

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Kleinmachnow, Cottbus	15 (2008), 1/2	S. 57-68	4 Abb., 4 Tab., 5 Lit.
------------------------------	--------------------------	----------------	----------	------------------------

Eine Methode zur konzentrationsunabhängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in süßwasserführende Grundwasserleiter und Oberflächengewässer

A method for a concentration free early detection of saltwater intrusions into freshwater aquifers and surface water

BERTHOLD RECHLIN

Einführung

Je nach Herkunft, Alter und Genese weisen Grundwässer unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen auf. Mittels eines hydrogeochemischen Bewertungsverfahrens können Aussagen zur Genese der Grundwässer abgeleitet werden. Ausgehend von empirischen Erfahrungen konnten hierzu geochemische Entscheidungskriterien erarbeitet werden, die eine verbesserte Grundlage für eine genetische Bewertung der Grundwässer darstellen.

Zur Orientierung wird vorab das **Genetische-Grund-Verhältnis (GGV)** zur Identifizierung von vorzugsweise geogen- und/oder marin salinaren Wässern mit noch geringem Konzentrationsniveau in süßwasserführenden Grundwasserleitern und Oberflächengewässern vorgestellt. Es beruht auf der Zuordnung und Bewertung von Berechnungssalzen in einem **Unschärfe-Statistisch-Genetischen Modell** von Wässern der **Hydrosphäre** (Genese-Modell USGMH) auf hydrogeochemischer Basis.

Das GGV ist eines der wichtigsten Salzverhältnisse des USGMH und wird durch das Verhältnis der Modellsalze des Sylvin und des Halit zueinander geprägt. Das alleinige Heranziehen dieses für die praktische Anwendung vereinfachten genetischen Verhältnisses ist für eine erste orientierende Einschätzung des Vorliegens und der Entwicklung eines möglichen salinaren Stoffeintrages im untersuchten Grundwasserbereich ausreichend. Seine Bedeutung liegt insbesondere in der Beurteilung natürlicher Wässer nicht nur mit salinarem Hintergrund. Signifikante anthropogene Überprägungen beeinflussen dieses und andere Salzverhältnisse deutlich und erfordern in der Regel zusätzliche spezielle Untersuchungen mit dem Genese-Modell.

Für eine verbesserte Aussagegenauigkeit müssen daher zusätzliche Indikatoren des Modells verifiziert werden. Die für diesen Sachverhalt wichtigsten sind der **Salinar-Matrix-Koeffizient (SMK)** und der **Salinare-Intrusions-Koeffizient (SIK)**. Diese sind im Gegensatz zum GGV an den jeweiligen genetischen Typ des USGMH gebunden, zu dem die Lösung gehört und können nur mit der gesamten Modell-

matrix ermittelt werden. Diese ist auch die Basis für das im Modell dann verwendete komplexe GGV.

Auf Grund des damit verbundenen außerordentlich großen Aufwandes und auch wegen ihrer sehr großen Fehlerempfindlichkeit bei nicht exakten oder unvollständigen Analysen sowie einzuhaltender Randbedingungen soll für die Berechnung des GGV und gegebenenfalls weiterer genetischer Koeffizienten ein dafür speziell entwickeltes Auswertungsprogramm im Jahre 2009 zur allgemeinen Anwendung zur Verfügung stehen. Neben Einzelanalysen können in diesem dann auch komplexe Datensätze untersucht werden.

Obwohl das USGMH noch nicht abschließend fertiggestellt ist, kann schon jetzt mit seiner Hilfe die ursächliche Herkunft der Wässer auf hydrogeochemischer Basis besser beurteilt und eine objektivere Beurteilung der Speisungsbedingungen erreicht werden. Es umfasst derzeit einige hundert genetische Berechnungstypen, die den Lösungsinhalt nach einem einheitlichen Schema beschreiben. Dafür ist unabdingbar, dass die Analysen nicht nur mit der Ionenbilanz, sondern auch mit davon unabhängigen mathematisch-statistischen Verfahren auf ihre Zulässigkeit für genetische Bewertungen überprüft werden. Die vollständige genetische Typisierung erfordert jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit, die mit einer entsprechenden Software zu einem späteren Zeitpunkt in die Praxis eingeführt werden soll.

Den Untersuchungsarbeiten liegen weit über 10 000 Analysen zu Grunde, die den erhöhten qualitativen Genauigkeitsanforderungen des Modells an die Ionenbilanz genügen. Ihre Repräsentanz wurde mit den in den jeweiligen Entwicklungsetappen erarbeiteten Softwareversionen (GENESE/2000, HYDRAGEB/2002, GGMH/2007) und den darin enthaltenden Überprüfungen verifiziert.

1. Geologische und hydrodynamische Grundlagen

Die grundwassergenetischen Untersuchungen im Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) erfolgen

vor dem Hintergrund, dass im Salzwasserstockwerk von Brandenburg ein erhebliches Druckpotenzial auch unterhalb von Grundwasserneubildungsgebieten (bis etwa + 28 m NN nachgewiesen) existiert. Dieses induziert in Abhängigkeit von Verbreitung und Mächtigkeit seiner Deckschichten, unabhängig von den hydraulischen Zuständen des überlagernden Süßwasserstockwerkes bei geologischen Defekten (Quartär-Ausräumungszonen, Bruchstörungen) einen Salzwassertransport in die primär Süßwasser führenden Grundwasserleiter (GWL). Dieser natürliche Entlastungsprozess wird durch mehr als 50 Salzstellen im Bereich brandenburgischer Niederungsgebiete angezeigt.

Der meist fahnenförmige Transport der Salzfracht kann mehrere Kilometer Entfernung vom Ursprungsort erreichen, wenn Vorfluter und Wasserwerke durch ihre zusätzliche hydraulische Druckentlastung in ihren Einzugsgebieten diesen eigendynamischen Prozess verstärken. Das eigendynamische Druckpotential verursacht bei großräumigen Fehlstellen in den liegenden Grundwasserhemmern und gleichzeitiger Dominanz durchlässiger Matrix, dass diese Fahnen trotz des Fehlens hydraulischer Entlastungselemente auch entgegen der Grundwasserfließrichtung noch einen erheblichen Abstand von der geologischen Defektstelle erreichen können. Ein derartiger Salzwassertransport scheint besonders in tieferen Grundwasserleitern ausgebildet zu sein und ist schon mit einem Abstand von mindestens 2 km, beispielsweise unterhalb der Hochfläche der Prignitz (Westbrandenburg) im Hauptgrundwasserleiter des betroffenen Neubildungsgebietes, nachgewiesen worden.

Nicht nur für Brandenburg sind die NaCl-Schichtwässer im Salzwasserstockwerk dominant. Dieses beginnt hier im Mittel ab etwa 250 m unter Geländeoberkante (GOK) und erreicht einige Kilometer Mächtigkeit. Die anderen, die hochsalinaren Laugen dieses Stockwerkes prägenden Lösungen, die MgCl₂- und CaCl₂-Schichtwässer, treten erst im Zechstein (i. d. R. > 2 000 m u. GOK) bzw. dem Rotliegenden (> 3000 m unter GOK) auf und können nur über strukturelle oder stoffliche Wegsamkeiten in oberflächennahe Grundwasserleiter und Vorfluter gelangen. Sie sind bei der Intrusion von Salzwasser in das Süßwasserstockwerk zwar auch beteiligt, erreichen jedoch bei Weitem nicht die Bedeutung der Halit-Wässer für die primär süßwasserführenden Grundwasserleiterkomplexe und sind für die Beurteilung der Aufstiegsmechanismen zunächst von geringerem Interesse. Im Normalfall bildet der als Trennhorizont zwischen dem Salz- und Süßwasserstock ausgebildete Rupelhorizont und/oder Tonmergelsteine eine stoffliche Barriere.

Nach den aus den genetischen Untersuchungen vorliegenden Befunden sind diffus-migrierende Salzwässer zum geogenen Hintergrund im Süßwasserstockwerk des Landesterritoriums zu rechnen.

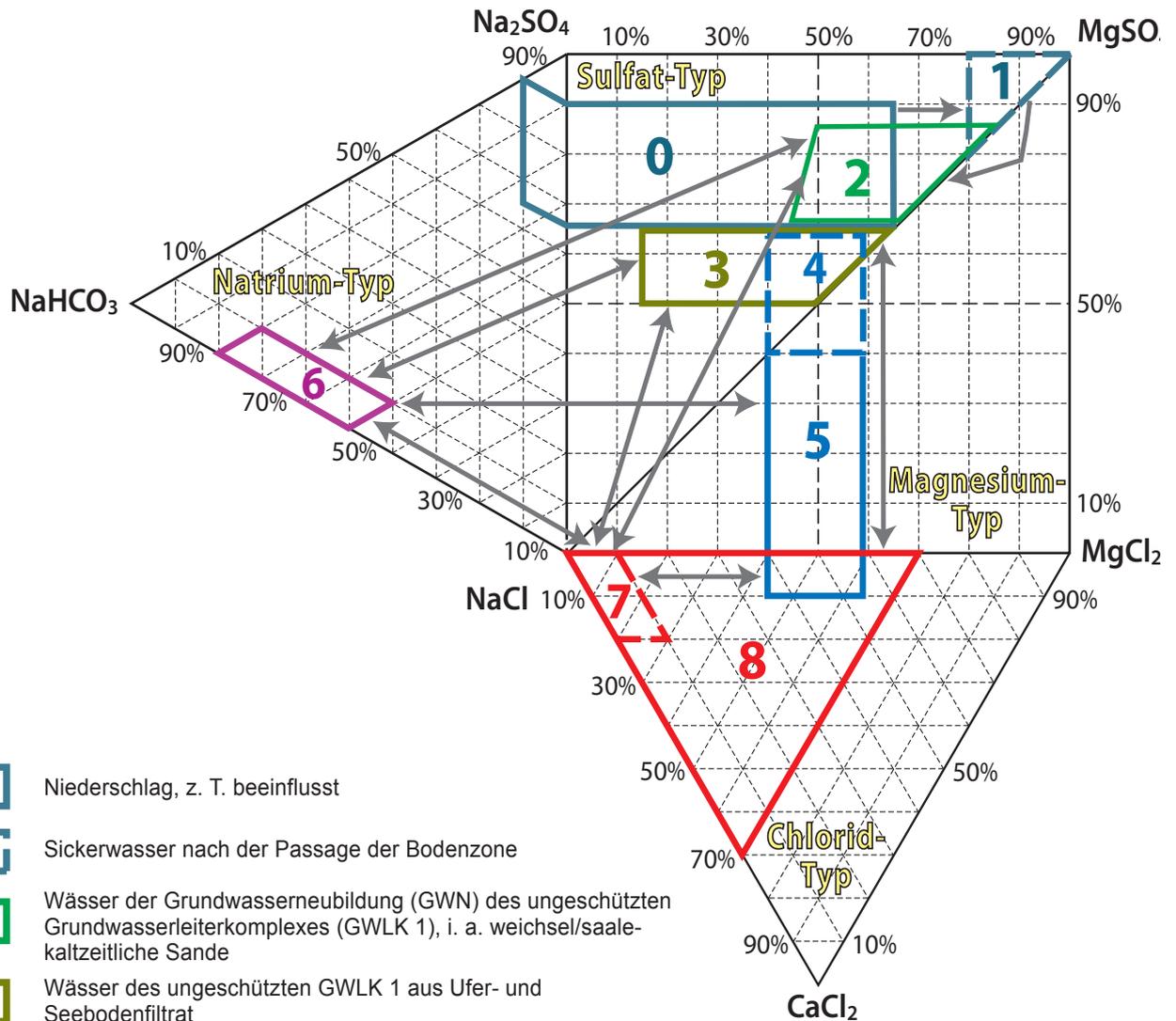
Bei ausreichendem Verdünnungspotenzial aus der Grundwasserneubildung und in den stationären Grundwasservorräten stellen sie beim Fortbestehen der Druckverhältnisse zueinander kein besonderes Problem für die Grundwassernutzung dar. Werden diese Bedingungen durch zusätzliche hydraulische Entlastung (Grundwasserabsenkung) oder

auch abnehmende Grundwasserneubildungsraten (Klimaänderung) und damit verbundenem reduzierten Auflastdruck gestört, wird sich der Salzwassertransport generell verstärken. Die durch fallende Grundwasserstände verursachte relative Druckerhöhung des Salzwasserstockwerkes wird dazu führen, dass die „ungefährlichen“ diffus-migrierenden Salzwässer noch ohne signifikante Konzentrationserhöhung von Chlorid sich genetisch zunächst zu migrierenden Salzwässern entwickeln und so einen beginnenden natürlichen salinaren Intrusionsprozess im Süßwasserstockwerk anzeigen.

2. Methodik

Unter Berücksichtigung einer für hochkonzentrierte Lösungen entwickelten geochemischen Typisierung (VALJASHKO 1961) und deren Darstellung in einem Lagepunktdiagramm (RECHLIN 1997) wird seit etwa 1981 durch den Autor an einer hydrogeochemischen Modellvorstellung zur Beurteilung der Zusammensetzung des Grundwassers des Süßwasserstockwerkes gearbeitet. Im Unterschied zu VALJASHKO werden die eine Lösung prägenden Inhaltsstoffe hier dagegen nach einem speziellen Dominanz-Prinzip untersucht. Beide genetischen Methoden sind weitgehend konzentrationsunabhängig und miteinander verwandt. Im Unterschied zum Lagepunktkonzept nach VALJASHKO ist die Systematik im Genese-Modell „USGMH“ so beschaffen, dass die ursächliche Herkunft der geogenen und/oder anthropogenen Wässer auch bei großer Verdünnung im Wesentlichen identifiziert werden kann. Grundlage dafür ist die Typisierung der signifikanten Lösungsinhalte der geologischen Schichtenfolge nach einem einheitlichen System. Insbesondere konnte der Mangel der fehlenden diesbezüglichen Zuordnung im VALJASHKO-Diagramm reduziert werden. Hierfür ist jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit erforderlich, bis das vollständige grundwassergenetische Modell vorgelegt werden kann.

Die Visualisierung der Befunde des Genese-Modells erfolgt vorerst noch im VALJASHKO-Diagramm, obwohl neben anderen die Stickstoff- und vor Allem die genetisch bedeutsamen Kalium-Salze nicht berücksichtigt werden können. Außerdem ist dieses auf Grund seiner ursächlichen Herkunft aus dem hochsalinaren Sedimentkomplex (Chloridwerte bis > 200 000 mg/l) nur bedingt für die Gewinnung genetischer Informationen im Süßwasserstockwerk geeignet. Dies gilt nicht nur für die geogenen Wässer, sondern insbesondere auch für die Ermittlung von anthropogenen Stoffeinträgen. Trotz unterschiedlicher Herkunft werden im Diagramm oft identische Lagepunkte dargestellt. Angemerkt sei, dass die VALJASHKO-Methodik nicht für die Bewertung von Wässern mit nur geringem Konzentrationsniveau entwickelt wurde und für diese Zwecke nicht autorisiert ist. Nach umfangreichen Untersuchungen konnte jedoch festgestellt werden, dass ihre Anwendung für gering mineralisierte Wässer zu einer erheblich verbesserten Beurteilung ihres Lösungsinhaltes beitragen kann. Erste Befunde zur Bewertung überwiegend geogener Wässer nach dem Lagepunktkonzept sind in Abbildung 1 zusammengefasst (RECHLIN 1997).



- 0 Niederschlag, z. T. beeinflusst
 - 1 Sickerwasser nach der Passage der Bodenzone
 - 2 Wasser der Grundwasserneubildung (GWN) des ungeschützten Grundwasserleiterkomplexes (GWLK 1), i. a. weichsel/saalekaltzeitliche Sande
 - 3 Wasser des ungeschützten GWLK 1 aus Ufer- und Seebodenfiltrat
 - 4 Wasser im Liegenden des GWLK 1 bzw. im Bereich hydrogeologischer Fenster zwischen GWLK 1 und GWLK 2
 - 5 Wasser mit längeren Aufenthaltszeiten ('ältere GWN') des geschützten GWLK 2, i. a. saalekaltzeitliche Sande
 - 6 gut geschützte Wasser des GWLK 3 ohne bzw. nur mit geringen Anteilen von GWN, i. a. elsterkaltzeitliche und tertiäre Sande
 - 7 sehr gut geschützte, hoch mineralisierte Wasser des Tiefenwasserstockwerks (TWS 1) i. a. Rupelbasissande, Aquifere von Kreide, Jura, Trias
 - 8 sehr gut geschützte, hoch mineralisierte Wasser des TWS 2, i. a. intrasalinare Restlaugen des Röt, Zechstein
- ↔ Entwicklungen der Lagepunkte auf dem Transportweg der Wässer nach ihrer Herkunft bzw. den Lagerungsverhältnissen

Abb.1
Hydrogeochemisches Genese-Modell der Wässer in den Grundwasserleiterkomplexen des Landes Brandenburg (RECHLIN 1997)

Fig. 1
Hydrogeochemical genetic interpretation model of groundwater in the aquifers of Brandenburg, Germany

Bei genauer Kenntnis der hydrogeologischen Verhältnisse der Grundwasserlagerstätten können mit diesem jedoch Wasser insbesondere salinärer Herkunft schon dann vergleichsweise sicher erkannt werden, wenn deren Speisungsanteil genetisch prägend geworden ist. Dieser wird im Modellansatz des Genese-Modells „USGMH“ mit Hilfe genetischer Salzverhältnisse (GGV) und weiteren Indikatoren (SMK, SIK) identifiziert. Auf dieser Grundlage kann eine vergleichsweise sichere Beurteilung der Lagepunkte im Diagramm auch für Oberflächengewässer erreicht werden. In der Abbildung 2 sind die Lagepunkte von Seen im Gebiet des Naturparks Stechlin im Trockenjahr 2003 dargestellt und mit Hilfe des GGV verifiziert und zugeordnet worden (KABOTH, RECHLIN & GINZEL 2008). Aus den Befunden lässt sich über das vergleichsweise niedrige GGV ($< 0,1$) ablei-

ten, dass der Stechlinsee zu diesem Zeitpunkt durch geringfügige Anteile von geogen-salinaren Tiefenwässern beeinflusst wurde. Für die genetische und qualitative Beurteilung des Seewassers im Diagramm muss jedoch berücksichtigt werden, dass mit der salinaren Liegend-Speisung auch immer eine Süßwasser führende Entlastung aus den Liegenden verbunden ist. Diese wird beim Aufstieg insbesondere bei der Passage von organischen Sedimenten von deren spezifischen Lösungsinhalten nachhaltig beeinflusst. Diese hydraulischen Verhältnisse erklären dann auch die scheinbar abnehmende salinare Beeinflussung im Diagramm im Vergleich zum benachbarten Wittwese. Bei normalen Niederschlagsverhältnissen wird der Stechlinsee jedoch neben zufließendem Grundwasser schon durch offensichtlich marin geprägte Niederschläge gespeist. Im Wittwese ist dagegen

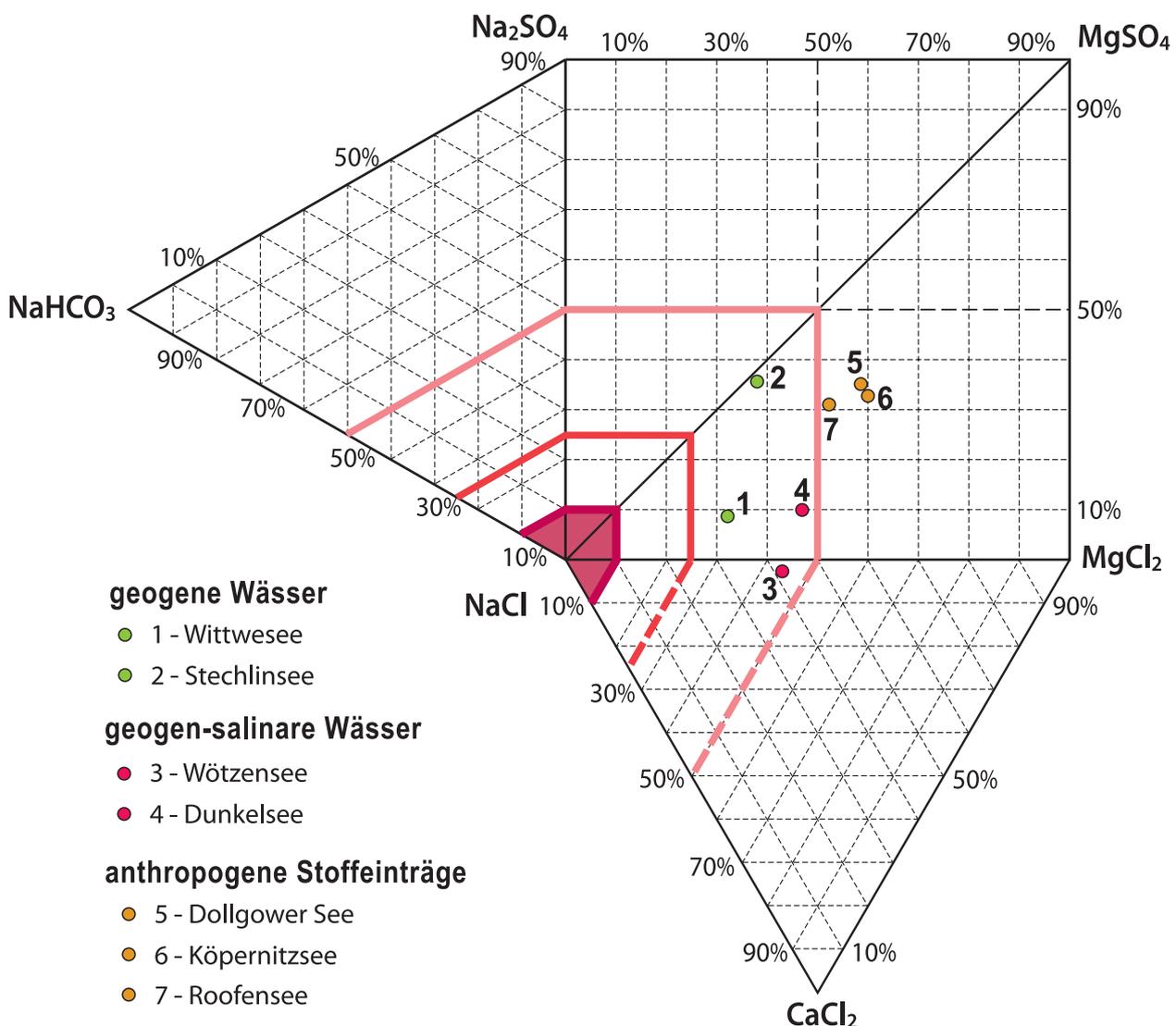


Abb. 2

Hydrogeochemisches Genese-Modell der Wässer in den Grundwasserleiterkomplexen des Landes Brandenburg für Oberflächengewässer im Naturpark Stechlin

Fig. 2

Hydrogeochemical genetic interpretation model of groundwater in the aquifers of Brandenburg; here for surface water in the natural preserve Lake Stechlin

die genetische Salzwasserbeeinflussung ausschließlich auf die aktuelle Grundwasserneubildung zurückzuführen, die durch ein deutlich höheres GGV ($>0,1$) angezeigt wird.

In der Bewertungsmethodik des Genese-Modells „USGMH“ werden Ionen zu hypothetischen Salzen verknüpft und mit einer variablen genetischen Modellmatrix in ihrer wechselnden Abhängigkeit voneinander untersucht, zugeordnet und klassifiziert. Aus ihnen werden eine Vielzahl von Genetischen-**I**nformations-**R**eihen (GIR) abgeleitet, auf deren Basis dann die genetische Interpretation erfolgt.

Bei der Beurteilung der daraus hervorgehenden Befunde werden nicht nur die geologische, sondern auch die hydrodynamische Situation, die Flächennutzungen und Speisungsbedingungen sowie die Konzentrationsverteilung der Lösung in den untersuchten Standortbereichen berücksichtigt und so die ursächliche Herkunft der Lösung und ihre Veränderung auf dem Transportweg ermittelt.

Aus der Berechnung ergeben sich derzeit fünf genetische Systeme, die die Typisierung von VALJASHKO erweitern, jedoch mit dieser nicht identisch sind. Sie berücksichtigen auch die im Untersuchungsraum angetroffenen anthropogenen Stoffeinträge und die daraus resultierende veränderte Zusammensetzung der in den jeweiligen Grundwasserleitern enthaltenden Lösungen unterschiedlicher Mineralisation und Herkunft sowie ihre hydrodynamischen Wechselbeziehungen.

Das grundlegendste aus der Modellmatrix berechnete Salzverhältnis, das Genetische-Grund-Verhältnis, tritt in allen hydrogeochemisch-genetischen Typen mit überwiegend geologischem Hintergrund auf. Es ist somit in besonderem Maße geeignet, typ- und konzentrationsunabhängig vergleichbare genetische Informationen zu erzielen, wenn die Repräsentanz der Analytik für die Berechnung der Salzverhältnisse sichergestellt ist.

Bei richtiger Anwendung des zutreffenden GGV ergeben sich aus ihm sachlich begründete Hinweise insbesondere auf die Anwesenheit salinärer Wässer aus anthropogener, vorzugsweise jedoch geogener Ursache. Die Erfahrung lehrt, dass ohne rechtzeitige steuernde Maßnahmen hauptsächlich die geogene Versalzung zu einer Gefährdung nutzbarer Grundwasserlagerstätten bis hin zu deren Unbrauchbarkeit führen kann.

Die Modellvorstellungen des USGMH wurden in den jeweiligen Entwicklungsstufen in der geologischen Fachbehörde des Landes Brandenburg routinemäßig angewendet, verifiziert und fortlaufend präzisiert. Als Grundlage für den detaillierten Abgleich werden Grundwasserlagerstätten ausgewählt, in denen eine signifikante Prägung entweder anthropogen oder geogen erwartet werden kann. Die Ergebnisse werden seit einigen Jahren in konkreten Aufgabstellungen der täglichen Praxis angewendet.

3. Genetisches-Grund-Verhältnis GGV

3.1 Grundlagen

Das GGV trennt zum Einen das Süß- vom Salzwasser und zum Anderen Wässer mit kurzen von denen mit längeren

Fließwegen vom Ursprungsort. Daraus ergeben sich zusätzlich auch Rückschlüsse auf die Verweildauer der Lösungen im jeweiligen Grundwasserleiterkomplex. In diesem grundlegenden Salzverhältnis sind einerseits die anthropogene Beeinflussung sowie die Verwitterung bzw. Sorption und andererseits die Stoffeinträge von Halitwässern aus der anthropogenen und geogenen Grundwasserneubildung (Niederschlag aus verdunstendem Ozeanwasser) bzw. aus dem liegenden Salzwasserstockwerk vereinigt.

Das GGV ist ein kombiniertes Restsalzverhältnis des Genese-Modells und wird durch andere genetische Indikatoren präzisiert. Auch ohne Einbeziehung dieser Koeffizienten ist eine erste orientierende Beurteilung zum Einfluss salinärer Wässer in den untersuchten Grundwasserleitern und Oberflächengewässern möglich, wenn nur das Basisverhältnis des GGV zu Grunde gelegt wird. Es wird beschrieben mit dem Koeffizienten:

$$\text{KCl (\%)} : \text{NaCl (\%)}$$

Für die Übersichtsberechnung des GGV ist die nahezu fehlerfreie Bestimmung mindestens nachfolgender Parameter unerlässlich:

Vor-Ort-Parameter: pH-Wert, Temperatur, Leitfähigkeit

Kationen: K, Na, Mg, Ca, NH_4 , Fe, Mn (ges./gel.)

Anionen: Cl, SO_4 , HCO_3 , NO_2 , NO_3 , Br

Organische Parameter: CSV_{Mn} , DOC, UV_{254}

Treten erhöhte Nitrat-Werte ($> 10 \text{ mg/l}$) auf, muss das GGV bei einigen genetischen Kombinationen modifiziert werden. Die sich aus den diesbezüglichen Testberechnungen ergebenden Befunde sind unter Umständen nicht repräsentativ. Die Ermittlung des zutreffenden Wertes ist dann erheblich aufwändiger und kann nur mit der Modellmatrix des USGMH erfolgen.

In jedem Falle muss sichergestellt sein, dass auch bei orientierenden Untersuchungen die dafür gerade noch zulässige Ionenbilanzabweichung $e \leq 1\%$ nicht überschritten wird.

Eine Berechnung von Ionen aus deren Bilanz ist vollständig unzulässig, da damit unter keinen Umständen verwertbare genetische Ergebnisse erzielt werden können. Aus gegebenem Anlass wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieser Sachverhalt auch für die VALJASHKO-Methodik zutrifft. Es muss darüber hinaus auch bei einer vereinfachten Berechnung in jedem Fall sichergestellt sein, dass über die Abweichung der Ionenbilanz hinaus, die Repräsentanz der Analyse für die Bewertung überprüft wird. Dafür sind in diesem Bewertungsstadium Kontrollanalysen in kurzem Abstand erforderlich.

Die Berechnung der Modellsalze erfolgt auf der Basis der Löslichkeit der Ionen-Verbindungen ausgehend vom schwerlöslichen Salz $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ mit den in der Lösung verbleibenden Ionen und den daraus resultierenden leichter löslichen Salzen von Stickstoff, Chlorid, Sulfat und Hydrogenkarbonat. Die Bestimmung zusätzlicher Parameter (z. B. SSO_4 , Ba, Al, Zn, B, PO_4) ist hilfreich, um sie zu einem späteren Zeitpunkt im USGMH umfassend bewerten zu können.

Im Gegensatz zum GGV ist die alleinige Anwendung des Ionen-Verhältnis K (mmol(eq)/l): Na (mmol(eq)/l) für vergleichbare, konzentrationsunabhängige genetische Untersuchungen von Grund- und Oberflächenwässern unterschiedlicher Herkunft wenig geeignet, da beispielsweise das prägende Natrium sowohl eine anthropogene Herkunft (u. a. Abwasser) haben, als auch dominierender Lösungsinhalt stationärer und oder salinar beeinflusster Grundwässer sein kann. Das nachfolgende Beispiel zeigt, dass trotz gleicher Natrium-Konzentration und ähnlichem K/Na-Koeffizienten eine vollständig unterschiedliche Herkunft des Lösungsinhaltes vorliegt. Dieser Sachverhalt wird nicht nur durch die jeweilige Chlorid-Konzentration, sondern auch durch das GGV belegt:

Parameter	GWM 157 Westbrandenburg -stationäres Grundwasser-	Br. 1 WW - Nordbrandenburg -salinar geprägtes Grundwasser-
K (mg/l)	7,8	3,2
Na (mg/l)	76,0	75,9
Cl (mg/l)	12,0	108,3
GGV	1,4	0,03
K/Na	0,06	0,02

Verifiziert wird das GGV durch eine spezielle Überprüfung mit weiteren Modellsalzen, die dann eine weitergehende genetische Interpretationen ermöglichen. Diese ist zu einer weitgehend sicheren Beurteilung der Lösung zwar geboten, jedoch wegen ihrer Abhängigkeit vom jeweiligen genetischen Berechnungstyp, d. h. von der konkreten Zusammen-

setzung der Lösung nur mit hohem Aufwand zu realisieren. Der für die detaillierte Verifizierung der Aussagen des GGV wichtigste Parameter ist der Salinar-Matrix-Koeffizient. Er trennt das Süßwasser ohne Einfluss von Salzwasser aus dem liegenden Sedimentkomplex von den Lösungen, in denen die Stoffeinträge des Salzwasserstockwerkes gerade beginnen und kann auch für die Identifizierung eines anthropogenen Salinars im untersuchten hydrogeologischen Raum herangezogen werden.

Für die Überwachung eines salinaren Stoffeintrages in Einzugsgebiete des Grund- und Oberflächenwassers ist der Salinare-Intrusions-Koeffizient geeignet. Mit seiner Hilfe können diesbezügliche Entwicklungen frühzeitig kontrolliert und Gegenmaßnahmen in den betroffenen Wasserfassungen auf ihre Wirksamkeit überprüft werden. Für die Bewertung von nicht salinaren Lösungsinhalten werden dann andere, ebenfalls typgebundene Salzverhältnisse genutzt.

Im Ergebnis dieser Bewertung kann die unterschiedliche ursächliche Herkunft der Wässer, ihr sich verändernder Anteil auf dem Transportweg durch die Sedimente sowie die vorhandene und sich entwickelnde laterale Zuspewung besser beurteilt werden. Nur alle Salzverhältnisse und Koeffizienten zusammen ermöglichen durch ihre voneinander abhängige Beziehung im Modell eine weitgehend verlässliche Beurteilung der einzelnen Lösungsinhalte der Wässer in den süß- und salzwasserführenden Grundwasserleitern. Sie erlauben damit insbesondere bei Wasserfassungen eine adäquate Reaktion auf zunehmende qualitativ negative Beeinträchtigungen aus anthropogener und/oder geogener Ursache.

Tab. 1 Klassifizierung des GGV

Tab. 1 Classification of GGV

GGV	SMK	SIK	Orientierende Zuordnung
> 0,1	> 1	>>> 1	Süßwässer ohne salinaren Hintergrund mit kurzer Transportentfernung
< 0,1	> 1	>>> 1	Süßwasser ohne salinaren Hintergrund mit längerer Transportentfernung
< 0,1	< 1	>> 1	diffus-migrierende Salzwässer
<< 0,1	<< 1	> 1	migrierende Salzwässer
< 0,05	<<< 1	< 1	intrusive Salzwässer
< 0,01			Salzwasser der Aquifere des Salinarstockwerkes

Tab. 2 Unterscheidung anthropogen- und/oder geogen-salinärer Wässer

Tab. 2 Difference between anthropogenic and/ or geogene-salinar water

GGV	SMK	SIK	Orientierende Zuordnung
> 0,1	< 1	> 1	Anwesenheit geogener Salzwässer eher unwahrscheinlich
> 0,1	< 1	< 1	Anwesenheit geogener Salzwässer eher wahrscheinlich

3.2 Aussagen

Das GGV entwickelt sich im Süßwasserstockwerk bei geogen-salinaren Stoffeinträgen unabhängig von der Konzentration bei weitgehend fehlender anthropogener Beeinflussung entsprechend Tabelle 1.

Grundsätzlich dürfen die genetischen Zuordnungen nicht statisch angewendet, sondern müssen gerade in den Grenzbereichen dynamisch interpretiert werden.

Die genetischen Koeffizienten SMK und SIK sind zur Orientierung mit aufgeführt worden.

Bei nachhaltigen anthropogen-salinaren Stoffeinträgen, die nicht nur durch erhöhte Nitrat-Werte gekennzeichnet sind, wird das GGV erheblich beeinflusst und muss durch andere Modellsalze auf begleitende geogen-salinare Wässer untersucht werden. Folgende

Hinweise zur Beteiligung von geogenem Salzwasser an dieser Lösung sind mit der gebotenen Vorsicht jedoch möglich (Tab. 2).

Die saline Beeinträchtigung kann durch den SMK meist noch rechtzeitig erkannt werden. Ist das nicht der Fall, erscheinen diese Lösungen zunächst als nicht salinar gefährdet und müssen im USGMH insbesondere in Übergangsbereichen detailliert untersucht werden. Eine beginnende geogen-salinare Intrusion wird kaschiert und oft erst wesentlich später aber meist immer noch früher als bei einer ausschließlichen Konzentrationsbewertung durch die Entwicklung des SIK identifiziert. Bei dieser kann der jeweilige Anteil von Chlorid mit unterschiedlicher Herkunft nur mit großem Aufwand verlässlich identifiziert und ein geogenes Gefährdungspotenzial rechtzeitig diagnostiziert werden (Chlorid-Konzentrationen bei kommunalem und landwirtschaftlichem Abwasser oftmals > 100 mg/l).

Das GGV der Ozeane (marines Salzwasser) ist konstant < 0,05 und liegt unabhängig von der Konzentration (Atlantik/Pazifik/Mittelmeer/Nordsee/Ostsee) bei 0,03, jedoch immer über dem des unbeeinflussten geogenen Salzwasserstockwerkes (< 0,01). Bei salinarem Transport in das Süßwasserstockwerk steigt es systematisch an und weist auf den

zunehmenden Einfluss anderer Vorratsanteile hin. Wird eine saline Aufstiegsbahn durch Förderbetrieb ausgesüßt, verändert sich dieses entsprechend. Bei salinärer Aktivierung fällt es systematisch in umgekehrter Reihenfolge.

In den Grundwasserleitern des Süßwasserstockwerkes bedeutet ein GGV von > 0,1, dass es sich um meist neubildungsbeeinflusste oft anthropogen überprägte und/oder geogene überwiegend stationäre Wässer handelt; ein GGV von < 0,1 weist entweder auf geogene Wässer und/oder schon auf die Anwesenheit salinärer Wässer hin. Wird ein Wert von < 0,05 unterschritten, ist mit großer Wahrscheinlichkeit ein anthropogenes vorzugsweise jedoch ein geogenes Salinar ausgebildet. Worum es sich im Einzelfall handelt, kann neben der Bewertung der entsprechenden Salinar-Koeffizienten durch die Einbeziehung zusätzlicher genetischer Salze untersucht werden.

3.3 Anwendung

Da für Oberflächengewässer bisher nur Einzeluntersuchungen, beispielsweise aus dem Naturpark Stechlin vorliegen (KABOTH, RECHLIN & GINZEL 2008), werden die mit dem GGV zu erzielenden Informationen anhand von Testförderungen an einem Wasserwerk (WW) in Nord- und einem in Mittelbrandenburg dargestellt (N-Brdbg./ M-Brdbg.) (Tab. 3).

Interpretation:

Im mittelbrandenburgischen Wasserwerk ist schon eine hochaktive Intrusionsbahn ausgebildet, die bei Förderruhe in ihrem benachbarten Umfeld auch bei einer schnellen Aussüßung eine unvermittelte Aufsalzung schon bei ihrer Beprobung zur Folge hat. Daraus ergibt sich ein klarer Hinweis auf die Ausbildung eines Upconing im Standortbereich des Brunnens, der seine weitere Nutzung ohne technische Maßnahmen ausschließt. Werden benachbarte Brunnen betrieben, ist in Abhängigkeit von deren jeweiligen Einzugsgebieten jedoch auch eine „Sanierung“ des kritischen Fassungssteiles festzustellen. Diese ist abhängig vom konkreten Förderstandort und von der Fördermenge in einem definierten Zeitraum. Die Erfahrung zeigt, dass sich aus der Zuordnung und Veränderung des GGV zu entsprechenden hydraulischen Zuständen der betroffenen Wasserfassungen ein verbessertes Förderregime ab-

Tab. 3

Ausgewählte genetische Grund-Verhältnisse von Wasserwerksbrunnen in Brandenburg

Tab. 3

Selected genetic basic relations of waterwork-wells in Brandenburg

Herkunft	GW-Förderung	Datum	Cl-Wert [mg/l]	GGV
WW N-Brdbg. Br. 6	Test - Anfang	30.10.2006	9,9	0,29
		01.11.2006	20,7	0,10
	Test - Ende	03.11.2006	25,8	0,07
WW N-Brdbg. Br. 3	Normalbetrieb	08.05.2007	65	0,04
		14.03.2006	41,5	0,05
WW N-Brdbg. Br. 1	ohne Betrieb	18.09.2006	112	0,02
WW N-Brdbg. Br. 2	„	18.09.2006	107	0,02
WW N-Brdbg. Br. 4	„	18.09.2006	441	0,01
WW M-Brdbg. Br. 4 -kein Betrieb benachbarter Brunnen-	ohne Betrieb	26.03.1984	819,9	< 0,01
		28.03.1984	58,4	0,04
		23.04.1984	719,6	< 0,01
WW M-Brdbg. Br.4 -Betrieb benachbarter Brunnen-	ohne Betrieb	24.05.1984	737,4	< 0,01
		17.09.1984	19,9	0,08
		21.11.1984	754,9	< 0,01
		19.12.1984	29,8	0,07

leiten lässt, das eine weitere Salzwasserkontamination begrenzt. Mit der Einbeziehung weiterer genetischer Informationen kann deren Ausbreitung weitgehend minimiert und eine (wenn auch reduzierte) Verfügbarkeit der Wasserfassung sichergestellt werden.

Mit einem GGV um 0,05 kann der kritische Chloridwert für das jeweilige Einzugsgebiet ermittelt werden, ab dem mit der Intrusion salinärer Tiefenwässer in Förderbrunnen/Grundwassermessstellen oder Oberflächengewässer gerechnet werden muss.

Können beispielsweise durch den Förderbetrieb von salinär gefährdeten Brunnen noch andere süßwasserführende Vorratsanteile hydraulisch erschlossen werden, stabilisiert sich das GGV auf dem erreichten Stand und zeigt einen diesbezüglich labilen Gleichgewichtszustand zwischen den Anteilen des Süß- bzw. Salzwassers in der Lösung an. Frühzeitige Hinweise darauf ergeben sich aus den genetischen Koeffizienten SMK und SIK.

Sowohl für das WW in Nordbrandenburg als auch für den bewerteten Fassungsstil des in Mittelbrandenburg untersuchten, ist der kritische Cl-Wert mit etwa 40 mg/l anzusetzen, obwohl fassungsspezifische Unterschiede bestehen. Die bei gleichem GGV höhere Chloridkonzentration im WW in N-Brandenburg (ca. 42 mg/l) im Vergleich zu dem in M-Brandenburg (ca. 35 mg/l) weist darauf hin, dass im mittelbrandenburgischen WW der noch verfügbare Süßwasseranteil geringer ist. Daraus ergibt sich, dass trotz niedrigerer absoluter Chloridwerte diese Teilfassung höher intrusionsgefährdet ist, als das Wasserwerk in Nordbrandenburg. Die Wasserwerke sind in Nord-Süd-Richtung etwa 100 km voneinander entfernt.

Außer der Beurteilung von Brunnen im Förderbetrieb einer Wasserfassung kann das Gefährdungspotential einer identifizierten Salzwasseraufstiegsbahn auch an entsprechenden Grundwasser-Messstellen (GWM) im betroffenen süßwasserführenden Grundwasserleiter relativ verlässlich eingeschätzt werden. Die Einbeziehung der genetischen Koeffizienten und gegebenenfalls weiterer Salzverhältnisse ermöglicht eine Beurteilung der Intensität des Salzwassertransportes und der damit noch verbundenen Vorratsanteile. Dafür sind kurzzeitige Testpumpversuche mit geringem Leistungsumfang ausreichend. Das Beispiel (09.05.2005) der GWM 5 mit Filtereinbau im hangenden Bereich des ungeschützten Grundwasserleiters im südwestlichen Rand-

bereich des Naturparkes Stechlin zeigt, dass intrusive, d. h. durch Eigendynamik gesteuerte Salzwässer auch in Grundwasserneubildungsgebieten den Ruhewasserspiegel erreichen können (Tab. 4):

Interpretation:

Die Entwicklung des GGV belegt, dass im Standortbereich eine stabile Salzwasseraufstiegsbahn ausgebildet ist, die durch Aktivierung der Grundwasserneubildung (GWN), abgeleitet aus dem Ansteigen des SIK, ausgesüßt werden kann. Da der SMK nicht auf diese Entwicklung reagiert, muss eine mit dem Salzwassertransport verbundene zusätzliche, nicht salinare Liegend-Speisung ausgebildet sein. Diese wird auch dadurch belegt, dass bei steigenden Anteilen der GWN die Nitrat-Konzentration fällt. Die Stickstoffeinträge haben also keine anthropogene, sondern eine geogene Ursache und sind auf eine Ammoniumoxidation im vergleichsweise sauerstoffreichen obersten Grundwasserleiter zurückzuführen. Die hohe organische Belastung der Liegenspeisung kann entweder aus dem Salzwasserstockwerk selbst stammen, oder wird durch die Passage tertiärer Sedimente und/oder die Entlastung organisch geprägter Sedimente in den Quaritär-Ausräumungszonen verursacht.

Dem gleichen genetischen System angehörende Wässer, jedoch mit erheblich höherem Konzentrationsniveau (Clorid > 1000 mg/l), wurden auch als Salzwasser-Arteser im Grundwasserzehrgebiet der Nuthe-Niederung südlich von Potsdam angetroffen und zwar in deren oberstem, ungeschützten Grundwasserleiter. In den von salinärer Intrusion betroffenen Wasserwerken zeigt dieser genetische Typ den dynamischsten Teil der jeweiligen salinaren Aufstiegsbahn an.

Für den untersuchten Standortbereich ist eine zusätzliche Absenkung des Grundwasserspiegels wegen der damit verbundenen Reduzierung der Grundwasserneubildung nicht zu empfehlen, da eine Aktivierung der salinaren Intrusion wahrscheinlich ist.

Nach den bisher vorliegenden genetischen Informationen auf hydrogeochemischer Grundlage lassen sich die geogenen Wässer in Bezug auf ihre Versalzungsgefährdung für Süßwasser führende Grundwasserleiter entsprechenden Konzentrationsbereichen von Chlorid zuordnen. Sie können als Orientierung für die Beurteilung von ausschließlich geogenen Hintergrundwerten im Land Brandenburg herangezogen werden:

Tab. 4 Hydrogeochemische und genetische Ergebnisse einer GWM

Tab. 4 Hydrogeochemical and genetic results of a GWM

Zeit (min)	Cl (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	GGV	SMK	SIK
0	132,0	< 0,05	5,4	< 0,01	0,7	2,0
10	92,0	< 0,05	3,5	0,01	0,9	2,7
20	79,0	< 0,05	3,0	0,01	0,8	3,1
30	76,2	< 0,05	2,8	0,01	0,9	3,4
40	68,8	< 0,05	2,7	0,01	0,8	3,3
50	66,6	< 0,05	2,6	0,01	0,8	3,4
60	67,6	< 0,05	2,5	0,02	0,9	3,6
70	62,0	< 0,05	2,4	0,02	0,8	3,7

geogenes Süßwasser	< 15 mg/l Cl
diffus migrierende Salzwässer	ca. 25 mg/l Cl
migrierende Salzwässer	ca. 50 mg/l Cl
intrusive Salzwässer	> 50 mg/l Cl

Modifizierend wirken anthropogene Aufsattelungen, wie z. B. Auftausalze, kommunales und landwirtschaftliches Abwasser, Mineraldünger und industriell bedingte Stoffeinträge.

Liegen die Grundwasserlagerstätten im in nordwestliche Richtung zunehmenden Einflussbereich mariner Niederschläge, steigen die oben genannten Chloridkonzentrationen ebenfalls an und die Background-Konzentrationen ändern sich entsprechend. Trotz eines dann überwiegenden marin-salinaren Eintrages in die Grundwasserleiter ist es möglich, diese von den geogen-salinaren Tiefenwässern bei ähnlichen Chlorid-Konzentrationen durch andere zum Modell gehörende Berechnungssalze zu unterscheiden.

4. Anwendungshinweise

Trotz des schon erreichten Entwicklungsstandes sind noch einige Probleme zu lösen. So erweist es sich unter bestimmten Umständen als schwierig, bergmännisch gewonnene Salze (Auftausalze, Siliersalze, technogene Salze) von denen des geogenen Salinars auf Grund ihrer ursächlich gemeinsamen Herkunft zu unterscheiden. Insbesondere gilt dies, wenn sowohl die Flächennutzung als auch die geologische Position ihre gleichzeitige Anwesenheit nicht ausschließen. Des Weiteren wird das GGV durch geogene Stoffeinträge aus dem Niederschlag, der Liegendspeisung (beispielsweise aus dem Tertiär) und anthropogene aus der Grundwasserneubildung (u. a. Abwasser, Mineraldünger) beeinflusst.

Grundsätzlich dürfen das GGV und andere Salzverhältnisse des Modells „USGMH“ nur zusammen mit sorgfältigen Recherchen zu den hydrogeologischen Verhältnissen sowie zur Flächennutzung im untersuchten Standortbereich erfolgen. Nur unter dieser Voraussetzung ist ein beträchtlicher Informationsgewinn aus den hydrogeochemisch-genetischen Befunden für die umfassende Bewertung hydrogeologischer Sachverhalte zu erzielen. Insbesondere bei Demonstrativpumpversuchen ist es nachweislich möglich, einen Süßwasservorrat auf seine Gefährdung durch zunehmende saline und/oder organisch geprägte Liegend-Speisung zu untersuchen und Schlussfolgerungen auf seine zukünftige Entwicklung (welcher Speisungsanteil wird aktiviert) zu ziehen. Geohydraulische Auswertungsverfahren erbringen hier, wenn überhaupt, dann nur mit großem Aufwand belastbare Ergebnisse.

Verlaufskurven von GGV, SMK und SIK ermöglichen eine frühzeitige Erkennung und Überwachung des Gefährdungspotentials salinärer Wässer. Mit ihrer Hilfe kann die Konzentrationsentwicklung von Chlorid wesentlich besser beurteilt und der „Umgang“ mit dem betroffenen Einzugsgebiet qualifiziert werden. Zum Abgleich sollte auch die Bromidentwicklung herangezogen werden.

Nachdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass nicht nur das Genetische Grund-Verhältnis von der richtigen Ermittlung der Modellsalze abhängig ist. Hierzu sind für die Koeffizienten des Genese-Modells spezielle Prüfverfahren zur Repräsentanz ihrer Berechnung entwickelt worden, die noch weiter präzisiert werden.

Die für grundwassergenetische Untersuchungen an die Analytik zu stellenden Anforderungen liegen deutlich über den derzeitigen Vorschriften, sind aber nachweislich auch im Routinebetrieb durch spezialisierte Labore zu erbringen. Die Gesamtbilanz der in der Berechnungsmatrix derzeit verwendeten mehr als 20 Modellionen (> 99 % der Lösung) sollte bei der Fehlerbetrachtung (ϵ) 0,5 % nicht wesentlich übersteigen. Schon Bilanzfehler von $\epsilon \sim 1$ % sind nur durch aufwändige modellinterne Prüfverfahren annähernd auszugleichen. Dieser Sachverhalt ist unbedingt zu berücksichtigen, da die genetischen Informationen durch Bilanzabweichungen in der Analytik nachhaltig verfälscht werden können.

Hierzu zählt insbesondere auch der scheinbare Bilanzausgleich durch gleichzeitig fehlerhafte Kationen- und Anionen-Bestimmungen. Diese bewirken im Modell dann darin begründete interpretative Falschaussagen, die durch die derzeitigen Prüfverfahren noch nicht sicher erkannt werden. In jedem Falle ist es unerlässlich, dass die gewonnenen genetischen Informationen mit den konkreten Standortbedingungen abgeglichen werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich nach aufwändigen Standortanalysen zunächst überraschende genetische Befunde sehr oft bestätigt haben.

5. Ausblick und Visualisierung

Mit dem erreichten Kenntnisstand lassen sich schon jetzt frühzeitig nicht nur Süßwässer und deren Speisungsanteile zuordnen, sondern insbesondere Wässer mit salinarem Hintergrund, auch ohne signifikante Erhöhung der Chlorid-Konzentrationen erkennen. Daraus ableitbar sind Schlussfolgerungen zu ihrem Transportweg und ihr Gefährdungspotenzial für das Süßwasserstockwerk und deren Oberflächengewässer.

Die Visualisierung der Ergebnisse wird zukünftig in einer speziell darauf zugeschnittenen Darstellung erfolgen, in der die Entwicklung der Wässer vom Ursprungsort und die auf dem Transportweg wechselnden Speisungsanteile auf der Grundlage des „USGMH“ verfolgt werden können.

Zur vorläufigen Orientierung sind in der Abbildung 3 die Lagepunktbereiche von kaum beeinflussten geogenen Salzwässern mit in Richtung des NaCl-Pols zunehmenden geogen und/oder marin-salinarem Stoffeintrag in das Süßwasserstockwerk dargestellt.

In den meist geogenen Bereichen können auch anthropogene Beeinflussungen bis hin zum marin geprägten Niederschlag auftreten. Dieser stellt den eigentlichen Hintergrund der Grundwasserneubildung dar, kann jedoch durch Rauchgase von Industrie und Verkehr verändert sein. Die Identi-

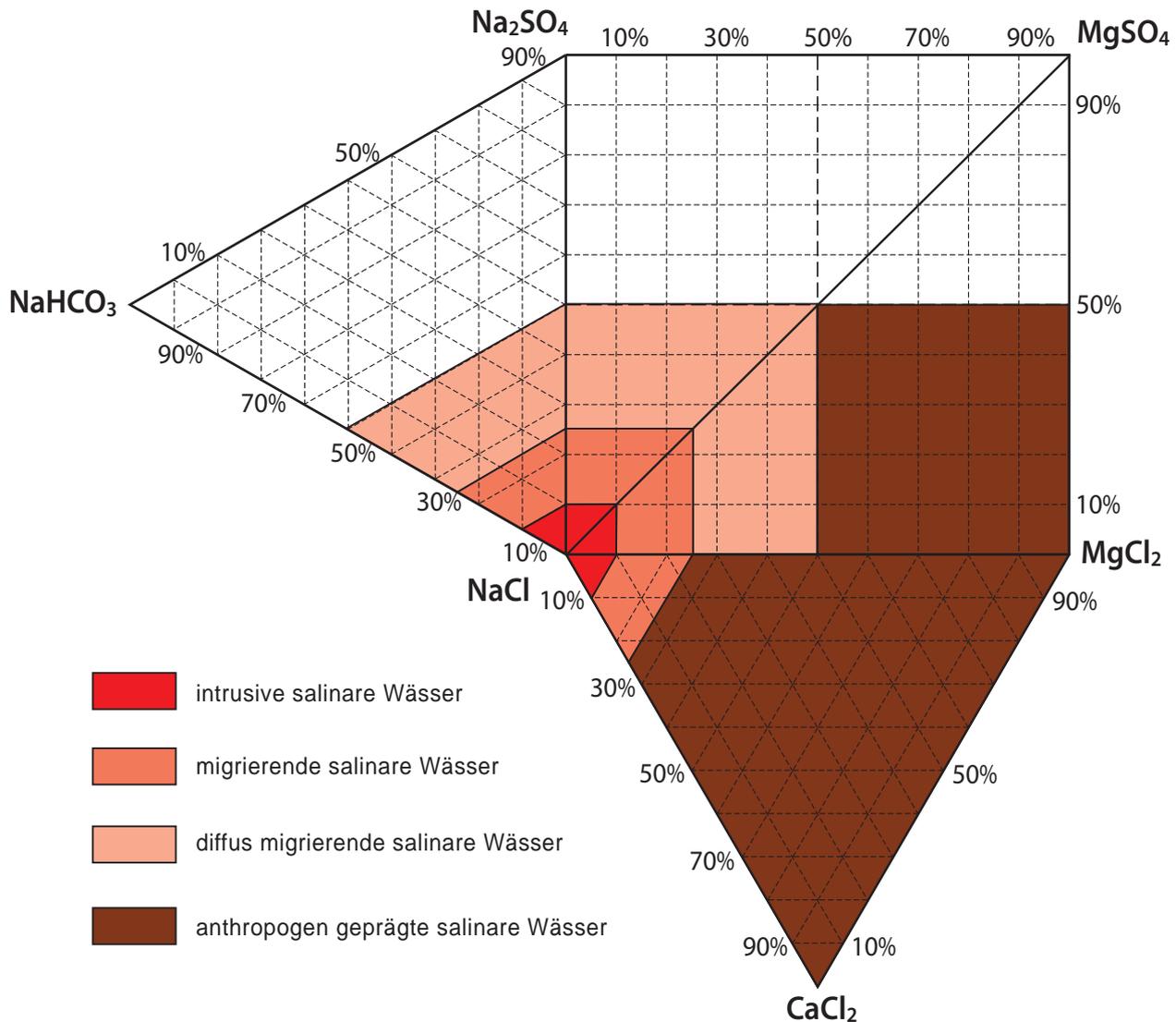


Abb. 3

VALJASHKO- Diagramm mit Lagepunktbereichen von überwiegend geogen/marin- und anthropogen-salinaren Wässern im Süßwasserstockwerk (RECHLIN 2008)

Fig. 2

Hydrogeochemical genetic interpretation model pictured in the Valjasko diagram showing positions of dominant geogene – marine and anthropogenic - salinar influx within the sweet-water level

fizierung wird durch grundwassergenetische Informationen ermöglicht.

Zur Information sind die Verdachtsbereiche mit einem Überwiegen von anthropogen geprägten Salzwässern mit ausgrenzt worden, in denen umgekehrt auch noch geogene Stoffeinträge möglich sind.

Zur Veranschaulichung sind in der Abbildung 4 der einheitliche Lagepunkt der marinen Oberflächengewässer der Erde und typische Lagepunktbereiche von Schichtwässern des Salzwasserstockwerkes dargestellt. Der ursprüngliche Lö-

sungsinhalt seiner geologisch begründeten Aquifere, kann durch dafür untypische Salzwässer (NaCl-Wässer im Rotliegenden) nachhaltig verändert sein und weist auf Transportvorgänge und/oder geologische Aktivitäten in diesem Stockwerk hin.

Zu beachten ist, dass in den Diagrammen des Lagepunkt-konzeptes keine scharfen Grenzen, sondern fließende Übergänge existieren, die die sich verändernden Anteile in der Lösung anzeigen.

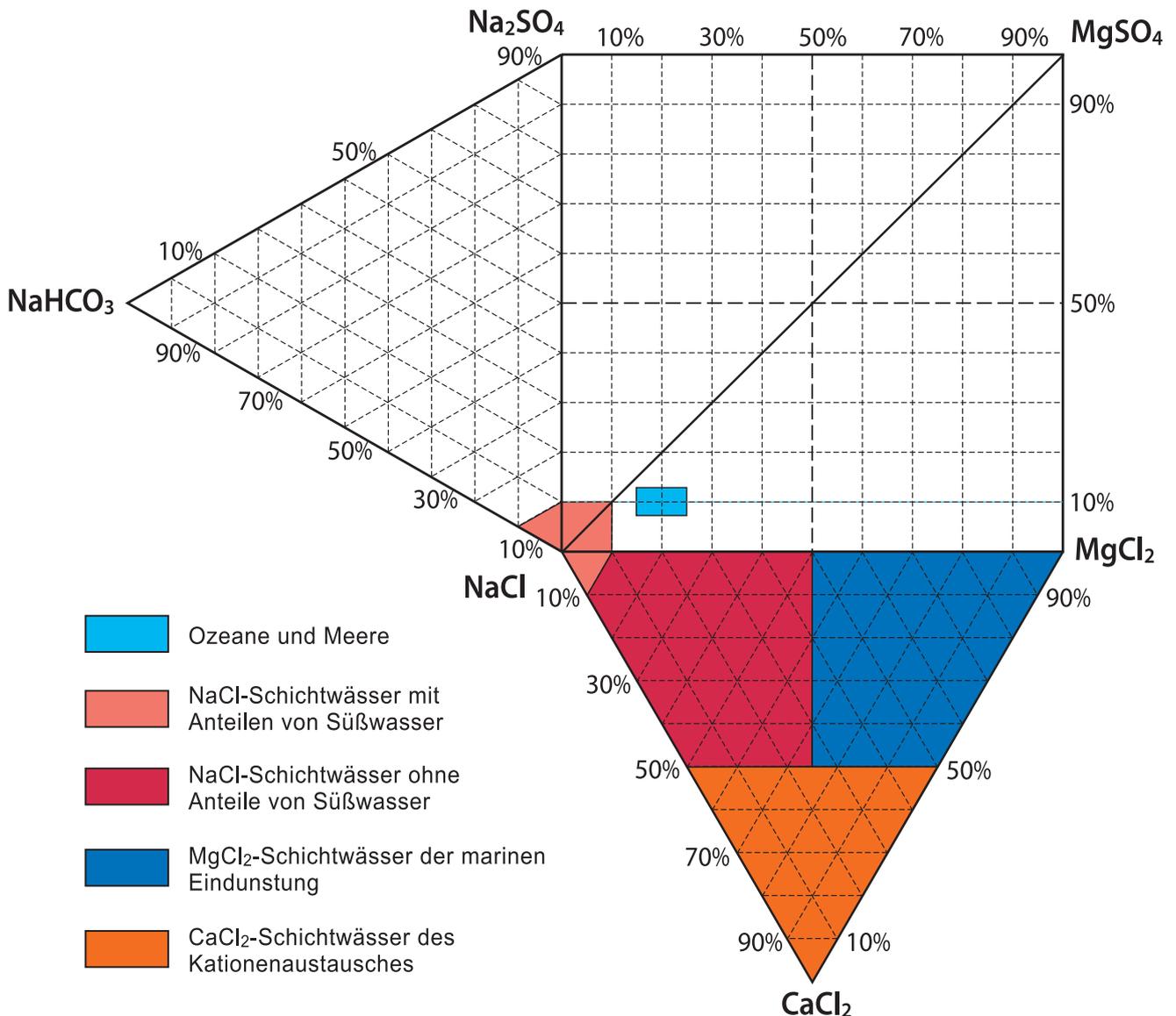


Abb. 4 VALJASHKO-Diagramm mit Lagepunktbereich der Ozeane/Weltmeere und von typischen Schichtwässern des Salzwasserstockwerkes (RECHLIN 2008)

Fig. 4 Hydrogeochemical genetic interpretation model pictured in the Valjasko diagram showing positions of the oceans and of typical ground water of the salt-water level

Zusammenfassung

Der Lösungsinhalt von Wässern unterschiedlicher Herkunft wird im noch nicht abschließend fertiggestellten grundwasser-genetischen Genese-Modell „USGMH“ typisiert und die ursächliche Herkunft ihrer prägenden Anteile ermittelt. Diese werden zu einem späteren Zeitpunkt in einer speziellen Darstellung visualisiert.

Zur Früherkennung der Anwesenheit von Salzwasser in süßwasserführenden Grund- und Oberflächenwässern ist

das aus der komplexen Berechnungsmatrix des Modells abgeleitete Genetische-Grund-Verhältnisses „GGV“ in besonderem Maße geeignet. Es wirkt konzentrationsunabhängig und wird bei geogen-salinarem Stoffeintrag von der unterschiedlichen hydrogeochemischen Zusammensetzung der untersuchten Wässer nur noch wenig beeinflusst.

Für die Untersuchungen sind die erhöhten Genauigkeitsanforderungen des Modells an die Analytik unbedingt zu beachten.

Die Kombination des geochemischen Diagramms nach VALJASHKO 1961 und die Verifizierung der darin ermittelten Lagepunkte mit dem vereinfachten GGV ermöglicht die orientierende Beurteilung eines salinaren Stoffeintrages, insbesondere die Bewertung einer geogen-salinaren Intrusion. Auf dieser Grundlage können frühzeitig Abwehrstrategien zu ihrer Beherrschung entwickelt werden.

Summary

The chemical content of groundwater of different origin can be standardized by the Hydrogeochemical genetic interpretation model of groundwater (USGMH). Although the model hasn't been fully completed yet it allows the analysis of the primary origin of the formative rates.

The "Genetische Grund-Verhältnis" GGV (genetic basic relation) particularly allows the early detection of the intrusion of salt water into the sweet-water level (ground water and surface water). It works independently from concentration and is only marginally influenced by the differing chemical composition of the examined ground water at geogene saliniferous input.

When combining the geochemical diagram after VALJASHKO (1961) and the verification of the enclosed positionings with the simplified GGV it is possible to reach an orienting assessment of a saliniferous input and especially of saliniferous intrusions at an early stage. This can serve as a basis for developing strategies to precociously control these intrusions.

Danksagung

Mein besonderer Dank für die Unterstützung bei der Ausarbeitung des Manuskripts und für die kritische Durchsicht gilt Herrn Dipl.-Geol. D. Brose, Frau Dipl.-Geoln. A. Hermsdorf, Herrn Dr. W. Stackebrandt sowie Frau Dipl.-Geophys. A. Andreae.

Literatur

KABOTH, U., RECHLIN, B. & G. GINZEL, (2008): Besteht für unsere Seen eine geogene Versalzungsgefahr? **Hydrochemisch-genetische Untersuchungen von Speisungsbedingungen an Seen im Naturpark Stechlin**. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 69-79, Kleinmachnow

LEHMANN, H. W. (1974): **Geochemie und Genesis der Tiefenwässer der Nordostdeutschen Senke**. - Z. f. Angew. Geologie **20**, 11/12, S. 501-509, Berlin

RECHLIN, B. (1997): **Zur Anwendung des Hydrogeochemischen Genesemodells der Wässer in den Grundwasserleitern des Landes Brandenburg**. - Brandenburg. geowiss. Beitr. **4**, 1, S. 67-71, Kleinmachnow

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

VALJASHKO, M. G. (1962): **Geochemische Gesetzmäßigkeiten der Entstehung der Kalisalzlagerstätten**. - Verlag der Moskauer Universität (russ.); 104 S. in einer Übersetzung der Zentralen Forschungsstelle der Kali-Industrie TU Leuna-Merseburg

Anschrift des Autors:

Dipl.-Geol. Berthold Rechlin

Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe

Außenstelle Kleinmachnow, Bereich Geologie

Stahnsdorfer Damm 77

14532 Kleinmachnow

Mitteilung aus dem Landesamt No. 218