

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	17 (2010), 1/2	S. 39-53	8 Abb., 1 Tab., 15 Lit.
------------------------------	---------	----------------	----------	-------------------------

Genetische Grundwassertypen der Binnenversalzung, ihre Klassifikation und Erscheinungsformen

Genetic groundwater types of inland water salinization, their classification and nature

GERHARD HOTZAN

1. Einleitung

Der Chemismus von Süß- und Salzwässern bildet sich in erster Linie im Ergebnis von Lösungs- und Fällungsreaktionen, Redox- und Ionenaustauschprozessen und den sich dabei einstellenden und gegenseitig bedingenden Gleichgewichtszuständen in Wechselwirkung zwischen der Sedimentmatrix und dem Grundwasser (GW) als Lösungsmittel heraus. Im Ergebnis dieser Prozesse entstehen spezifische genetische Grundwasserklassen, die aufgrund charakteristischer Merkmale voneinander unterschieden werden können. Zur Charakterisierung der genetischen Klassen werden sowohl die Lagepunkte der Grundwässer in hydrogeochemischen Diagrammen (hier VALJAŠKO-Diagramm, vgl. VALJAŠKO 1961), als auch die prozentualen Anteile der in der Lösung befindlichen hypothetischen Salze herangezogen. Der Schwerpunkt dieses Beitrages liegt auf der Charakterisierung der Geneseklassen salinärer und salinar beeinflusster Wässer.

Chlorid	> 250,0 mg/l
Sulfat	> 240,0 mg/l
Gesamtmineralisation	> 1000 mg TDS/l
Leitfähigkeit	> 2000 µS/cm

Für den Charakter der salinaren Wässer sind die Konzentrationen von Cl⁻, SO₄²⁻- und Na⁺-Ionen prägend. Ausgehend von der Geschmacksgrenze dieser Ionen wurden für Trinkwässer die nachfolgenden Grenzwerte im Rahmen der europäischen bzw. der nationalen Gesetzgebung festgelegt (vgl. Tab. 1).

„Salinar beeinflusste Wässer“ sind ihrem Chemismus nach Süßwässer, deren Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen unterhalb der jeweiligen Grenzwerte für salinare Wässer (s. Tab. 1) aber über dem geogenen Background der Wässer in den Grundwasserleitern des Süßwasserstockwerks liegen. Die in süßwasserführende Grundwasserleiter eingedrungenen salinaren Wässer werden von ihnen aureolenartig umgeben.

2. Salinare Wässer“ und „salinar beeinflusste Wässer“

Unter „salinaren Wässern“ versteht man im Sinne von GRUBE & WICHMANN (2000) diejenigen Grundwässer, die durch die nachfolgenden Eigenschaften charakterisiert sind:

3. Klassifizierung der salinaren Wässer

Hochmineralisierte salinare Wässer sind ursprünglich in dem unterhalb der unteroligozänen Rupelfolge befindlichen Salzwasserstockwerk verbreitet. Im Süßwasserstockwerk

Parameter	Grenzwert Trinkwasserverordnung von 2001	EU-Richtlinie von 11/1998 für Wässer für den menschlichen Gebrauch
Chlorid	250 mg/l	250 mg/l
Sulfat	240 mg/l	250 mg/l
Natrium	200 mg/l	200 mg/l
Gesamt-Leitfähigkeit bei 20° C	2500 µS/cm	2500 µS/cm

Tab. 1: Grenz- und Richtwerte für salinarrelevante Parameter in Trinkwasservorschriften

Tab. 1: Critical and approximate values of salinar relevant parameters in drinking water ordinance

treten sie nur in Ausnahmefällen auf. Sie werden dann in Abhängigkeit von ihrer regionalen Position und Genese als Meerwasserintrusion bzw. Binnenversalzung (GRUBE et al. 2000a) bezeichnet.

Der Chemismus der salinaren Wässer variiert in Abhängigkeit von den Wechselwirkungsprozessen zwischen dem Grundwasser und dem Sediment einerseits und den chemischen Reaktionen innerhalb der Lösung andererseits. Im Ergebnis von Lösungs- und Fällungsreaktionen, Redox- und Ionenaustauschprozessen und den sich dabei einstellenden und gegenseitig bedingenden Gleichgewichtszuständen erfolgt die „Entwicklung“ des Chemismus der Grundwässer im Allgemeinen und auch der salinaren Wässer im Besonderen (vgl. HERMSDORF 2010). Im Ergebnis dieser Prozesse bilden sich in Zeit und Raum spezifische genetische Grundwasserklassen heraus, die aufgrund charakteristischer Merkmale, die im Folgenden näher beschrieben werden, voneinander unterschieden werden können.

Die Nutzung des VALJAŠKO-Diagramms zur genetischen Klassifizierung salinarer Wässer ist nicht neu. Es wurde ursprünglich von VALJAŠKO (1961) zur Bewertung von Analysen aus dem Salzwasserstockwerk bei der Suche nach Kalisalzlagern entwickelt. Durch LEHMANN (1974) erfolgte auf der Grundlage dieses Diagramms die Bewertung von Wasseranalysen aus den paläozoischen und mesozoischen Aquiferen der Norddeutsch-Polnischen Senke. RECHLIN (1997) sowie GRUBE et al. (2000b) beschäftigten sich mit Vorkommen salinarer Wässer im Niveau des Süßwasserstockwerks und ermittelten die Lagepunkte dieser Wässer im VALJAŠKO-Diagramm. Ebenso nutzte RECHLIN (2008) das VALJAŠKO-Diagramm zur Darstellung der Ergebnisse von Wasseranalysen und klassifizierte auf dieser Grundlage Schichtwässer des Salzwasserstockwerks.

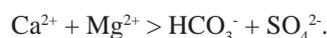
In diesem Beitrag erfolgt die Klassifizierung der salinaren Wässer auf genetischer Grundlage unter Berücksichtigung ihres hydrochemischen Entwicklungsgrades. Die Geneseklassen der Wässer der Salz- und Süßwasserstockwerke werden in einem einheitlichen Schema zusammengefasst, aus dem auch ihre genetischen Beziehungen untereinander sowie die Richtungen ihrer weiteren „Entwicklung“ deutlich werden. Die Darstellung baut auf den Erkenntnissen von VOIGT (1972, 1990), LEHMANN (1974), RECHLIN (1997), GRUBE et al. (2000b) sowie RECHLIN (2008) auf. Als Hilfsmittel bei der Klassifizierung dient die Bestimmung von Lagepunkten dieser Wässer im VALJAŠKO-Diagramm sowie die Ermittlung der prozentualen Anteile der in der Lösung befindlichen hypothetischen Salze. Die Methodik der Berechnung der Lagepunkte der Wasseranalysen wurde in RECHLIN (1997) ausführlich beschrieben, so dass an dieser Stelle darauf nicht weiter eingegangen wird. Für die Ermittlung der Lagepunkte der Wasseranalysen sowie die Berechnung der in der Lösung befindlichen prozentualen Anteile der hypothetischen Salze kann die Software GEBAH (RECHLIN 2010) genutzt werden. Abbildung 1 zeigt das Gesamtschema der Geneseklassen der salinaren Wässer sowohl für das Salzwasser- als auch für das Süßwasserstockwerk.

4. Hydrogeochemische Charakteristik des Meerwassers

Die Ausgangsbasis für die genetische Entwicklungsreihe der salinaren Wässer bildet das Wasser der Ozeane („Meerwasser“). Dieses besitzt in der Regel eine durchschnittliche Mineralisation von ca. 35,0 g/l. Der Lösungsinhalt dieser Wässer wird von den Natrium- und Cl-Ionen dominiert. MATTHESS (1994) gibt als mittlere Zusammensetzung des Meerwassers die nachfolgenden Konzentrationen der Hauptionen an:

Na ⁺	-	10800 mg/kg
K ⁺	-	392 mg/kg
Ca ²⁺	-	411 mg/kg
Mg ²⁺	-	1290 mg/kg
Cl ⁻	-	19400 mg/kg

Die im Meerwasser gelösten Ionen erfüllen die Beziehung:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte des Meerwassers im Feld des Magnesium-Typs (vgl. LEHMANN 1974, RECHLIN 2008) (Abb. 2).

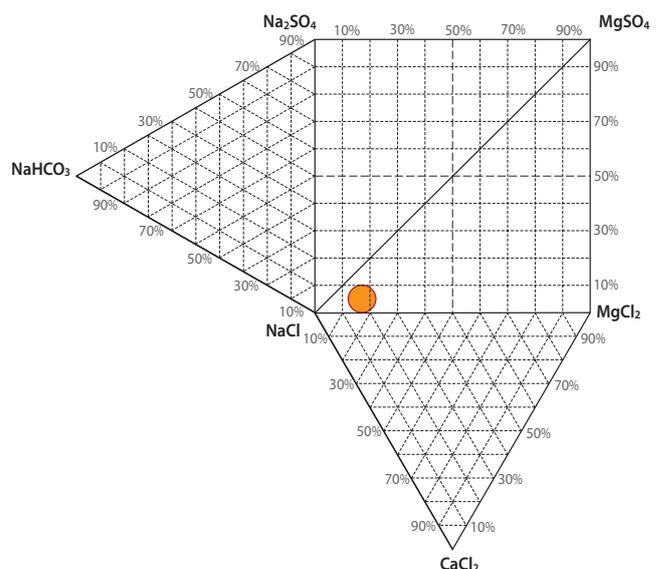


Abb. 2: Lagepunktbereich des Meerwassers im VALJAŠKO-Diagramm

Fig. 2: Point of position of sea water inside the VALJAŠKO-diagram

5. Geneseklassen salinarer Wässer im Niveau des Salzwasserstockwerks

Die hydrogeochemische Entwicklung des Meerwassers kann in zwei Richtungen verlaufen. Einerseits können die Meerwässer im Rahmen des Diageneseprozesses in die Sedimente eingeschlossen und dann zu salinaren Formationswässern („Sedimentationswässer“ nach VOIGT 1972) werden. Ande-

rerseits können Meerwässer in isolierten Meeresbecken eindunstet werden. In Abhängigkeit vom Eindunstungsgrad entstehen dabei Evaporite (Karbonate, Sulfate, Chloride) und saline Restlaugen („Reliktwässer“ VOIGT 1972), die in Abhängigkeit von der Porosität in den Schichtenfolgen migrieren können. Durch Infiltration meteorischer Wässer („Infiltrationswässer“ VOIGT 1972) bzw. die Migration geringer mineralisierter salinärer Formationswässer in die evaporitführenden Schichten können die Salze wieder in Lösung gehen. Im Ergebnis von Reaktionen zwischen dem Sediment und den in den Porenräumen eingeschlossenen Lösungen verändert sich die chemische Zusammensetzung der Lösungsinhalte.

Es wirken hauptsächlich drei Reaktionsgruppen, die unter den jeweiligen Standortbedingungen zur Einstellung von komplexen, d. h. sich gegenseitig bedingenden Gleichgewichtszuständen führen. Diese Reaktionsgruppen sind Lösung/Fällung, Oxidation/Reduktion sowie Ionenaustauschprozesse (insbesondere Alkalisierung/Erdalkalisierung HÖLTING 1996).

In Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen und den Reaktionen zwischen Sediment und Lösungsmittel können spezifische Geneseklassen unterschieden werden. Nachfolgend sollen die salinaren Grundwasserklassen näher charakterisiert werden:

5.1 Salinare Ablaugungswässer (H 311)

Die Grundwässer in den Aquiferen im Liegenden der unteroligozänen Rupelfolge nehmen am Wasserkreislauf nur noch eingeschränkt teil. Sie sind überwiegend durch statische, seltener durch dynamische Austauschbedingungen gekennzeichnet.

Der Mineralinhalt dieser Wässer stammt ursächlich aus den in der prärupelzeitlichen Schichtenfolge eingeschlossenen Evaporiten. Das Lösungsmittel hat seinen Ursprung in den in der Schichtenfolge migrierenden Sedimentationswässern. Der Chemismus der Wässer dieser Klasse wird hauptsächlich durch Lösungsreaktionen, z. T. auch durch Ionenaustauschprozesse geprägt:

Die Lösungsvorgänge betreffen in erster Linie die im Sediment befindlichen Salze wie Chloride, z. B. Halit (NaCl), Sylvin (KCl), Carnallit ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), Sulfate, wie z. B. Anhydrit (CaSO_4), Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), aber auch Karbonate wie Calcit (CaCO_3) und Siderit (FeCO_3). In Abhängigkeit von der Mineralisation der Ausgangslösungen und der Umgebungstemperatur sind die Wässer in der Lage, Salze bis zum Erreichen des jeweiligen Löslichkeitsproduktes zu lösen. Das Lösungs-/Fällungsgleichgewicht stellt sich dabei neu ein. Im Ergebnis dieser Prozesse erfolgt eine Anreicherung der Wässer mit Ca^{2+} -, Mg^{2+} -, Na^+ -, K^+ -, Cl^- -, SO_4^{2-} - und HCO_3^- -Ionen. In Abhängigkeit vom Mineralinhalt der jeweils durchströmten Sedimente überwiegen bei den Wässern dieses Typs in der Lösung die Na^+ - und Cl^- -Ionen (NaCl-betonte Wässer) bzw. die Ca^{2+} und SO_4^{2-} -Ionen (Gips-betonte Wässer). Durch die Lösung von Anhydrit aus dem Sediment sind die Konzentrationen an Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Ionen in der Lösung

so hoch, dass als hypothetisches Salz Anhydrit (CaSO_4) in einer Größenordnung $> 1\%$ vorliegt. Dieses ist das entscheidende Kriterium zur Abgrenzung der Klasse H 311.

In den Aquiferen herrschen ausschließlich anaerobe Bedingungen. Als Oxidationsmittel stehen Sulfat, Eisen- und Manganoxide, in Abhängigkeit von der Menge organischer Substanzen im Sediment gelöstes CO_2 sowie gelöstes N_2 zur Verfügung. Im Ergebnis von Reduktionsprozessen und der Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in diesen Wässern eine allmähliche Verringerung der SO_4^{2-} -Konzentration, aber auch eine Erhöhung der Fe^{2+} -, Mn^{2+} -, Methan- und Ammonium-Konzentrationen zu verzeichnen.

Das im Ergebnis der Sulfatreduktion entstehende CO_2 bewirkt über die Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes eine Anreicherung der Wässer mit Hydrogencarbonat- und Ca^{2+} -Ionen.

Für die Wässer des Typs H 311 gilt die Ionenbeziehung:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer im Feld des Sulfat-Typs (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

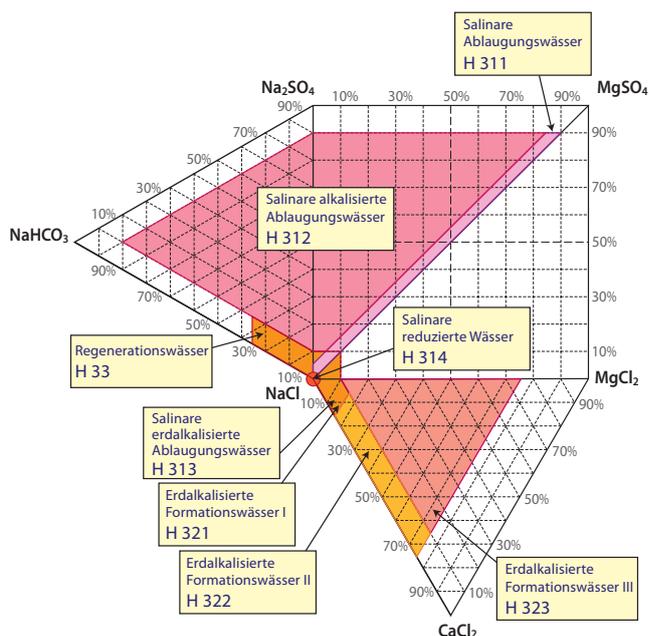


Abb. 3; Lagepunktbereiche der Geneseklassen salinärer Wässer im Niveau des Salzwasserstockwerks

Fig. 3: Point of position of geogenic classification of saltwater in the saltwater storey

5.2 Salinare alkalisierte Ablaugungswässer (H 312)

Das Lösungsmittel der Wässer dieser Geneseklasse hat ebenfalls seinen Ursprung in den in der Schichtenfolge migrierenden Sedimentationswässern. Der Mineralinhalt der Lösung ist ursächlich auf die im Sediment verteilten Eva-

porite zurückzuführen. Der Chemismus der Wässer dieses Typs wird hauptsächlich durch Lösungsreaktionen und Kationenaustauschprozesse geprägt.

Die Lösungsvorgänge betreffen in erster Linie die im Sediment befindlichen Salze wie Halit (NaCl) und Anhydrit (CaSO₄). Daneben finden zwischen der Lösung und dem Grundwasserleiter (GWL)-Substrat Kationenaustauschprozesse in Form einer Alkalisierung statt. Die Austauschplätze der GWL-Matrix sind in den Sedimenten mariner Genese mit Na⁺-Ionen besetzt. Im Ergebnis der Austauschprozesse werden die Ca²⁺-Ionen in der GWL-Matrix festgelegt und die Na⁺-Ionen freigesetzt. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Das Na/Cl-Verhältnis ist > 1,0. Die Wässer dieses Typs enthalten als hypothetisches Salz stets Na₂SO₄ > 1 %, bei hohen Calcium-Ausgangskonzentrationen auch NaHCO₃.

Im Ergebnis der Redoxreaktionen und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in diesen Wässern eine allmähliche Verringerung der Sulfat-Konzentration aber auch eine Erhöhung der Fe²⁺-, Mn²⁺-, Methan- und Ammonium-Konzentrationen zu verzeichnen.

Das im Ergebnis der Sulfatreduktion entstehende CO₂ bewirkt ebenfalls bei diesem Genesetyp über die Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes eine Anreicherung der Wässer mit Hydrogenkarbonat- und Erdalkali-Ionen. Bei einer hohen Kationenaustauschkapazität der Sedimentmatrix unterliegen letztere wiederum der Alkalisierung.

Für die Wässer der Geneseklasse H 312 gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern des Sulfat- bzw. Natrium-Typs (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

5.3 Salinare erdalkalisierte Ablaugungswässer (H 313)

Die Wässer der Geneseklasse H 313 haben ihren Ursprung ebenfalls in den in der Schichtenfolge migrierenden salinaren Formationswässern. Auch hier stammt der Mineralinhalt ursächlich aus den in der präurpeltzeitlichen Schichtenfolge enthaltenen Evaporiten. Der Chemismus der Wässer wird hauptsächlich durch Ionenaustauschprozesse aber auch Lösungsreaktionen geprägt.

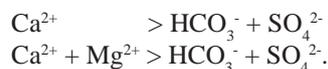
Bei der Migration der Sedimentationswässer durch marine karbonatführende Schichten finden zwischen der Lösung und dem GWL-Substrat Kationenaustauschprozesse in Form einer Dolomitisierung statt. Die mit Ca²⁺-Ionen besetzten Austauschplätze (z. B. Calcit) werden durch Mg²⁺-Ionen aus der Lösung ersetzt. Die Sedimentationswässer werden dadurch mit Ca²⁺-Ionen angereichert.

Bei marinen tonigen Sedimenten finden bei der Formierung der Sedimentationswässer zwischen der Lösung und dem GWL-Substrat Kationenaustauschprozesse in Form einer Erdalkalisierung statt. Die Austauschplätze der GWL-Matrix sind neben den Na⁺- auch mit Ca²⁺-Ionen besetzt. Im Ergebnis der bei der Diagenese stattfindenden Mineralbildungsprozesse werden die Mg²⁺- und K⁺-Ionen in der GWL-Matrix festgelegt und die Ca²⁺-Ionen in der Lösung angereichert. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Die Wässer dieses Typs enthalten als hypothetische Salze stets MgCl₂ bzw. CaCl₂.

Die Lösungsvorgänge betreffen hauptsächlich die Chloride, wie z. B. Halit (NaCl) und Sulfate, wie z. B. Anhydrit (CaSO₄). Im Ergebnis dieser Prozesse erfolgt eine Anreicherung der Wässer mit Ca²⁺-, Na⁺-, Cl⁻- und SO₄²⁻-Ionen. Dabei überwiegen in der Lösung die Na⁺- und Cl⁻-Ionen. Die Konzentrationen an Ca²⁺- und SO₄²⁻-Ionen sind so hoch, dass als hypothetisches Salz Anhydrit (CaSO₄) in einer Größenordnung > 1 % vorliegt.

Im Ergebnis von Reduktionsprozessen und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in den Wässern dieses Typs eine allmähliche Verringerung der Sulfat-Konzentration zu verzeichnen. Das durch die Sulfatreduktion entstehende CO₂ bewirkt bei diesem Genesetyp über die Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes ebenfalls eine Anreicherung der Wässer mit Hydrogenkarbonat- und Ca²⁺-Ionen.

Für die Wässer dieser Geneseklasse gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Magnesium- und Chlorid-Typen (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

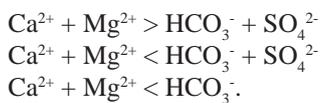
5.4 Salinare reduzierte Wässer (Typ H 314)

Die Wässer dieser Geneseklasse sind ein Sonderfall und stellen das letzte Stadium der Entwicklungsreihe der salinaren Wässer dar. Ausgangspunkt der genetischen Entwicklungsreihe dieser Wässer sind die in den präurpeltzeitlichen Aquiferen verbreiteten salinaren Ablaugungswässer des Typs H 311 bzw. die salinaren Formationswässer der Typen H 321- H 323 (s. ff.). Unter statischen hydrodynamischen Bedingungen wird die weitere Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit hauptsächlich durch Redox- und Fällungsreaktionen geprägt.

In den tiefen bedeckten Aquiferen herrschen ausschließlich anaerobe Bedingungen. Als Oxidationsmittel stehen SO₄²⁻-Ionen sowie als Reaktionsprodukt des Sulfatabbaus gelöstes CO₂ zur Verfügung. Diese dienen als Elektronenakzeptoren und werden im Rahmen der Redoxreaktionen zu Sulfid und Methan reduziert.

Schwermetall-Ionen werden als Sulfide ausgefällt. Durch die Störung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes werden Erdalkali-Ionen in Form von Karbonaten ausgeschieden. Im Ergebnis der oben beschriebenen Reaktionen erfolgt eine allmähliche Abreicherung der Ca^{2+} -, Mg^{2+} -, SO_4^{2-} - und HCO_3^- -Ionen in der Lösung.

Der Grundwasserchemismus dieses Genesetyps wird hauptsächlich durch die Na^+ - und Cl^- -Ionen geprägt (> 95% der Gesamtmineralisation), deren Konzentration in Abhängigkeit von der Teufe und den dort herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen bis > 300 g/l erreichen kann. Das Na/Cl-Verhältnis dieser Wässer beträgt ca. 1,0. Die Konzentrationen der anderen Ionen sind in Abhängigkeit vom Entwicklungsgrad der Wässer verschwindend gering. Für diese Wässer gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich diese Wässer am NaCl-Pol (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

5.5 Erdalkalisierte Formationswässer I (H 321)

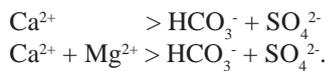
Die Wässer dieser Geneseklasse sind genetisch auf prä- und paläozoische saline Formationswässer zurückzuführen, d. h. auf Wässer aus Keuper, Jura, Kreide und Tertiär. Die Meereswässer des Sedimentationsraumes sind durch ein niedriges Eindunstungsstadium charakterisiert (vgl. LEHMANN 1974). Eine Halit-Ausfällung hat noch nicht stattgefunden. Der Grundwasserchemismus wird hauptsächlich durch Ionenaustauschprozesse und Redoxreaktionen geprägt.

Bei der Migration der Sedimentationswässer durch karbonatführende und tonige Schichten finden zwischen der Lösung und dem GWL-Substrat Kationenaustauschprozesse in der bereits bei der Klasse H 313 beschriebenen Art und Weise statt. Die Sedimentationswässer werden dadurch mit Ca^{2+} -Ionen angereichert, während Mg^{2+} - und K^+ -Ionen der Lösung entzogen werden. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Die Wässer dieses Typs enthalten als hypothetische Salze MgSO_4 (< 1 %) und MgCl_2 bzw. CaCl_2 , im Gegensatz zur Klasse H 313 aber CaSO_4 < 1 %.

Im Ergebnis der Reduktionsprozesse und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in diesen Wässern eine Verringerung der Sulfat-Konzentration aber auch eine Erhöhung der Fe^{2+} -, Mn^{2+} -, CH_4 - und NH_4^+ -Konzentrationen zu verzeichnen.

Das im Ergebnis der Sulfatreduktion entstehende CO_2 bewirkt bei dieser Geneseklasse über die Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes ebenfalls eine Anreicherung der Wässer mit Hydrogenkarbonat- und Ca^{2+} -Ionen.

Für die Wässer dieser Geneseklasse gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Magnesium- und Chlorid-Typen (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

5.6 Erdalkalisierte Formationswässer II (H 322)

Die Wässer dieses Genesetyps sind weitestgehend durch statische hydrodynamische Bedingungen charakterisiert und haben ihren Ursprung in salinaren Restlaugen. Es handelt sich dabei um Wässer in den Aquiferen des Rotliegenden, Buntsandsteins und Muschelkalks. Die Meereswässer des ursprünglichen Sedimentationsraumes sind durch ein höheres Eindunstungsstadium charakterisiert (vgl. LEHMANN 1974). Die Halitausfällung ist abgeschlossen, die Wässer befinden sich im Stadium der Magnesiumsulfatausfällung. Der Grundwasserchemismus wird neben der Fällung hauptsächlich durch Ionenaustauschprozesse und Redoxreaktionen geprägt.

Die Restlaugen werden beim Kontakt mit den Sedimenten der Aquifere im Ergebnis von Ionenaustauschprozessen mit Ca^{2+} -Ionen angereichert, während Mg^{2+} - und K^+ -Ionen der Lösung entzogen werden. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Als hypothetisches Salz enthalten diese Wässer stets CaCl_2 .

Im Ergebnis der Reduktionsprozesse und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in diesen Wässern vorrangig eine Verringerung der Sulfat-Konzentration zu verzeichnen. Über die sich anschließende Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes kommt es zur Anreicherung der Wässer mit Hydrogenkarbonat- und Ca^{2+} -Ionen.

Für diese Wässer gilt die Ionenbeziehung:



Die Lagepunkte der Wässer dieser Geneseklasse befinden sich im Feld des Chlorid-Typs (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

5.7 Erdalkalisierte Formationswässer III (H 323)

Auch diese Wässer sind durch statische hydrodynamische Bedingungen charakterisiert und haben ihren Ursprung in zechsteinzeitlichen salinaren Restlaugen. Sie sind ursächlich an die zechsteinzeitliche Schichtenfolge gebunden. Die Meereswässer des Sedimentationsraumes sind durch ein hohes Eindunstungsstadium charakterisiert (vgl. LEHMANN 1974). Die Halitausfällung ist abgeschlossen, die Wässer befinden sich im Stadium der Magnesiumsulfat- bzw. Sylvinat-Ausfällung. Der Grundwasserchemismus wird neben der

Fällung hauptsächlich durch Ionenaustauschprozesse und Redoxreaktionen geprägt.

Auch bei dieser Geneseklasse werden die Restlaugen beim Kontakt mit den Sedimenten der Aquifere im Ergebnis von Ionenaustauschprozessen mit Ca^{2+} -Ionen angereichert, während Mg^{2+} - und K^{+} -Ionen der Lösung entzogen werden. Jedoch sind die Migrationswege relativ kurz, so dass sich noch relativ viele Mg^{2+} -Ionen in der Lösung befinden. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Als hypothetische Salze enthalten diese Wässer deshalb stets CaCl_2 und MgCl_2 .

Die Reduktionsprozesse und die Neueinstellung der Redox- und Lösungsgleichgewichte verlaufen bei dieser Geneseklasse in der bereits bei H 322 beschriebenen Art und Weise.

Für diese Wässer gilt die Ionenbeziehung:



Die Lagepunkte dieser Wässer befinden sich im Feld des Chlorid-Typs (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

5.8 Salinare Regenerationswässer (H 33)

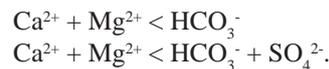
Der Prozess der Regeneration stellt das Eindringen von geringmineralisierten, meteorischen Infiltrationswässern (z. B. Neubildungswässer) in salzwassererfüllte Aquifere dar. Der Porenraum der Grundwasserleiter ist ursächlich mit salinaren Formationswässern erfüllt. Die Austauschplätze der Sedimentmatrix sind überwiegend mit Na^{+} -Ionen besetzt. Es besteht ein Austausch-Gleichgewichtszustand. Das Eindringen von Neubildungswässern bis in das Niveau der präurzeitlichen Schichten ist an geologisch-strukturelle (z. B. glazigene Rinnen, Stauchungsgebiete, tektonische Störungszonen) und hydrodynamische Voraussetzungen (Speisungsgebiete mit abwärts gerichtetem Gefällegradienten) gebunden, durch welche die Migrationsbahnen für die Süßwässer geschaffen werden.

Beim Kontakt der salinaren Formationswässer mit geringmineralisierten Infiltrationswässern wird die weitere Entwicklung des Grundwasserchemismus hauptsächlich durch Ionenaustauschprozesse geprägt. Maßgeblich sind Kationenaustauschreaktionen in Form einer Alkalisierung im Sinne von HÖLTING (1996). Dabei werden die in der Lösung befindlichen Erdalkali-Ionen gegen die an der Sedimentmatrix gebundenen Alkali-Ionen ausgetauscht. Im Ergebnis dieser Prozesse erfolgt eine Anreicherung der Wässer mit Na^{+} -Ionen bei einer gleichzeitigen Verringerung der Konzentrationen der Erdalkali-Ionen. Das Austausch-Gleichgewicht stellt sich neu ein. Das Na/Cl-Verhältnis dieser Wässer ist $> 1,0$. Als hypothetische Salze enthalten sie in Abhängigkeit von den Sulfat- und Hydrogenkarbonatkonzentrationen Na_2SO_4 und NaHCO_3 .

In den Aquiferen herrschen anaerobe Bedingungen. Der wichtigste Elektronenakzeptor ist das SO_4^{2-} -Ion. Im Ergeb-

nis der Reduktionsprozesse und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in diesen Wässern eine Verringerung der Sulfatkonzentration bei gleichzeitiger Zunahme der Hydrogenkarbonatkonzentration zu verzeichnen. Letzteres führt wiederum zu einer Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes.

Für die Wässer dieser Geneseklasse gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Sulfat- und Natrium-Typen (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 3).

6. Salinare Wässer im Niveau der Süßwasserstockwerks

6.1 Bedingungen für das Auftreten von salinaren Wässern in süßwasserführenden Grundwasserleitern

Versalzungsprozesse in süßwasserführenden Grundwasserleitern sind an das gleichzeitige Auftreten stofflicher, geologisch-struktureller und hydrodynamischer Voraussetzungen geknüpft (HERMSDORF & HOTZAN 2006). Wird eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, können am konkreten Standort diese Prozesse nicht erwartet werden. Im Detail sollen nun diese Bedingungen näher erläutert werden:

6.1.1 Stoffliche Voraussetzungen

Im Untergrund der Norddeutsch-Polnischen Senke lagern mächtige Schichten salinärer Gesteine (Evaporite). Sie entstanden durch Eindampfung des Meerwassers in isolierten Beckenbereichen im Perm (Zechstein) sowie in der Trias (Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper). Die mehrere hundert Meter mächtigen Schichten bestehen aus einer rhythmischen Wechsellagerung von Tonsteinen, Karbonaten, Sulfaten (Anhydrit) und Chloriden (Stein- und Kali-Salze). Unter dem Druck der hangenden Deckschichten reagieren die Salzgesteine plastisch und können im Bereich von tektonischen Schwächezonen in die überlagernden jüngeren Schichten eindringen. Durch die hier verbreiteten Formationswässer sowie meteorische Infiltrationswässer erfolgt ihre Lösung. Die Wässer werden mit den Ionen der Salzgesteine angereichert (Ablaugungswässer).

Ein weiterer Typ von salinaren Wässern sind die Sedimentationswässer (Diagenesewässer). Der Ursprung dieser Wasser ist im Meerwasser der meso- und känozoischen Ozeane zu suchen, d. h. es handelt sich hierbei um synsedimentäre Formationswässer, die in den entsprechenden Schichtenfolgen eingeschlossen sind.

Im Bereich der Norddeutsch-Polnischen Senke weisen die salzwasserführenden Aquifere eine Mächtigkeit von über 10 000 m auf. Die süßwasserführende Schichtenfolge besitzt dagegen nur eine Mächtigkeit von ca. 150,0-300,0 m. Der unteroligozäne Rupelton trennt als bedeutender regionaler Grundwasserstauer süß- und salzwasserführende Schichtenfolgen.

6.1.2 Geologisch-strukturelle Voraussetzungen

Der unteroligozäne Rupelton trennt als regionaler Grundwasserstauer das Süßwasser- vom Salzwasserstockwerk. Er weist durchschnittliche Mächtigkeiten von > 60 m auf und ist durch k_f -Werte von 10^{-9} - 10^{-10} m/s charakterisiert. Diese Schichtenfolge wurde lokal im Ergebnis endogener bzw. exogener Prozesse perforiert. Damit werden wasserwegsame Bereiche geschaffen, die bei Vorliegen weiterer stofflicher und hydrodynamischer Voraussetzungen den Übertritt von Wässern der beiden oben genannten Stockwerke ermöglichen. Als Beispiele für derartige Prozesse können genannt werden:

Salinartektonik

Unter regionalen Stresszuständen sowie dem lithostatischen Druck der hangenden Gesteinsserien des meso-/känozoischen Deckgebirges wird in den zechsteinzeitlichen und mesozoischen Salzgesteinen eine Fließbewegung initiiert, die zum Aufstieg dieser Gesteine in die überlagernden jüngeren Gesteinsserien führt. Die Salzgesteinskörper können im Extremfall auch die Schichten der Rupel-Folge durchdringen und bis an die Erdoberfläche gelangen (z. B. Sperenberg). Häufig werden aber nur die überlagernden mesozoischen und känozoischen Schichten aufgebeult und bis in das Niveau des Süßwasserstockwerks gehoben.

Tektonische Störungen

Tiefreichende tektonische Störungszonen durchziehen das mesozoische Deckgebirge. Sie bilden die Ausgleichsbahnen für die sich im Gebirge infolge der Kontinentaldrift aufbauenden Kräfte. Im Ergebnis von Stresszuständen (Aufpressung) können in diesen Bereichen Schollen salinärer Gesteine aus dem tiefen Untergrund bis in das Niveau des Süßwasserstockwerks verfrachtet werden (z. B. Fürstenwalde-Gubener Störungszone/Struktur Streitberg).

Glazigene Rinnen und Exarationszonen

Die vorrückenden pleistozänen Gletscher sowie ihre Schmelzwässer hatten eine intensive erodierende Wirkung auf die Locker- und Festgesteine des Untergrundes. In Bereichen, in denen die Exarationsprozesse mit hoher Intensität abliefen, wurde die gesamte känozoische Schichtenfolge einschließlich der Rupelschichten abgetragen.

In den pleistozänen Rinnen- und Wannen-Strukturen wurden anschließend rollige und bindige Ablagerungen sedimentiert. Über so geschaffene wasserwegsame Bereiche kann eine Kommunikation zwischen dem Salz- und den Süßwasserstockwerk erfolgen.

Glazigene Störungen

Unter dem Druck der mächtigen pleistozänen Gletscher wurden unter periglaziären Bedingungen riesige Schollen gefrorener Lockergesteine aus dem ursprünglichen Schichtenverband gerissen, steil aufgerichtet und deformiert wieder abgelagert. Die glazigenen Deformationen können sowohl die pleistozäne, als auch die känozoische Schichtenfolge bis in das Niveau der Rupel-Folge umfassen (z. B. Bad Freienwalde). In den glazigen gestörten Schichten bestehen vielfältige Migrationsbahnen, die den Austausch zwischen dem Salz- und dem Süßwasserstockwerk ermöglichen.

6.1.3 Hydrodynamische Voraussetzungen

Ein weiteres wesentliches Kriterium für das Auftreten salinärer Wässer bildet das Verhältnis der Druckpotentiale des Süß- und Salzwasserstockwerkes.

Das Süßwasserstockwerk ist in der Regel durch dynamische Verhältnisse charakterisiert. Hier werden in Abhängigkeit von der Grundwasserdynamik und der jeweiligen Neubildungsrate Speisungs-, Transit- und Entlastungsgebiete unterschieden. Das Druckpotential ist in den Speisungsgebieten am Höchsten und in den Entlastungsgebieten am Geringsten.

Das Salzwasserstockwerk dagegen ist durch hydrostatische Verhältnisse gekennzeichnet. Die jeweilige Standrohrspiegelhöhe wird darüber hinaus durch die Dichte der Salzwässer beeinflusst.

In Bereichen, in denen das Druckpotential des Süßwasserstockwerks größer als das hydrostatische Druckpotential des Salzwasserstockwerks ist (z. B. in den Speisungsgebieten), kann es bei Vorliegen geologisch-struktureller Voraussetzungen zu Aufsüßungen (Regeneration) in den salzwasserführenden Aquiferen kommen.

In den Entlastungsgebieten ist das Druckpotential des Süßwasserstockwerks häufig geringer als das des Salzwasserstockwerks. Diese Zonen sind bei Vorliegen geologisch-struktureller Voraussetzungen prädestiniert für das Aufsteigen salinärer Tiefenwässer (Intrusionen).

Unter Berücksichtigung der prognostizierten Klimaentwicklung im Land Brandenburg (vgl. PIK-Studie, GERSTENGARBE et al. 2003) ist mit einer deutlichen Verringerung der Grundwasserneubildungsrate in den nächsten 50 Jahren zu rechnen, die auch eine Reduzierung des Druckpotentials des Süßwasserstockwerks zur Folge hat. Infolgedessen ist ein verstärktes Auftreten von geogenen Versalzungen in den pleistozänen Grundwasserleitern zu erwarten.

Nicht zu unterschätzen ist die hydraulische Wirkung von Wassergewinnungsanlagen, die Grundwässer aus tiefen bedeckten Grundwasserleitern fördern. Bei eingeschränkten Austauschverhältnissen sind diese Wasserfassungen von Speisungsprozessen aus der Grundwasserneubildung abgekoppelt. Die Verminderung des Druckpotentials im Süßwasserstockwerk kann dann zur Aktivierung einer Liegendspei-

sung führen, im Extremfall auch zur Salzwasserintrusion in die Brunnen der Wasserfassung.

6.2 Klassen salinärer Wässer im Niveau des Süßwasserstockwerks

Unter einer salinaren Intrusion versteht man den Prozess des Eindringens von hochmineralisierten Wässern des Salzwasserstockwerks in süßwasserführende Grundwasserleiter bei Vorliegen der oben genannten Bedingungen. Die beim Kontakt der salinaren Tiefenwässer mit den in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befindlichen Grundwässern des Süßwasserstockwerks ablaufenden hydrochemischen Reaktionen sowie die dabei entstehenden Geneseklassen sollen nachfolgend näher betrachtet werden:

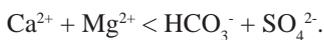
6.2.1 Salinare Ablaugungswässer (I 311)

Beim Übertritt salinärer Ablaugungswässer des Typs H 311 in süßwasserführende Grundwasserleiter haben Verdünnungseffekte bei der Mischung der mineralarmen Süßwässer und der hochmineralisierten salinaren Wässer die größte Bedeutung. Die Konzentrationen der Wässer des Genesetyps I 311 sind im Vergleich zum im Salzwasserstockwerk verbreiteten Genesetyp H 311 um eine Zehnerpotenz geringer.

Aufgrund der Belegung der Austauschplätze der Sedimentmatrix mit Ca^{2+} -Ionen in den pleistozänen Sedimenten des Süßwasserstockwerks (VOIGT 1990) finden insbesondere bei den CaSO_4 -betonten Wässern keine Austauschreaktionen statt. Die Sulfatreduktion erfolgt zwar, jedoch verbleiben aufgrund der hohen Ausgangskonzentration noch hohe Sulfatgehalte im Grundwasser.

Das Na/Cl-Verhältnis liegt bei ca. 1,0. Die Wässer dieses Typs enthalten als hypothetisches Salz stets $\text{CaSO}_4 > 1\%$.

Für die Wässer des Typs I 311 gilt die Ionenbeziehung:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer im Feld des Sulfat-Typs (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 4).

6.2.2 Salinare alkalisierte Wässer (I 312)

Zur Herausbildung dieser Geneseklasse kommt es nach der Intrusion von salinaren Ablaugungswässern bzw. salinaren Formationswässern in süßwasserführende Grundwasserleiter ursächlich mariner Genese bei gleichzeitig geringer Intensität der Stoffnachlieferung, die die Ausbildung eines eigenständigen Salzwasserstromes verhindert. Die sich dabei vollziehenden Prozesse sind als Regeneration (Aufsüßung) aufzufassen.

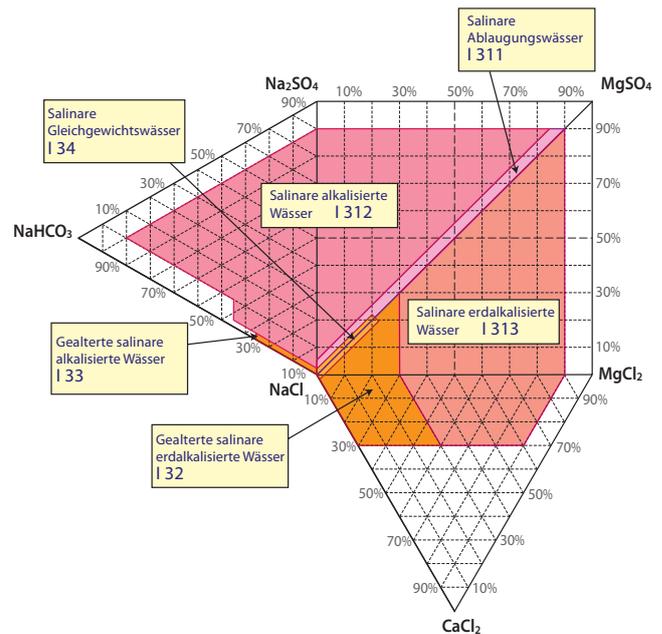
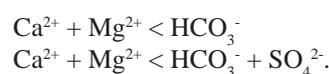


Abb. 4: Lagepunktbereiche der Geneseklassen salinärer Wässer im Niveau des Süßwasserstockwerks
Fig. 4: Point of position of geogenic classification of fresh water in the fresh water storey

Bei den Wässern dieser Klasse sind neben den Verdünnungseffekten bei der Mischung von mineralarmen Süßwässern und hochmineralisierten salinaren Wässern die Kationenaustauschreaktionen bei der weiteren Ausprägung des Grundwasserchemismus von Bedeutung. Letztere finden zwischen der Lösung und dem GWL-Substrat in Form einer Alkalisierung statt. Voraussetzung ist die Besetzung der Austauschplätze der GWL-Matrix mit Na^+ -Ionen (z. B. marin-brackische Sedimente des Miozäns). Im Ergebnis der Austauschreaktionen werden die in der Lösung befindlichen Ca^{2+} -Ionen in der GWL-Matrix festgelegt und die Na^+ -Ionen freigesetzt. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Das Na/Cl-Verhältnis ist $> 1,0$. Die Wässer dieser Geneseklasse enthalten als hypothetische Salze Na_2SO_4 sowie NaHCO_3 .

Im Ergebnis von Reduktionsprozessen und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist in diesen Wässern eine allmähliche Verringerung der Sulfat-Konzentration bei gleichzeitiger Erhöhung der Hydrogenkarbonat-Konzentrationen zu verzeichnen. Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht stellt sich neu ein.

Für die Wässer der Geneseklasse I 312 gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Natrium- und Sulfat-Typen (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 4).

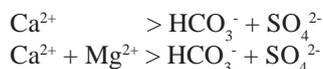
6.2.3 Salinare erdalkalisierte Wässer (I 313)

Ausgangspunkt der Entwicklungsreihe der Wässer dieser Genese Klasse sind die NaCl-betonten salinaren Ablaugungswässer H 311 und H 313 bzw. die salinaren Formationswässer der Typen H 321 - H 323. Zur Herausbildung von Wässern dieser Genese Klasse kommt es bei einer Intrusion in pleistozäne süßwasserführende Grundwasserleiter. Die Entwicklung des Grundwasserchemismus wird dabei hauptsächlich durch Verdünnungs- und Ionenaustauschprozesse (Erdalkalisierung) geprägt. Die Wässer dieser Genese Klasse sind typisch für aktive Aufstiegsbahnen salinärer Wässer (salinare Intrusion).

Voraussetzung für die Kationenaustauschprozesse ist die Besetzung der Austauschplätze der GWL-Matrix mit Ca^{2+} -Ionen, die für die pleistozänen Grundwasserleiter typisch ist. Im Ergebnis der Austauschreaktionen werden die Na^+ -Ionen aus der Lösung in der GWL-Matrix festgelegt und die Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen freigesetzt. Das Austauschgleichgewicht stellt sich neu ein. Das Na/Cl-Verhältnis ist $< 1,0$. Die Wässer dieses Typs enthalten als hypothetische Salze MgSO_4 und MgCl_2 , aber auch $\text{CaSO}_4 > 1\%$ und CaCl_2 .

Im Ergebnis von Reduktionsprozessen und einer Neueinstellung des Redoxgleichgewichtes ist auch in diesen Wässern eine allmähliche Verringerung der Sulfat-Konzentration bei gleichzeitiger Erhöhung der Hydrogenkarbonat-Konzentration zu verzeichnen. Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht stellt sich neu ein.

Für diese Wässer gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Magnesium- und Chlorid-Typen (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 4).

6.2.4 Gealterte salinare erdalkalisierte Wässer (I 32)

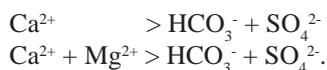
Die Wässer dieser Genese Klasse bilden die Fortsetzung der Entwicklungsreihe der intrusiven salinaren Wässer. Ausgehend von den noch sulfatführenden erdalkalisierten Wässern der Genese Klasse I 313 ($\text{CaSO}_4 > 1\%$) wird die weitere Entwicklung des Grundwasserchemismus und somit ihre Alterung hauptsächlich durch Reduktionsprozesse geprägt. Letztere beinhalten in erster Linie die Reduktion des Sulfat-Schwefels zu Sulfid-Schwefel.

Im Ergebnis dieser Reaktionen erfolgt eine Abreicherung der Sulfat-Konzentration im Grundwasser, die bis zum völligen Verschwinden des Sulfats führen kann. Die Redox- und Lösungs-Gleichgewichte stellen sich neu ein.

Wie bei den Wässern der Klasse I 313 ist auch hier das Na/Cl-Verhältnis $< 1,0$. Diese Wässer enthalten in Abhängigkeit vom Entwicklungsgrad als hypothetische Salze stets

MgCl_2 und bei höherem Entwicklungsgrad, d. h. intensivem Kationenaustausch, auch CaCl_2 .

Für die Wässer gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Magnesium- und Chlorid-Typen im Umfeld des NaCl-Pols (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 4).

6.2.5 Gealterte salinare alkalisierte Wässer/salinare Regenerationswässer (I 33)

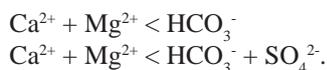
Mit den Wässern dieser Genese Klasse wird die Entwicklungsreihe der salinaren Regenerationswässer fortgesetzt. Ausgehend von den noch sulfatführenden alkalisierten Wässern der Klasse I 312 wird die weitere Entwicklung des Grundwasserchemismus und somit der Alterungsprozess hauptsächlich durch Reduktionsprozesse geprägt. Letztere beinhalten, wie schon bei der Klasse I 32 die Reduktion des Sulfat-Schwefels zu Sulfid-Schwefel.

Im Ergebnis dieser Reaktionen erfolgt auch bei den Wässern dieser Klasse eine Abreicherung der Sulfat-Konzentration, die bis zum völligen Verschwinden des Sulfats führen kann. Das Redoxgleichgewicht stellt sich neu ein.

Neben der Verringerung der Sulfatkonzentration ist in diesen Wässern im Ergebnis der Freisetzung von CO_2 eine gleichzeitige Zunahme der Hydrogenkarbonatkonzentration zu verzeichnen. Letzteres führt wiederum zu einer Neueinstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes.

Das Na/Cl-Verhältnis dieser Wässer ist $> 1,0$. Als hypothetische Salze enthalten sie in Abhängigkeit von den Sulfat- und Hydrogenkarbonatkonzentrationen Na_2SO_4 und NaHCO_3 .

Für diese Wässer gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer in den Feldern der Sulfat- und Natrium-Typen (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 4).

Salinare Wässer der Klasse I 33 sind auch als Regenerationswässer im Kontaktbereich von statischen Süß- zu Salzwässern anzutreffen. Insbesondere die salinaren Wässer der Klassen I 313 und I 32 werden aureolenartig von den Wässern der Klasse I 33 umgeben (siehe Kap. 7).

6.2.6 Salinare Gleichgewichtswässer (I 34)

Bei diesen Wässern wird die Ausprägung des Grundwasserchemismus neben der Verdünnung überwiegend durch

Ionenaustauschprozesse bestimmt. Sie werden in Bereichen aktiver hydraulischer Beeinflussung, d. h. insbesondere im Umfeld von Brunnen beobachtet. Durch mehrfache Wechsel von salinärer Intrusion und Regeneration und der damit in Zusammenhang stehenden Erdalkalisierung und Alkalisierung befindet sich das Austauschgleichgewicht der Sedimentmatrix in einem labilen Gleichgewichtszustand. Das Na/Cl-Verhältnis dieser Wässer ist $\approx 1,0$. Für die Wässer gelten die Ionenbeziehungen:



Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer im Umfeld der Diagonalen, die den Magnesium-vom Sulfat-Typ trennt. Mit zunehmender NaCl-Konzentration nähern sich die Lagepunkte dem NaCl-Pol (vgl. RECHLIN 1997) (Abb. 4).

7. Der Übergangsbereich zwischen Salz- und Süßwässern

Zwischen den in den Grundwasserleitern verbreiteten Süßwässern und den intrusiv eingedrungenen salinaren Wässern existiert kein scharf abgrenzbarer Kontaktbereich. Vielmehr kommt es durch Mischungs- und Diffusionsprozesse in Abhängigkeit vom Konzentrationsgefälle, der Austauschkapazität der GWL-Matrix sowie der lithologischen Charakteristik des Grundwasserleiters zur Ausbildung eines mehr oder weniger mächtigen Übergangsbereiches. In diesem sind salinar beeinflusste Süßwässer anzutreffen, die in Abhängigkeit von den ursächlich dort verbreiteten Süßwässern spezifische genetische Grundwasserklassen bilden.

7.1 Salinar beeinflusste Wässer

sind ihrem Chemismus nach Süßwässer, welche die in süßwasserführende Grundwasserleiter eingedrungenen salinaren Wässer aureolenartig umgeben bzw. ausgehend von salinaren Wässern Fahnen bilden. Ihre Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen liegen unterhalb der jeweiligen Grenzwerte der Trinkwasserverordnung, aber über dem geogenen Background der Süßwässer. Die Formierung des Grundwasserchemismus ist auf Verdünnungs- und Diffusionsprozesse im Grenzbereich von geringmineralisierten Süßwässern und hochmineralisierten Salzwässern zurückzuführen.

Die salinare Beeinflussung zeigt sich, in Abhängigkeit vom Charakter der intrusiv eingedrungenen salinaren Wässer, in erhöhten Chlorid- und /oder Sulfat-Konzentrationen. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand übersteigt die Summe der in der Lösung befindlichen Natrium- und Kaliumchloride dabei 15 % des Gesamtsalzgehaltes. Als wichtigste können die nachfolgend aufgeführten Geneseklassen unterschieden werden (Abb. 5):

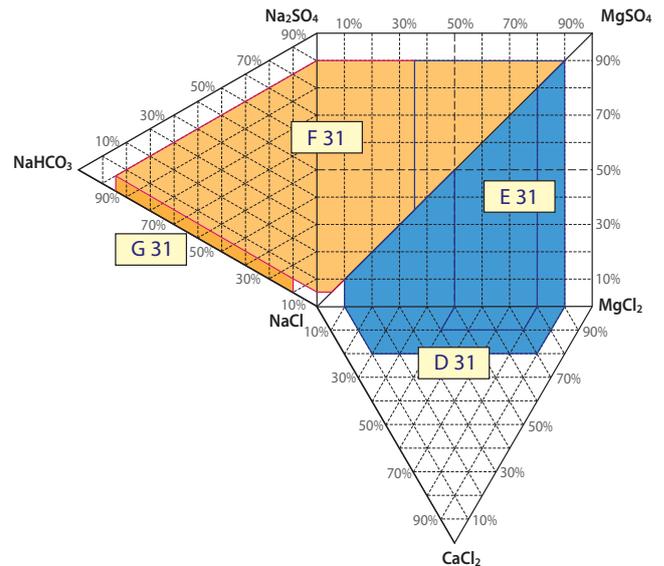


Abb. 5: Lagepunktbereiche der Geneseklassen salinar beeinflusster Wässer im VALJAŠKO-Diagramm

Fig. 5: Point of position of geogenic classification of salinar influenced waters inside the VALJAŠKO-diagram

7.1.2 Salinar beeinflusste statische Grundwässer (G 31)

sind Grundwässer, die im Übergangsbereich zwischen statischen Süßwässern und Chlorid-betonten salinaren Wässern angetroffen werden. Im Genesediagramm befinden sich die Lagepunkte dieser Wässer im Feld der Natrium-Typen (vgl. RECHLIN 1997). Mit zunehmender NaCl-Konzentration verschiebt sich der Lagepunkt in Richtung des NaCl-Poles.

7.1.3 Salinar beeinflusste alte Neubildungswässer (F 31)

sind Grundwässer, die für den Übergangsbereich von alten Neubildungswässern und Chlorid-betonten salinaren Wässern charakteristisch sind. Daneben entstehen sie aber auch als Mischreihe von statischen Süßwässern und sulfatführenden salinaren Wässern. Im Genesediagramm befinden sich ihre Lagepunkte in Abhängigkeit von der Sulfat-Konzentration in den Feldern der Natrium- und Sulfat-Typen (vgl. RECHLIN 1997). Mit wachsender NaCl-Konzentration erfolgt eine Annäherung an den NaCl-Pol.

7.1.4 Salinar beeinflusste gealterte Neubildungswässer (E 31)

sind Grundwässer des Übergangsbereiches von gealterten Neubildungswässern und Chlorid-betonten salinaren Wässern. Der Grundwasserchemismus wird einerseits durch Mischungs- und Verdünnungsprozesse, andererseits durch Kationenaustauschreaktionen geprägt. Im Ergebnis einer Erdalkalisierung beim Zutritt NaCl-betonter salinärer Wässer erfolgt eine Anreicherung der Grundwässer mit

Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen. Die Lagepunkte der Wässer dieses Genesetyps befinden sich im Genesediagramm deshalb in den Feldern der Magnesium- und Chlorid-Typen (vgl. RECHLIN 1997).

Die Wässer dieser Genese Klasse unterscheiden sich von denen der nachfolgend beschriebenen Klasse D 31 durch die geringeren Sulfatkonzentrationen. Die komplexen Standortverhältnisse sind bei der Interpretation der Genesetypen unbedingt zu berücksichtigen.

7.1.5 Salinar beeinflusste junge Neubildungswässer (D 31)

sind Grundwässer, die im Übergangsbereich zwischen jungen Neubildungswässern und Chlorid-betonten salinaren Wässern angetroffen werden. Neben der Mischung und Verdünnung der Grundwässer der unterschiedlichen Grundwasser-Genese Klassen erfolgen Kationenaustauschreaktionen, die den Grundwasserchemismus maßgeblich prägen. In den oberflächennahen pleistozänen Grundwasserleitern sind die Austauschplätze vornehmlich mit Erdalkali-Ionen besetzt. Bei Zufuhr zusätzlicher salzwasserbürtiger Alkali-Ionen erfolgt im Ergebnis der sich vollziehenden Erdalkalisierung eine Anreicherung der Grundwässer mit Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen. Die Lagepunkte der Wässer dieser Genese Klasse befinden sich im Genesediagramm deshalb in den Feldern der Magnesium- und Chlorid-Typen (vgl. RECHLIN 1997).

Ihre Chlorid- und Sulfatkonzentrationen werden durch atmosphärische Deposition, geogene und anthropogene Stoffeinträge bzw. salinare Ablaugung beeinflusst. Erkenntnisse dazu liefert RECHLIN (2000). Die Zuordnung der Genese Klasse muss deshalb unter Berücksichtigung der komplexen Umfeldbedingungen getroffen werden. Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Chlorid- und Sulfatkonzentrationen können genetische Fehlinterpretationen nicht vollständig ausgeschlossen werden.

8. Erscheinungsformen geogener salinärer Wässer

Die praktische Bedeutung der oben beschriebenen Genese Klassen wird bei der Beurteilung von Vorkommen der Binnenversalzung deutlich. Häufig steht nur eine begrenzte Anzahl von Aufschlüssen zur Verfügung oder es ist einzuschätzen, ob der Nachweis einer erhöhten Chloridkonzentration in einer Wasserfassung eine potentielle Gefährdung für die Trinkwasserversorgung darstellt. Die Zuordnung der Wässer zu Genese Klassen gestattet dabei eine konzentrationsunabhängige Bewertung des Grundwasserchemismus. Auf der Grundlage der Kenntnis der Abfolge der sich bei einer Intrusion salinärer Wässer in süßwasserführende Grundwasserleiter ausbildenden Genese Klassen ist es möglich, Prognosen hinsichtlich der Verbreitung und Entwicklungsrichtung der hydrogeochemisch-genetischen Verhältnisse dieser Grundwässer zu erstellen.

In Abhängigkeit von den geologischen und hydrodynamischen Standortbedingungen sowie der Ausgangskonzentration der salinaren Wässer können bei den salinaren Intrusionen die unten beschriebenen Salzwasserkörper mit ihrem jeweils spezifischem Bauplan unterschieden werden:

8.1 Salzwasserströme

sind Bereiche innerhalb der süßwasserführenden Grundwasserleiter, in denen sich hochkonzentrierte salinare Wässer unter Wirkung der Schwerkraft und der hydrogeologisch-/hydrodynamischen Standortverhältnisse bewegen. Die Salzwasserströme haben ihren Ausgangspunkt an den für den Salzwasseraufstieg prädestinierten geologischen Strukturen (Randbereiche pleistozäner Rinnen, tektonische Störungszonen). Das Druckpotential der intrudierenden salinaren Wässer und ihr Volumen sind so groß, dass sie, nicht zuletzt auch durch ihre Dichte bedingt, mehr oder weniger scharf abgrenzbare Salzwasserkörper bilden. Die Salzwasserströme bewegen sich, dem Schwerkraftgesetz gehorchend, an der Sohle des Grundwasserleiters in Strömungsrichtung, bei hochkonzentrierten Solen mit hoher Dichte lokal auch entgegengesetzt der Strömungsrichtung des Grundwassers.

Die Salzwasserströme sind durch einen zonalen Aufbau gekennzeichnet. Im Kernbereich sind die am höchsten mineralisierten salinaren Wässer konzentriert. In Abhängigkeit von der ursprünglichen Genese sind diese Wässer den Klassen I 311, I 313 und I 32 zuzuordnen. Daran schließen sich salinare Regenerationswässer der Klasse I 33 an. Im Ergebnis von Diffusionsprozessen folgen danach nach außen hin salinar beeinflusste Wässer der Klassen G 31 und F 31. An diese schließen sich bei Verbreitung jüngerer Neubildungswässer in den Grundwasserleitern, in Abhängigkeit von der Genese Klasse der Süßwässer, salinar beeinflusste junge und gealterte Neubildungswässer der Klassen E 31 und D 31 an, denen die unbeeinflussten Süßwässer folgen. Die Abb. 6 zeigt die Zonalität der Genesetypen eines Salzwasserstromes, der sich in einem unbedeckten Grundwasserleiter bewegt. Derartige Salzwasserströme sind aus den mächtigen unbedeckten Grundwasserleitern des Berliner Urstromtals bekannt. Ein Beispiel aus dem Raum Müllrose wird in HERMSDORF & HOTZAN (2006) beschrieben.

8.2 Salzwasserfahnen

sind diejenigen Bereiche der süßwasserführenden Grundwasserleiter, in denen sich schwach mineralisierte salinare Wässer und salinar beeinflusste Wässer in Abhängigkeit von den hydrogeologisch-/hydrodynamischen Standortverhältnissen bewegen. Die Salzwasserfahnen können ihren Ausgangspunkt an den Randbereichen pleistozäner Rinnenstrukturen bzw. an tektonischen Störungszonen, aber auch an Hochlagen evaporitführender Sedimente

haben. Das Druckpotential der intrudierenden salinaren Wässer bzw. ihr Volumen reichen jedoch nicht aus, um einen scharf abgegrenzten Salzwasserkörper zu bilden, der sich an der Sohle des Grundwasserleiters bewegt. Im Ergebnis von Mischung und Verdünnung bilden sich Fahnen. Diese bewegen sich stets in Strömungsrichtung des Grundwassers, wobei die Transportrate von den Durchlässigkeitskoeffizienten der Sedimentmatrix bestimmt wird. Das bedeutet, dass innerhalb eines Grundwasserleiters in den besser durchlässigen Bereichen andere Geneseklassen angetroffen werden können, als in den weniger durchlässigen Bereichen.

In Analogie zu den Salzwasserströmen sind auch die Salzwasserfahnen zonal gegliedert. An der Wurzel sind die am höchsten mineralisierten salinaren Wässer konzentriert. Am häufigsten sind diese Wässer den Typen I 313 und I 32 zuzuordnen. Daran schließt sich ein geringmächtiger Mischwassersaum an, in dem Mischtypen aus Neubildungs- und Regenerationswässern konzentriert sind. Danach folgen, in Abhängigkeit von den Geneseklassen der im Grundwasserleiter verbreiteten Süßwässer, salinar beeinflusste Süßwässer der Klassen G 31, F 31, E 31 und D 31. Diese werden von den unbeeinflussten Süßwässern umgeben. Die Abb. 7 zeigt ein Beispiel für die Zonalität der Genesetypen einer Salzwasserfahne, die sich in einem unbedeckten Grundwasserleiter ausbreitet. Salzwasserfahnen sind ebenfalls in den unbedeckten Grundwasserleitern des Berliner Urstromtals anzutreffen.

8.3 Aussüßungszonen

sind großflächige Salzwasserkörper, die sich in den Topbereichen von Antiklinalstrukturen mit hohem Anschnittniveau am Kontakt von Salz- und süßwasserführenden Aquiferen ausbilden können. Häufig verlaufen in diesen Bereichen Grundwasserscheiden, d. h., es dominieren hier speisende hydrodynamische Verhältnisse mit einem abwärts gerichtetem Gradienten. Der Zutritt von Neubildungswässern bis in das Niveau der salzwasserführenden Aquifere wird durch das erosionsbedingte Fehlen von Grundwasserhemmern ermöglicht. Mit wachsender Entfernung von der Grundwasserscheide ist unter aktiven hydrodynamischen Bedingungen die Ausbildung von Salzwasserfahnen möglich.

Der Zutritt der Süßwässer bewirkt im salzwasserführenden Aquifer eine Aufsüßung mit Ausbildung spezifischer Geneseklassen, die zonal angeordnet sind. Bei den salinaren Wässern handelt es sich in erster Linie um Wässer der Klassen H 311 und H 32. Daran schließen sich salinare Regenerationswässer der Klasse H 33 an, denen die salinar beeinflussten Wässer der Klassen G 31 bzw. F 31 folgen. Die Süßwässer werden in Abhängigkeit von der Verweilzeit im Grundwasserleiter den Klassen G 11 bzw. F 11 zugeordnet. Die Abb. 8 zeigt die Zonalität der Genesetypen einer Aussüßungszone. Derartige Aussüßungszonen sind beispielsweise aus den hangenden pleistozänen Grundwasserleitern der Strukturen Buckow und Gramzow (vgl. HERMSDORF & HOTZAN 2006) bekannt.

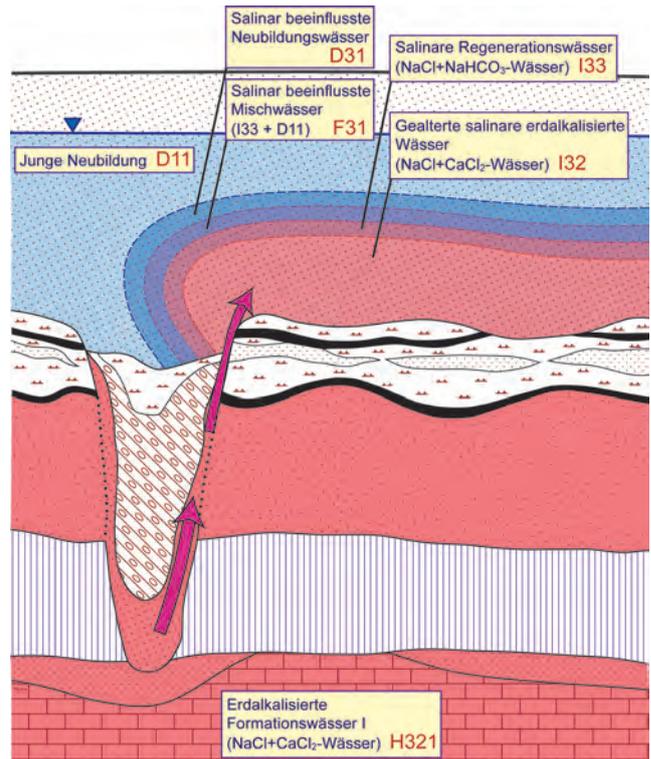


Abb. 6: Schematische Darstellung der Zonalität der Geneseklassen eines Salzwasserstromes im unbedeckten Grundwasserleiter

Fig. 6: Zoning of geogenic classification of a saltwaterflow inside an uncovered aquifer (schematically illustration)

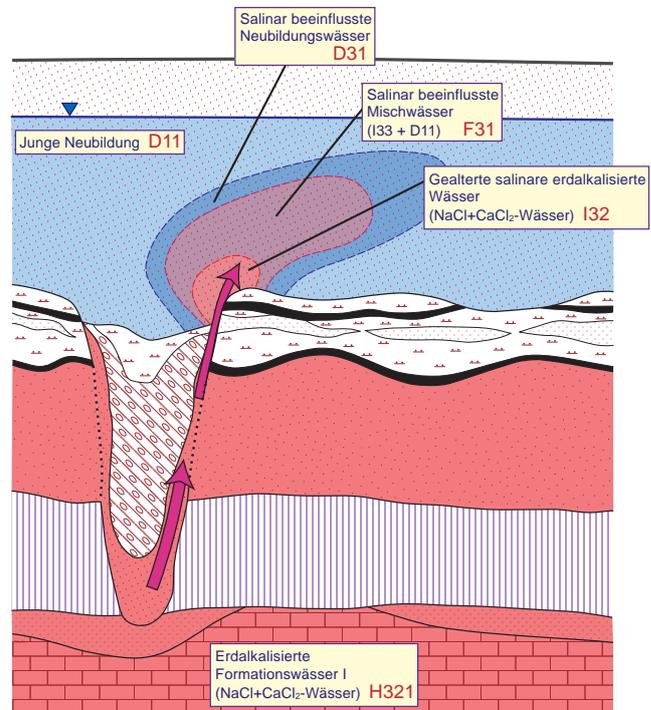


Abb. 7: Schematische Darstellung der Zonalität der Geneseklassen einer Salzwasserfahne im unbedeckten Grundwasserleiter

Fig. 7: Zoning of geogenic classification of a saltwatervane inside an uncovered aquifer (schematically illustration)

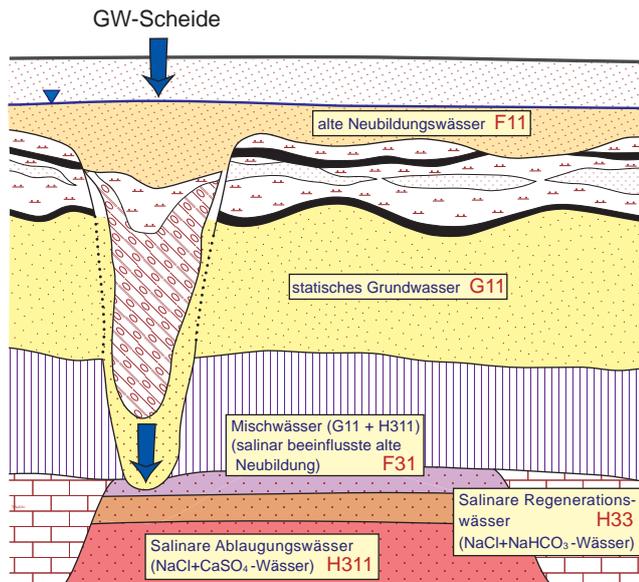


Abb. 8: Schematische Darstellung der Zonalität der Geneseklassen einer Aussüßungszone
 Fig. 8: Zoning of geogenic classification of an area of fresh water intrusion into saltwater (schematically illustration)

Zusammenfassung

Der Schwerpunkt dieses Beitrages liegt auf der Charakterisierung der Geneseklassen salinärer und salinar beeinflusster Wässer.

Daneben werden die geologisch-strukturellen sowie geohydraulischen Bedingungen für den Übertritt salinärer Wässer aus dem Salzwasser- in das Süßwasserstockwerk formuliert sowie Erscheinungsformen der Binnenversalzung beschrieben.

Die hydrogeochemisch-genetische Zuordnung von Analysen salinärer und salinar beeinflusster Wässer zu Geneseklassen ist eine Methode, Vorkommen salinärer Wässer der Binnenversalzung zu bewerten.

Sie erlaubt unter Berücksichtigung der geologisch-strukturellen sowie hydrodynamischen Standortsituation Rückschlüsse auf die Aufstiegs- und Migrationswege zu ziehen.

Zur Charakterisierung der genetischen Klassen werden sowohl die Lagepunkte der Grundwässer in hydrogeochemischen Diagrammen (hier VALJAŠKO-Diagramm, vgl. VALJAŠKO 1961), als auch die prozentualen Anteile der in der Lösung befindlichen hypothetischen Salze herangezogen.

Die Geneseklassen können die methodische Grundlage für eine hydrogeochemisch-genetische Kartierung der salinären und salinar beeinflussten Wässer in den Lockergestein-Grundwasserleitern Norddeutschlands bilden.

Dabei werden die punktuellen Informationen aus den Grundwasseraufschlüssen/Wasseranalysen in die Fläche extrapoliert.

Summary

This paper is focused on characterization of geogenic classification of salinar and salinar influenced waters.

Furthermore the geologic-structural and geohydraulic conditions for transfer of salinar waters from saltwater into fresh water storey and the nature of inland water salinization are described.

The hydrogeochemical and genetical assessment of analysis carried out for salinar and salinar influenced waters by using geogenic classification is a method for characterization of salinar waters of inland water salinization.

This method allows conclusions concerning upconing and migration of salt water in consideration of the geological-structural and hydrodynamical situation.

The position of ground waters inside hydrogeochemical diagrams (VALJAŠKO-diagram, see VALJAŠKO 1961) as well as percental dues of dissolved hypothetical salts are using for characterization of geogenic classification.

The geogenic classification can be a methodical base for hydrogeochemic-genetical mapping of salinar and salinar influenced waters of pore water aquifers of Northern Germany.

In this way punctual information of measuring wells and water analysis are extrapolated into the area.

Literatur

GERSTENGABE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F. & P. C. WERNER (2003): PIK-Report Nr. 85 – Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forstwirtschaft- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. - PIK-Studie, 96 S., Potsdam

GRUBE, A., WICHMANN, K., HAHN, J. & K. H. NACHTIGALL (2000a): Geogene Grundwasserversalzung in den Porengrundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. - Veröffentlichungen aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe 9, 204 S., Karlsruhe

GRUBE, A., HERMSDORF, A., LANG, M. J., RECHLIN, B., SCHNEIDER, W. & K. WICHMANN (2000b): Prognose des Salzwasseraufstiegs im pleistozänen Grundwasserleiterkomplex eines geplanten Wasserwerks im Land Brandenburg – Grundwassermodelle und hydrogeochemische Untersuchungen. - Brandenburg. geowiss. Beitr. 7, 1/2, S. 41-52, Kleinmachnow

HERMSDORF, A. & G. HOTZAN (2006): Geogene Versalzung im Land Brandenburg – Grundlagen und Überwachung. - Vortrag zur Tagung „Entwicklung von Grundwasserüberwachungsprogrammen bei der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie“, Landeslehrstätte für Naturschutz und Landschaftspflege „Oderberge Lebus“

HERMSDORF, A. (2010): Überblick über die Grundwasserver-
salzungen im Land Brandenburg und ihre Spezifikation
für die Binnensalzstellen. - Naturschutz und Landschafts-
pflege in Brandenburg **19**, 1/2), S. 9-15, Potsdam

HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie – Einführung in die All-
gemeine und Angewandte Hydrogeologie. - 415 S., Stutt-
gart (Ferdinand Enke Verlag)

LEHMANN, H.-W. (1974): Geochemie und Genesis der Tie-
fenwässer der Nordostdeutschen Senke. - Zeitschrift für
angewandte Geologie **20**, 11 u. 12, S. 502-509 u. 551-557,
Berlin

MATTHES, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwas-
sers. - 499 S., Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger)

RECHLIN, B. (1997): Zur Anwendung des Hydrogeochemi-
schen Genesemodells der Wässer in den Grundwasser-
leiterkomplexen des Landes Brandenburg (mittelbran-
denburgischer Raum, Stand April 1997). - Brandenburg.
geowiss. Beitr. **4**, 1, S. 67-71, Kleinmachnow

RECHLIN, B. (2000): Möglichkeiten der Identifizierung anthro-
pogener Stoffeinträge mit Hilfe des „Hydrogeochemischen
Genesemodells der Wässer in den Grundwasserleiterkom-
plexen des Landes Brandenburg. - Tagungsband BTU Cott-
bus, Teil 2, Aktuelle Reihe 4.2/2000, S.68-79, Cottbus

RECHLIN, B. (2008): Eine Methode zur konzentrationsunab-
hängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in
süßwasserführende Grundwasserleiter und Oberflächen-
gewässer. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 57-
68, Kleinmachnow, Cottbus

RECHLIN, B., HOFFKNECHT, A., SCHOLZ, H. & A. HELMS (2010):
Genetische Bewertung von Analysen der Hydrosphäre. -
Software GEBAH Vers. 1.1 LBGR/GCI, Cottbus, Königs-
Wusterhausen

VALJAŠKO, M. G. (1961): Geochemie der Halokinese. - In:
Sb. Tr. Geol. Fakult. Moskau, Izdat. Mosk. Univ. (russ.)

VOIGT, H.-J. (1972): Genese und Hydrogeochemie minerali-
sierter Grundwässer. - WTI, **13**, Sonderheft 6, 150 S., Berlin

VOIGT, H.-J. (1990): Hydrogeochemie – Eine Einführung
in die Beschaffenheitsentwicklung des Grundwassers. -
310 S., Heidelberg, Berlin (Springer Verlag)

Anschrift des Autors:

Gerhard Hotzan
Landesamt für Bergbau, Geologie
und Rohstoffe
Inselstr. 26
03036 Cottbus
gerhard.hotzan@lbgr.brandenburg.de