lineares Salzprofil einen stationären Stofftransport in porösen Medien durch molekulare Diffusion von stark mineralisierten Tiefenwässern in das oberflächennahe, süße Grundwasser an /WED 95/. Nach überschlägigen Berechnungen kann sich der diffusive Salztransport zum Aufbau eines Salzprofils über der Salzlagerstätte (hier: Buntsandstein) mit einer Diffusionsgeschwindigkeit von v_{diff} von $0,015 \text{ mm a}^{-1}$ vollziehen (entsprechend 15 m/1 Mio Jahre), so dass

molekulare Diffusion einen Salztransport nach oben durchaus in einer geologisch relativ kurzen Zeit erlaubt.

Auf der Basis der Br/Cl-Verhältnisse ist für die Tiefenwässer im Ruhr-Revier eine Ablaugungssole mit einem geringen Restanteil von ursprünglicher Mutterlauge anzunehmen, wobei Subrosion und Laugenmigration nicht als abgeschlossene Vorgänge angesehen werden können. Eine quantifizierbare Gegenüberstellung von Salinitätszunahme und Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit ist auch in der hier dargestellten Untersuchung /WED 95/ nicht enthalten.

3.8 Sonstige Gebiete

Über die o. g. Standorte / Regionen hinaus gibt es in der recherchierten Literatur eine Reihe von Informationen bezüglich teufenabhängiger Salinitätszunahme, die aber nicht über einen qualitativ-beschreibenden Status hinausgehen. Nachfolgend werden einige dieser Aussagen zusammenfassend dargestellt.

Schleswig-Holstein /LÖH 67/: Verursacht durch pleistozäne Rinnen bilden - großräumig gesehen - alle tieferen Grundwasserstockwerke eine hydraulische Einheit.

Erft- / Rheintalscholle /SCE 81/: Eine Salz- / Süßwassergrenze ist weder horizontal noch vertikal als einheitliche Grenzschrift festlegbar; Verwerfungen spielen sowohl für die Ausbreitung als auch die Begrenzung der Salzwasservorkommen (unterhalb 850 bzw. 150 m Tiefe) eine bedeutende Rolle.

Senne /GEY 83/: In der Senne liegt bis 700 m Tiefe ein bedeutendes Süßwasservorkommen vor. Als neue Erkenntnis wurde festgestellt, dass Tiefengrundwasser nicht unbedingt alt und fast stagnierend sein muss, sondern durchaus sehr jung und schnellfließend sein kann, auch wenn noch nicht einmal eine natürliche hydrogeologische Vorflut existiert; in der Vergangenheit waren alle Bearbeiter 150 Jahre lang der Überzeugung, dass in den Kalksteinen des Münsterländer Kreidebeckens nur Sole vorkommt.

Asse-Salzsattel /BAT 81/: Mit zunehmender Tiefe nimmt zwar i. a. der Anteil des Salzwassers am Grundwasser zu, jedoch ohne erkennbare Gesetzmäßigkeit.

Stadtgebiet Berlin /BRÜ 83/: Der Chemismus der untersuchten Grundwässer lässt i. a. mit zunehmender Tiefe eine ABNAHME der Gesamtmineralisation erkennen.

Norddeutsch-polnische Senke /VOI 90/: Der mittelloligozäne Rupelton bildet über weite Gebiete die natürliche Grenze zwischen süßem und versalzenem Grundwasser; in der Lodzer Mulde sind süße Grundwässer bis in eine Tiefe von 1000 m nachgewiesen.

Süddeutsche Großscholle /UDL 81/: Salzwasserspiegel wird im Bereich der Mittelgebirge durch Inseleffekte sowie Süßwassereinschichtungen differenziert; bislang keine umfassende Arbeit zur Behandlung der Süß- / Salzwasserverteilung in einheitlicher Betrachtungsweise. Salzwasservorkommen in Festgesteinen sind - abseits von Salzlagern - ausnahmslos allochthon.

Benker Sandstein /DÜM 83/: Zur Tiefe steigen Mineralisierung und hier insbesondere die Sulfatgehalte stark an; es treten starke Unterschiede auch in nur wenig voneinander entfernten Brunnen auf.

Muschelkalk-Aquifer /PEA 91/: Im selben Aquifer sind stark variierende NaCl-Konzentrationen innerhalb kurzer Entfernungen zu beobachten.

Molassebecken /EGG 83/: Die Schichtenfolge ist sowohl horizontal wie vertikal einem raschen faziellen Wechsel unterworfen, so dass über größere Entfernungen durchziehende Grundwasser-Stockwerke nicht vorhanden sind. Da aber alle grundwasserführenden Schichten der Oberen Süßwassermolasse ein einheitliches Druckverhalten aufweisen, werden sie zu einem Grundwasserleiter zusammengefasst. Nach /PEA 91/ treten im gesamten Molasse-Becken drei hydrochemisch unterschiedliche Wassertypen auf, die übereinander liegen: a) Ca-Mg-HCO₃ (zwischen 25 und 100 m Tiefe) - b) Na-HCO₃ (25 - 625 m, wobei Ionenaustausch als Na-Quelle angesehen wird) - c) NaCl [direkt unter b); ggf. unter a)]. (Abbildung 21)

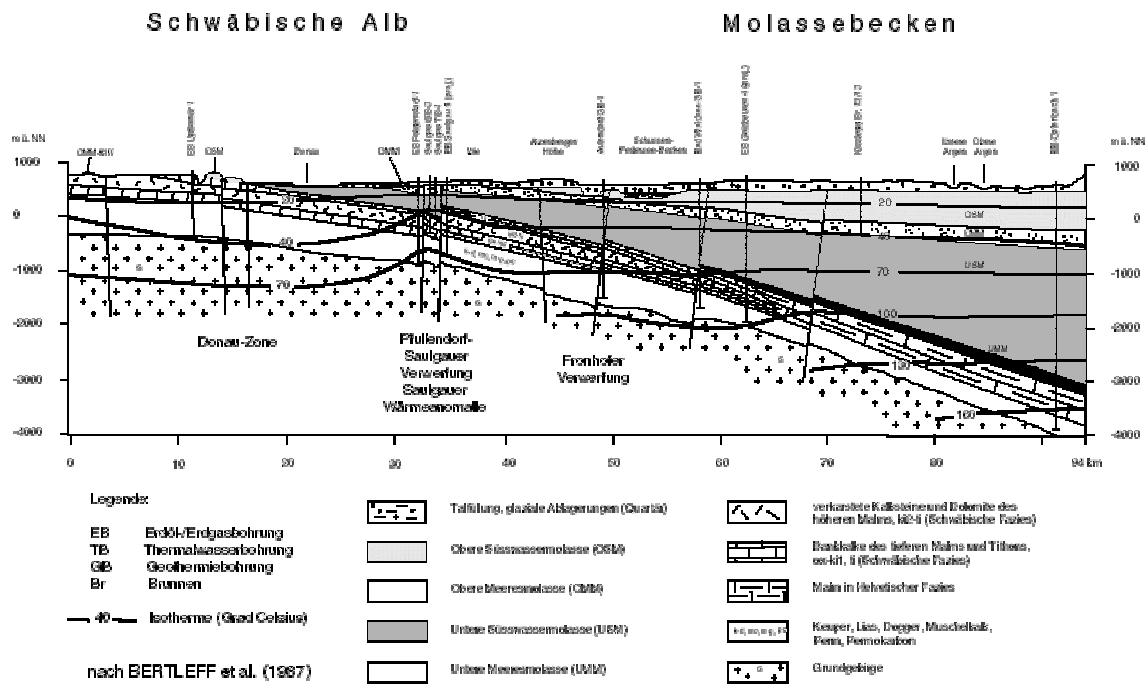


Abbildung 21: Geologisches Querprofil durch Schwäbische Alb und Molassebecken;

Quelle: <http://lgrb1.lgrb.uni-freiburg.de/>

Oberrheinigraben /HEI 83/: Durch Aufstieg von unter hohem Druck stehenden Na-Cl-HCO₃-Thermen aus Tiefen unterhalb 350 m werden wesentlich geringer mineralisierte Grundwässer in höher gelegenen Grundwasserleitern versalzen.

Alpiner Bereich /UDL 81/: Im alpinen Bereich herrschen ganz andere Verhältnisse; als Steuerelement für [Zusammensetzung und Bewegung] aller Tiefenwässer ist der verkarstete Malm anzusehen, in dem bislang nur Süßwasser angetroffen wurde.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In Zusammenfassung der durchgeführten Recherchen (Bibliotheks-Recherche über GEOFIZ; sämtliche einschlägige Internet-Suchmaschinen; Forschungsprojekte sowie Diplom- und Doktorarbeiten an geowissenschaftlichen Universitätsinstituten; Publikationen geowissenschaftlicher Landes- und Bundesbehörden; Forschungsberichte zu Endlagerstandorten; aufgabenspezifische Proceedings und Fachtagungsbände; Umweltliteraturdatenbank ULIDAT und Umweltforschungsdatenbank UFORDAT des Umweltbundesamtes; Auswertung eigener FuE-Berichte; persönliche Diskussion mit Hydrogeologen aus geologischen Landes- und Bundesbehörden sowie Universitäten) wird nachfolgend eine Zusammenfassung über den Sachstand wiedergegeben:

- Zunehmende Mineralisation mit der Tiefe ist eine weitverbreitete Tatsache, die aber meist **nur rein qualitativ** beschrieben wird. Lediglich für einzelne Standorte bzw. Regionen sind quantifizierte, lineare Gradienten ausgewiesen bzw. abgeleitet.
- Es existieren meist nur generelle Aussagen über geringere Durchlässigkeiten im tiefen Untergrund. Gleiches gilt auch bzgl. deren **genereller** Abnahme mit zunehmender Teufe. Eine quantifizierbare, direkte Koppelung zwischen zunehmender Grundwassermineralisation einerseits und abnehmender hydraulischer Leitfähigkeit andererseits konnte - mit Ausnahme der Untersuchungen im Bereich der Schachtanlage Konrad - bislang nicht recherchiert werden.
- Darüber hinaus besteht grundsätzlich das **Definitionsproblem**, was unter dem Begriff "linear" zu verstehen ist. Dies beinhaltet auch die noch offenen Fragen, wie viele Datenpunkte auf welcher Fläche beispielsweise erforderlich sind, um eine Linearität ableiten zu können.
- Insgesamt haben die Recherchen bislang eine **äußerst geringe**, für die Fragestellung dieser Studie verwertbare **Datendichte** ergeben. Vorhandene Tiefbohrungen verfolgen - mit ganz wenigen Ausnahmen - grundsätzlich **andere Zielsetzungen** (z. B. Wassergewinnung für Trinkwasser- oder balneologische Zwecke). Mineral- und Thermalwasserbohrungen sind beispielsweise bevorzugt auf Störungs-

und / oder Kluftzonen angesetzt, an denen besondere Mineralisationsverhältnisse bestehen.

- Viele Autoren verweisen auch auf die besondere Problematik, die mit der **Datenqualität** publizierter Wasseranalysen verbunden ist und die Nutzbarkeit dieser Daten für andere als die primär verfolgten Ziele stark einschränkt.
- Detailuntersuchungen, welche den Fragestellungen dieser Studie entsprechen, können nur standort- und projektspezifisch durchgeführt worden sein, müssen eine Interpretation der Genese der Wasserzusammensetzung unter Verwendung mathematischer Modelle beinhalten, und sind in Deutschland i. w. nur vom Standort Schachtanlage **Konrad** bekannt. Bereits eine Erweiterung der für diesen Standort getroffenen Aussage, dass die mit zunehmender Teufe beobachtete lineare Salinitätszunahme durch diffusionsbestimmte Prozesse verursacht ist (und damit als Indikator für eine geringe Grundwasserbewegung verwendet werden kann /KLI 91/) auf ein größeres Gebiet (z. B. Modellgebiet Konrad, Gifhorner Trog) ist bislang **nicht erfolgreich** gewesen. Als mögliche Ursache kommt insbesondere eine mangelhafte Datenqualität vorhandener Wasseranalysen in Betracht.
- Als eine gewisse **qualitative Unterstützung** des “BGR-Diffusionsmodells” können Tiefengrundwasseranalysen aus dem Gebiet der [ehemaligen] DDR herangezogen werden /MÜL 75/, die nach /KLI 91/ auch im Sinne von diffusionsbestimmten Prozessen interpretiert werden können, ebenso wie Untersuchungen im Ruhr-Revier /WED 95/, die bzgl. linearem Salinitätsprofil und Diffusionsmechanismus allerdings nicht über den Begriff “Andeutungen” hinausgehen. Einschränkend ist außerdem festzuhalten, dass bzgl. dieser Analysen noch kein mathematisch-modellunterstützter Nachweis erfolgt ist. Darüber hinaus basieren sowohl die Publikationen von /MÜL 75/ als auch von /WED 95/ auf einer Zusammenstellung von mehreren hundert Grundwasseranalysen. Ob und inwieweit eine Einzelbohrung oder ausgewählte Bohrungen auf einem der Schachtanlage Konrad entsprechenden Areal ein gleiches oder zumindest ähnliches Salinitäts- / Tiefen - Profil zeigen würden, lässt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt **nicht ableiten**. /CAR 75/ sieht für Norddeutschland im endlagerrelevanten Teufenbereich sogar eine Mineralisations-**abnahme** als charakteristisch an. An anderer Stelle /VOI 01/ wird eine lineare Salinitätszunahme grundsätzlich als Indikator für ein offenes System angesehen und

nur eine Nichtlinearität (mit ausgeprägten Salinitätssprüngen) als Hinweis auf geringe Durchlässigkeiten, Stagnation und Abschluss tiefer Grundwässer interpretiert.

- Nach den bisherigen Recherchen ist eine eindeutige Interpretation von Salinitäts-Tiefen - Beziehungen letztendlich **nicht geklärt**: i. w. werden einerseits Diffusion, die von “unten” nach “oben” wirksam ist, und andererseits ein generell abnehmender GW-Umsatz mit der Tiefe (also von “oben” nach “unten”) zur Erklärung von tiefenbezogener Salinitätszunahme herangezogen. Darüber hinaus existieren eine Vielzahl weiterer Erklärungsmodelle, wie z. B. Gravitation und generell höhere Löslichkeit aufgrund höherer Temperatur und Drücke. Unstrittig ist in allen Fällen eine in der Tiefe generell geringere Grundwasserbewegung (mit Ausnahmen!), die allerdings nicht in einen quantitativen Zusammenhang mit der Mineralisationszunahme gebracht werden kann. Qualitativ kann auch die von /VOI 75/, /VOI 90/ vertretene eingeschränkte Rolle des Kationenaustauschs zwischen Grundwasser und tonigen Ablagerungen als Hinweis auf eine Abdichtung tiefer liegender Horizonte herangezogen werden.
- Grundsätzlich müssen zunächst **großräumige Hydrogeologie** und hydraulische Einheiten bekannt sein, um ein evtl. vorliegendes oder zu ermittelndes Salinitätsprofil interpretieren zu können. Z. B. verursachen pleistozäne Rinnen hydraulische Verbindungen zwischen sonst von einander abgedichteten Grundwasserleitern, so dass über eine relativ große Tiefenerstreckung von einem einheitlichen Grundwasserleiter ausgegangen werden muss. Oft sind aber auch kleinräumig unterschiedliche Effekte von Bedeutung; wie z. B. lokale Salzwasseraufstiege, anthropogene Einflüsse etc., die zu einer Störung oder sogar Umkehrung der normalen Abfolge im Grundwasserchemismus führen können.
- Die noch **offenen Fragen** reichen von der Definition von Linearität, Spezifizierung notwendiger Datendichte bis zur nicht eindeutig geklärten Beziehung zwischen Tiefe, Salinität und hydraulischen Eigenschaften. Sie führen deshalb zu der Schlussfolgerung, dass ein(e) *“teufenabhängige(r) Mineralisation / Salzgehalt”* **nicht generell als Indikator** für *“keine oder langsame Grundwasserbewegung (in der Endlagerteufe)”* angesehen werden kann.
- Die Feststellung einer linearen Salinitätszunahme kann darüber hinaus - aufgrund der bis auf wenige Ausnahmen geringen Datendichte - nur im Rahmen standort-

spezifischer Untersuchungen getroffen werden und ist insofern als Indikator für ein bundesweites “Übersichts-Screening” weniger geeignet.

- Für den Fall, dass in einer Region bzw. an einem Standort eine ausreichende Datendichte gegeben ist, kann ein(e) *“teufenabhängige(r) Mineralisation / Salzgehalt”* ggf. als unterstützender Indikator herangezogen werden. Eine Anwendbarkeit ist nach Meinung der Verfasser aber auch dann **nur im prä-tertiären und ungestörten Hangenden von Salinaren** gegeben. Diese können unter Berücksichtigung der (hydro-) geologischen Gesamtsituation einen definierten Bezugshorizont (als Quelle für einen die Diffusion initiiierenden Konzentrationsunterschied) darstellen. Nicht anwendbar ist der Indikator in Gebieten mit schnell fließenden Grundwasserbewegungen, vornehmlich entlang offener Klüfte, Lösungshohlräume, Verformungszonen und hydrothermalen Gängen etc.
- Zur Verbesserung des Systemverständnisses zwischen Teufenlage, Salinität und hydraulischer Durchlässigkeit wird insbesondere vorgeschlagen, am Beispiel der Schachthanlage Konrad und einer Auswahl weiterer geeigneter Bohrungen die festgestellten Salinitätsprofile mit Ergebnissen hydraulischer Untersuchungen zu korrelieren, auf endlagerrelevante Gebietsgrößen zu beziehen und zusammenhängend zu modellieren.

5 Literatur

- /ALB 91/ Albrecht, H. et al.: Übertägige geowissenschaftliche Erkundung des Standortes Gorleben - Zusammenfassender Bericht, Stand 01.01.1990.- BGR, Archiv-Nr. 108880, Tagebuch-Nr. 12330/91, 369 S., Hannover, 1991.
- /BAT 81/ Batsche, H. & v.Stempel, C.: Die Verteilung von Süß- und Salzwasser im Bereich des Höhenzuges der Asse und der Einfluß des Salzsattels der Asse auf die Temperatur des Grundwassers.- Z. dt. geol. Ges., 132 (Symposium Süßwasser – Salzwasser), S. 811-822, Hannover, 1981.
- /BAT 94/ Batsche, H., Klarr, K., v. Stempel, C.: Hydrogeologisches Forschungsprogramm ASSE.- GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit München, Abteilungsbericht IFT 4/94, 1994.
- /BEC 56/ Becksmann, E.: Grundwasserchemismus und Speichergestein.- Z. dt. geol. Ges., 106, S. 22-35, Hannover, 1956.
- /BGR 94/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Zusammenfassende Bearbeitung der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung der Grundwässer im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben und seiner Randsenken, Hannover, 1994.
- /BRÄ 94/ Bräuer, V.: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein „GEISHA“, AP3 Randbedingungen Hartgestein in Deutschland.- BGR, Archiv-Nr. 112773, Tagebuch-Nr. 12055/94, 55 S., Hannover, 1994.
- /BRE 82/ Brewitz, W. (Hrsg.): Eignungsprüfung der Schachtanlage Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle.- GSF-T136, Neuherberg, 1982.
- /BRÜ 83a/ Brühl, H. & Faber, P.: Beobachtungen zur Versalzung oberflächennahen Grundwassers im Naturschutzgebiet Lucie (Kreis Lüchow-Dannenberg).- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 1055-1067, Hannover, 1983.

- /BRÜ 83b/ Brühl, H. & Trapp, C.: Eigenschaften des Tieferen Grundwassers im nördlichen Stadtgebiet von Berlin (West).- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 923-941, Hannover, 1983.
- /CAR 75/ Carlé, W.: Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa.- Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 1975.
- /DIC 69/ Dickey, P.A.: Increasing Concentration of Subsurface Brines with Depth.- Chem. Geol., 4, pp. 361-370, 1969.
- /DÜM 83/ Dümmer, M.: Niedrig- und höhermineralisierte Wässer des Benker Sandsteins im Raum Nürnberg-Fürth.- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 943-974, Hannover, 1983.
- /DVW 87/ DVWK: Erkundung tiefer Grundwasser-Zirkulationssysteme – Grundlagen und Beispiele.- DVWK-Schriften, H. 81, 233 S., Hamburg und Berlin, 1987.
- /DVW 99/ DVWK: Methoden für die Beschreibung der Grundwasserbeschaffenheit.- DVWK-Schriften, H. 125, 113 S. + Anhang, Bonn, 1999.
- /EGG 83a/ Egger, R. et al.: Isotopenhydrologische Untersuchungen des Tiefengrundwassers im südbayerischen Jungtertiär.- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 985-997, Hannover, 1983.
- /EGG 83b/ Egger, R.: Untersuchungen zur Grundwasserneubildung und zum Grundwasserhaushalt des Tiefengrundwassers im bayerischen Molassebecken.- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 975-983, Hannover, 1983.
- /GAB 97/ Gabriel, B. & Ziegler, G.: Natürliche und anthropogen überprägte Grundwasser-Beschaffenheit in Festgesteinsaquiferen.- in: Matschullat, J., Tobischall, H.J. & Voigt, H.-J. (Hrsg): Geochemie und Umwelt, Kap. 20, S. 343-357, Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- /GER 53/ Gerb, L.: „Reduzierte“ Wässer.- Gas- und Wasserfach, 94, S. 87-92 und 157-161, Weinheim/Bergstr., 1953.

- /GER 58/ Gerb, L.: Grundwassertypen.- Vom Wasser, 25, S. 16-47, Weinheim/Bergstr., 1958.
- /GEY 83/ Geyh, M.A. & Michel, G.: Tiefes Grundwasser in der Senne.- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 885-903, Hannover, 1983.
- /HAN 97/ Hannappel, S. & Voigt, H.-J.: Beschaffenheitsmuster des Grundwassers im Lockergestein.- in: Matschullat, J., Tobschall, H.J. & Voigt, H.-J. (Hrsg.): Geochemie und Umwelt, Kap. 21, S. 359-379, Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- /HEC 96/ Hecht, G.: Heilbäder Südthüringens aus balneogeologischer Sicht.- Geowiss. Mitt. von Thüringen, Beiheft 5, S. 173-191, Weimar, 1996.
- /HEC 99/ Hecht, G.: Die geologischen Ergebnisse der Thermalsolebohrung Bad Colberg 1994.- Geowiss. Mitt. von Thüringen, Band 7, S. 29-49, Weimar, 1999.
- /HEC 00/ Hecht, G.: Persönliche Mitteilung, Weimar, 17.11.2000
- /HEI 83/ Heitele, H.: Nutzung der tiefen Grundwässer im Raum Ludwigshafen/Frankenthal.- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 999-1011, Hannover, 1983.
- /HOF 90/ Hofmann, M.: Hydrogeochemische und hydrodynamische Modellrechnungen zur Genese und Verbreitung von Tiefengrundwässern Unterfrankens.- Hydrogeologie & Umwelt, Heft 1, S. 1-128, Würzburg, 1990.
- /HÖL 70/ Hölting, B.: Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer.- Z. deutsch. geol. Ges., Bd. 121, S. 19-44, Hannover, 1970.
- /HÖL 80/ Hölting, B.: Hydrogeologie.- Enke Verlag, Stuttgart, 1980.
- /JÄC 70/ Jäckli, H.: Kriterien zur Klassifikation von Grundwasservorkommen.- Eclogae geol. Helv., 63, S. 398-434, Basel, 1970.
- /KAN 87/ Kanz, W.: Grundwasserfließwege und Hydrogeochemie in tiefen Graniten und Gneisen.- Geologische Rundschau, 76/1, S. 265-283, Stuttgart, 1987.

- /KAR 81/ Karrenberg, H.: Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine.- Springer-Verlag, Wien, New York, 1981.
- /KLI 90/ Klinge, H. & Jaritz, W.: Stellungnahme zur Auswirkung des Salinars im Mittleren Muschelkalk auf die Tiefenwasserhydraulik im Gebiet der Schachtanlage Konrad.- BGR, Archiv-Nr. 106340, Tagebuch-Nr. 10176/90, 35 S.; Hannover, 1990.
- /KLI 91/ Klinge, H.: Zur Salinität der Tiefenwässer Norddeutschlands.- BGR, Archiv-Nr. 106340, Tagebuch-Nr. 10659/91, Band 1 (Text) 52 S., Band 2 (Anlagen) 81 S.; Hannover, 1991.
- /KLI 92/ Klinge, H., Vogel, P. & Schelkes, K.: Chemical composition and origin of saline formation waters from the Konrad Mine, Germany.- Proc. of the 7th Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Park City, Utah, USA, 13-18 July 1992, pp. 1117-1120; A.A.Balkema, Rotterdam, 1992.
- /LAI 89/ Laier, T.: Mapping of low enthalpy brines in Denmark for geothermal exploitation.- Proc. 6th Int. Symp. on Water-Rock Interaction, Malvern, pp. 409-412, 1989.
- /LEH 74/ Lehmann, H.-W.; Geochemie und Genese der Tiefenwässer der Norddeutschen Senke.- Z. angew. Geol., 20, S. 502-509 und 551-557, Berlin, 1974.
- /LÖH 67/ Löhnert, E.: Grundwasser-Typen tieferer Stockwerke in Hamburg.- N. Jb. Paläont. Abh., 129, S. 113-136, Stuttgart, 1967.
- /MAT 90/ Mattheß, G.: Die Beschaffenheit des Grundwassers.- Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart, 1990.
- /MIC 74/ Michel, G.: Zur Mineralisation des tiefen Grundwassers in Nordrhein-Westfalen, Deutschland.- Journal of Hydrology, 3, pp. 73-87, Amsterdam, 1974.
- /MÜH 97/ Mühlenweg, U., Brasser, Th. und Hertel, U.: Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen – Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung.- GRS-144, 66 S., Köln, 1997.

- /MÜL 75/ Müller, E.P. und Papendieck, G.: Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins.- Z. geol. Wiss., 3, S. 167-196, Berlin, 1975.
- /PEA 91/ Pearson, F.J. et al.: Applied Isotope Hydrogeology – a Case Study in Northern Switzerland.- Studies in Environmental Science, 43, 458 S., Amsterdam, 1991.
- /PUC 64/ Puchelt, H.: Zur Geochemie der Grubenwässer im Ruhrgebiet.- Z. dt. geol. Ges., 116, S. 167-203, Hannover, 1964.
- /RIC 75/ Richter, W., Lillich, W.: Abriß der Hydrogeologie.- Schweizerbart, Stuttgart, 1975.
- /SCE 81/ Schenk, V.: Die Tiefenlage der Salzwasser-Süßwassergrenze in der südlichen Niederrheinischen Bucht.- Z. dt. geol. Ges., 132 (Symposium Süßwasser – Salzwasser), S. 613-621, Hannover, 1981.
- /SCU 81/ Schulz, M.: Über die Bewegung der Süß-/Salzwassergrenze im Hamburger Raum.- Z. dt. geol. Ges., 132 (Symposium Süßwasser – Salzwasser), S. 575-583, Hannover, 1981.
- /SEI 83/ Seiler, K.-P.: Tiefe Grundwässer und Faktoren, die das Absenkungsgeschehen in Tiefen Grundwässern beeinflussen.- Z. dt. geol. Ges., 124 (Grundwasserneubildung, Tiefe Grundwässer), S. 845-855, Hannover, 1983.
- /STO 00/ Stober, I. & Bucher, K.: Herkunft der Salinität in Tiefenwässern des Grundgebirges - unter besonderer Berücksichtigung der Kristallinwässer des Schwarzwaldes.- Grundwasser, 3/2000, S. 125-140, Berlin und Heidelberg, 2000.
- /STO 93/ Stober, I.: Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges.- Habilitationsschrift, Geowissenschaftliche Fakultät Uni Freiburg, 221 S., Freiburg i.Br., 1993.

- /UDL 77/ Udluft, P.: Nutzung von Tiefengrundwasser zur Trinkwasserversorgung.- Z. dt. geol. Ges., 128 (Grenzen der Grundwassernutzung), , S. 451-459, Hannover, 1977.
- /UDL 81/ Udluft, P.: Die Süß-Salzwassergrenze Süddeutschlands als Ausdruck der Grundwasserdynamik.- Z. dt. geol. Ges., 132 (Symposium Süßwasser – Salzwasser), S. 623-636, Hannover, 1981.
- /VOI 75a/ Voigt, H.-J.: Über die Rolle des Kationenaustausches bei der Bildung der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer.- Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 21 (9), S. 420-423, Berlin, 1975.
- /VOI 75b/ Voigt, H.-J.: Zur Dynamik der mineralisierten Schichtwässer im Nordteil der DDR.- Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 21 (4), S. 164-168, Berlin, 1975.
- /VOI 90/ Voigt, H.-J.: Hydrogeochemie – Eine Einführung in die Beschaffenheitsentwicklung des Grundwassers.- 310 S., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1990.
- /VOI 00/ Voigt, H.-J.: Persönliche Mitteilung, Cottbus, 05.10.2000.
- /VOI 01/ Voigt, H.-J.: Persönliche Mitteilung, Cottbus, 19.04.2001.
- /WED 95/ Wedewardt, M.: Hydrochemie und Genese der Tiefenwässer im Ruhrgebiet.- DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Band 39, Bochum, 1995.
- /ZÖT 74/ Zötl, J.G.: Karsthydrogeologie.- Springer-Verlag, Wien, New York, 1974.