Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	**24** (2017), 1/2	S. 69–82	7 Abb., 3 Tab., 4 Zit.

GEBAH – Eine Software für die konzentrationsunabhängige Früherkennung von Salzwasserintrusionen in Süßwasser führende Grundwasserleiter und Oberflächengewässer

GEBAH – a software for the early detection of saltwater intrusions in freshwater-bearing aquifers and surface waters, independent of concentration

Dietmar Brose

1 Einleitung

Für die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der Grundwasservorkommen im nord- und mitteldeutschen Lockergesteinsgebiet wurde beginnend im damaligen Landesamt für Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) das Genesemodell entwickelt (Rechlin 1997). Diese Arbeiten werden im jetzigen Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) kontinuierlich fortgeführt und weiterentwickelt. Seit 2011 liegt die anwenderorientierte Software GEBAH (Rechlin et al. 2010) vor, die im Wesentlichen auf der Veröffentlichung von Rechlin (2008) basiert und durch Dr. A. Hoffknecht von der Firma GCI GmbH programmiert wurde. Dieses Programm erlangt besonders bei der Identifizierung von schon geringfügigen Einflüssen salinarer Tiefenwässer in den wasserwirtschaftlich genutzten Süßwasser führenden Grundwasserleitern (GWL) eine außerordentliche Bedeutung. Im Auftrag des LBGR erfolgt der Vertrieb mit entsprechendem Wartungsvertrag über die Firma GCI GmbH, so dass diese Software von fachlich Interessierten erworben und genutzt werden kann. Für die Bewirtschaftung der Grundwasserlagerstätten steht, gerade auch vor dem Hintergrund der prognostizierten Klimaveränderung mit zu erwartenden geringeren neubildungswirksamen Niederschlägen, somit ein einfach handhabbares und kostengünstiges Werkzeug für die Salinar-Früherkennung auch schon bei geringer Mineralisation der Wässer zur Verfügung.
Der Ausgangspunkt der Entwicklung des Genesemodells ist das Geochemische Typendiagramm von Valjašhko (1961). Dieses Lagepunktkonzept wurde durch Rechlin (2008) um das Genetische Grundverhältnis (GGV) und den Salinar Matrix Koeffizient (SMK) erweitert, die unabhängig von der Konzentration und der geochemischen Typisierung im Zusammenhang betrachtet eine sichere Trennung von salinar und nicht salinar beeinflussten Wässern ermöglichen. Sie bilden damit für die Bewertung von Wässern in Hinsicht auf die Identifizierung und Zuordnung salinarer Stoffeinträge die wichtigsten Koeffizienten und beruhen auf der Ermittlung von hypothetischen Berechnungssalzen und ihrer Zuordnung in einem Klassifikationsschema nach dem Dominanzprinzip. Ihre Darstellung in GEBAH erfolgt in einem modifizierten Valjašhko-Diagramm. Die aktuell vertriebene Softwareversion GEBAH 1.3 wurde gegenüber den Vorgängerversionen durch die Einführung des SMK ergänzt.
In diesem Beitrag erfolgt eine Beschreibung der GEBAH-Klassifikation. Weiterhin wird die Interpretation von im Typendiagramm dargestellten Ergebnissen anhand praktischer Beispiele erläutert.

2 GEBAH-Systematik

Im Programm werden die prozentualen Anteile von hypothetischen Berechnungssalzen in der Lösung ermittelt und miteinander in Beziehung gesetzt. Aufgrund der Ionenzusammensetzung (Hauptinhaltstoffe) des Grundwassers (GW) im Lockergestein des norddeutschen Tieflandes (siehe Brose & Hermsdorf in diesem Band) werden in GEBAH die Berechnungssalze $Ca(HCO_3)_2$, $CaSO_4$, $CaCl_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $MgSO_4$, $MgCl_2$, $NaHCO_3$, Na_2SO_4, NaCl sowie $KHCO_3$, K_2SO_4, und KCl ausgewiesen und für genetische Interpretationen herangezogen. Bei Analysen mit aufgehender Ionenbilanz und prägenden Stickstoffkomponenten erfolgt weiterhin eine Berechnung der NH_4-Anteile mit den noch nicht durch die Hauptkationen abgesättigten Anionen als Ammonium- bzw. eine Verrechnung der NO_3-Ionen mit den noch verfügbaren Kationen der Lösung als Nitrat-Salze. Letztere gelten vor allem als Indikator für anthropogene Stoffeinträge. Darüber hinaus immer noch auftretende Kationenüberschüsse werden schließlich mit Bromid (Br^-) bzw. auftretende Anionenüberschüsse mit gelöstem Eisen (meist als $FeCl_2$) verrechnet. Dieses Salz wird in GEBAH nicht ausgewiesen, wird jedoch bei der Berechnung des GGV als „absolutes Restsalz“ mit berücksichtigt.
Aufgrund der Berechnungsmethodik entsprechend der Löslichkeit der Ionenverbindungen können alle hier genannten hypothetischen Salze nicht gleichzeitig auftreten, d. h. die Grundtypen im Genesemodell sind durch das Vorhandensein spezieller Berechnungssalze charakterisiert.
Das Bezugssalz der in GEBAH implementierten grundwassergenetischen Betrachtungsweise ist das Halit (NaCl). Es ist das salinare Dominanzsalz des geogenen Salzwasser-

stockwerkes und der Weltmeere (marines Salzwasserstockwerk). Letztendlich bildet NaCl den gemeinsamen Eckpunkt aller Grundtypen im Valjašhko-Diagramm (NaCl-Pol), der auch als Ausgangspunkt für die GGV- und SMK-Skala die entscheidende Bedeutung bei der Bewertung der Intensität der salinaren Stoffeinträge erlangt (Abb. 1).
Die in GEBAH ermittelten Lagepunkte sowie typischen Salzverhältnisse und Koeffizienten werden mit den Ergebnissen einer auf mathematisch-statistischer Basis durchgeführten Näherungsberechnung abgeglichen, die dann auch als Interpretationsgrundlage herangezogen wird. Sie reduziert Analysenfehler auf ein für die Berechnungsmethodik erforderliches Minimum, da sonst die grundwassergenetischen Ergebnisse nicht korrekt ermittelt werden können.
Im Folgenden werden die für die genetische Interpretation hydrogeochemischer Ergebnisse in GEBAH dargestellten Bewertungskriterien näher erläutert, die es ermöglichen, unabhängig von der tatsächlichen Ionenkonzentration der Lösung, Wässer gleicher genetischer Herkunft zu identifizieren.

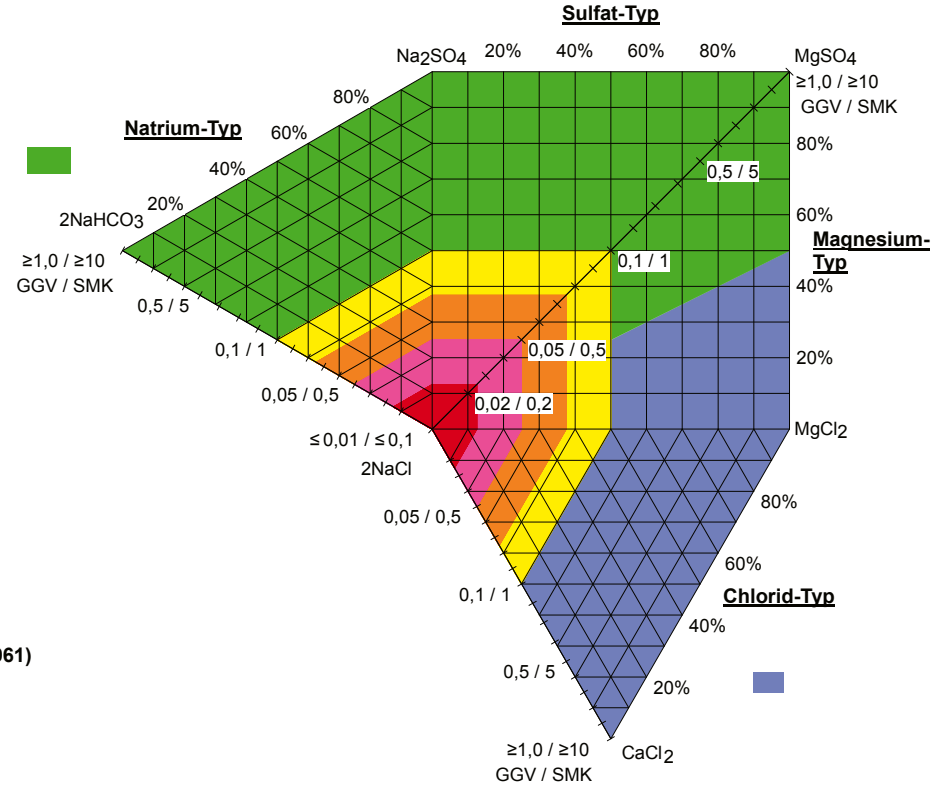
2. 1 Valjašhko-Lagepunkt LP (Valjašhko 1961)

Im Typendiagramm wird der Lagepunkt mit einem Kreis dargestellt (Abb. 1).
Durch den LP, der aus unterschiedlichen Anteilen der leichtlöslichen Berechnungssalze ($NaHCO_3$, Na_2SO_4, $MgSO_4$, $MgCl_2$, $CaCl_2$ sowie NaCl) resultiert, können Rückschlüsse auf die Speisungsanteile bzw. indirekt Verweilzeiten der Grundwasservorkommen geschlossen werden (siehe Brose & Hermsdorf in diesem Band). Diese Salze kennzeichnen jeweils die Eckpunkte des Valjašhko-Diagramms (Abb. 1) und somit die Abgrenzung der geochemischen Grundtypen.
Allen Berechnungstypen des Diagramms ist nur das NaCl gemeinsam. Das zweite in allen Typen auftretende Salz ist das hypothetische Salz $CaCO_3/Ca(HCO_3)_2$. Es wird im Diagramm nicht dargestellt, fließt jedoch als erstes schwerlösliches Berechnungssalz bei der geochemischen Typisierung (Sulfat-, Karbonat- und Chlorid-Typ) des Lösungsinhaltes mit ein. Auf Grund der besonderen Salinargefährdung des Karbonat-Typs nach Valjašhko wird im Genesemodell (Rechlin 1997) die Bezeichnung Natrium-Typ verwendet (Eckpunkte durch Na-Salze charakterisiert), um hier die für das Süßwasserstockwerk besondere Sensibilität aufzuzeigen. Diese oft schon statischen Wässer unterliegen aufgrund meist mächtig ausgebildeter hangender Deckschichten nicht mehr der aktuellen Grundwasserneubildung und weisen auf längere Verweilzeiten im Grundwasserleitersystem hin (siehe auch Bednorz & Brose in diesem Band). Diese sind daher bei hydraulischer Entlastung durch Brunnen und damit einhergehendem Abbau der statischen Grundwasservorräte bzw. Änderung des Druckpotenzials durch die Intrusion salinarer Tiefenwässer und eine Aktivierung von latenten Salzwasseraufstiegsbahnen besonders gefährdet.
Durch die indirekte Erfassung der schwerlöslichen Salze, insbesondere des in pleistozän geprägten Sedimenten dominanten $CaCO_3/Ca(HCO_3)_2$ ergibt sich für das Süßwasserstockwerk allerdings eine nur eingeschränkte direkte Vergleichbarkeit der Lagepunkte der geochemischen Typen im Valjašhko-Diagramm. Weiterhin werden die grundwassergenetisch wichtigen Kalium-Salze nicht dargestellt. Aus diesem Grund wurde als Ergebnis langjähriger hydrogeochemisch-genetischer Bewertungen das Lagepunktkonzept nach Valjašhko durch Rechlin (2008) um die Koeffizienten GGV und SMK erweitert.

2.2 Genetisches Grundverhältnis GGV (Rechlin 2008)

Im Typendiagramm wird das GGV durch ein X dargestellt (Abb. 1).
Das GGV ist ein kombiniertes Restsalz-Verhältnis und basiert auf den geochemischen Gesetzmäßigkeiten, denen die Prozesse bei der Eindunstung mariner Becken und der Entstehung von Salzgesteinen bis zum Ausfallen von Kaliumchlorid (KCl) im Sylvin-Stadium unterliegen. Es wird durch andere genetische Indikatoren präzisiert, aber auch ohne Einbeziehung dieser Koeffizienten ist eine erste orientierende Beurteilung zum Einfluss salinarer Wässer in den untersuchten GWL und Oberflächengewässern möglich, wenn nur das Basisverhältnis des GGV zu Grunde gelegt wird. Es wird beschrieben mit dem Koeffizienten: KCl (%)/NaCl (%). Im Programm GEBAH wird das komplexe GGV verwendet:
$\sum$ K-Salze (%)/(NaCl + NaBr + NH_4Cl +$FeCl_2$) (%)
Mit dem GGV erfolgt eine Trennung der nicht salinar von den salinar beeinflussten Wässern (im weitesten Sinne des Süßwassers vom Salzwasser). Des Weiteren werden durch die Betrachtung des KCl, dessen prozentualer Anteil in der Lösung auch von der Kalium-Sorption bei längeren Verweilzeiten im Grundwasser abhängt, ebenfalls Rückschlüsse auf die Transportwege des Grundwassers im jeweiligen Grundwasserleiterkomplex (GWLK) ermöglicht. Außer KCl können noch andere Kalium-Komponenten aus geogener und/oder anthropogener Ursache in der untersuchten Lösung enthalten sein, die sich entsprechend des hydrogeochemisch-genetischen Berechnungsverfahrens im Programm dann auch in den hypothetischen Salzen widerspiegeln [hier ist allerdings eine hohe Genauigkeit in der Abweichung der Ionenbilanz (e) i. d. R. $\leq$ 1 % Voraussetzung; Anmerkung: In GEBAH wird die Berechnung der Ionenbilanz nach den DVWK-Regeln 128/1992 „Entnahme und Untersuchungsumfang von Grundwasserproben“ vorgenommen und ausgewiesen]. Diese können signifikante Auswirkungen auf den Lagepunkt des GGV haben. Mit diesem grundlegenden Salzverhältnis werden einerseits die anthropogene Beeinflussung sowie die Verwitterung bzw. Sorption und andererseits die Stoffeinträge von Halit-Wässern aus dem liegenden Salzwasserstockwerk (untergeordnet auch Niederschlag aus verdunstendem Ozeanwasser) dargestellt.
In den GWL des Süßwasserstockwerkes zeigt ein GGV von > 0,1 an, 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 durch Kalium-Sorption geprägte Wässer und/oder schon auf die Anwesenheit salinarer Wässer hin. Auf dieser Grundlage erfolgt im Typendiagramm von GEBAH bei einem GGV < 0,1 in allen Grundtypen die Abgrenzung des Salinarfeldes

Informationsblatt



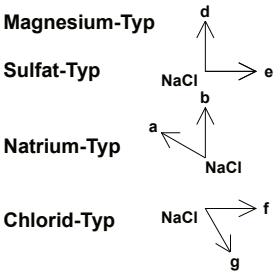
Diagrammflächen

Bereiche salinarer Wässer mit prägenden Anteilen des Halit-Salinars aus geogener und/oder anthropogener Ursache nach dem Lagepunkt (LP), dem Genetischen-Grund-Verhältnis (GGV) und dem Salinar-Matrix-Koeffizienten (SMK)

Bereich salinarer Wässer ohne prägende Anteile des Halit-Salinars

Nichtsalinare Wässer mit geogener und/oder anthropogener Prägung

LP-Koordinaten [○] **nach VALJAŠKO (1961)**



(Klassifikation LP wie GGV)

GGV-Klassifikation [×] **nach RECHLIN (2008)**

GGV = ∑ K-Salze / NaCl+NaBr+NH_4Cl+$FeCl_2$

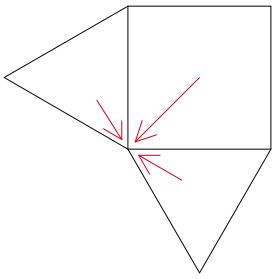
≥ 0,1	diffus (ohne prägende Anteile des Halit-Salinars)
< 0,1 ≥ 0,075	diffus migrierend und/oder Kalium-Sorption
< 0,075 ≥ 0,05	migrierend
< 0,05 ≥ 0,025	intrusiv migrierend
< 0,025	intrusiv

SMK-Klassifikation [□] **nach RECHLIN (2008)**

$$SMK = \frac{NaHCO_3 + MgSO_4 + Na_2SO_4 + MgCl_2 + K\text{-Salze} + NH4\text{-Salze} + NO3\text{-Salze}}{CaCl_2 + NaCl + NaBr}$$

> 1 nicht salinar **≤ 1 salinar**

Richtung der Zunahme des Eintrags von salinaren Wässern mit Halit-Dominanz



Maßgebend ist die Entwicklung von GGV und SMK

Erstellt mit GEBAH 1.3.02

Abb. 1: Hydrogeochemisches Genesemodell mit GGV- und SMK-Klassifikation (Rechlin 2008) im Programm GEBAH
Fig. 1: Leaflet of the Genesis Model with GGV- and SMK-classification (Rechlin 2008) in GEBAH

(Abb. 1). Wird beim GGV ein Wert von < 0,05 unterschritten (Magentafarbe im Salinarfeld), ist i. d. R. ein anthropogenes, vorzugsweise jedoch ein geogenes Salinar ausgebildet. Um hier die Anwesenheit von Streu- und Siliersalzen (naturbedingt gleiche genetische Herkunft wie geogenes Salinar) in der Lösung auszuschließen, ist eine Recherche der Flächennutzung im Einzugsgebiet unter Einbeziehung der geologischen Lagerungsverhältnisse unverzichtbare Bedingung.

Das GGV der Ozeane (marines Salzwasser) ist konstant < 0,05 und liegt unabhängig von der Konzentration [vgl. Bereiche Rotes Meer/Ostsee mit (!) gekennzeichnet] bei 0,03 (Tab. 1), jedoch immer über dem des unbeeinflussten geogenen Salzwasserstockwerkes (< 0,01). Das bedeutet Wässer gleicher genetischer Herkunft besitzen ein annähernd identisches GGV!
Dringen salinare Wässer des Tiefenwasserstockwerkes (GGV < 0,01) in das Süßwasserstockwerk ein, steigt das GGV durch die Verdünnung je nach Menge der in diesem verfügbaren oder auch aktivierbaren Vorratsanteilen an (zunehmende Entfernung zum NaCl-Pol) bzw. sinkt beim Abbau des förderfähigen Süßwasseranteils in umgekehrter Reihenfolge. Die genauere Spezifizierung des GGV erfolgt durch die Einbeziehung des SMK und die Interpretation der genetischen Berechnungssalze.

2.3 Salinar Matrix Koeffizient SMK (Rechlin 2008)

Im Diagramm wird der SMK mit einem Quadrat dargestellt (Abb. 1).
Im SMK werden sowohl die im Programm berechneten vergleichsweise leicht löslichen Salze, die den Natrium-, Sulfat- und Magnesium-Typ abgrenzen als auch die anthropogene Stoffeinträge beschreibenden, zusammengefasst. Sie charakterisieren den Süßwasseranteil der Grundwasservorkommen. Durch die Nichtberücksichtigung der schwerer löslichen Salze $Ca(HCO_3)_2$, $CaSO_4$ und $Mg(HCO_3)_2$, die in pleistozänen Wässern zusammen einen Anteil von > 50 % aufweisen, können Stoffeinträge des Halit-Salinars auch bei großer Verdünnung identifiziert werden. In diesem Fall sind der SMK ≤ 1und auch das GGV < 0,1. Die „Süßwassersalze“ werden mit den das Salzwasserstockwerk charakterisierenden Salzen $CaCl_2$, NaCl und NaBr in Beziehung gesetzt:

$$SMK = \frac{NaHCO_3 + MgSO_4 + Na_2SO_4 + MgCl_2 + K\text{-Salze} + NH_4\text{-Salze} + NO_3\text{-Salze}\ (\%)}{CaCl_2 + NaCl + NaBr\ (\%)} \quad \begin{array}{l} > 1 \text{ nicht salinar} \\ \leq 1 \text{ salinar} \end{array}$$

Herkunft	Orientierung	Datum	Cl^--Wert [mg/l]	GGV
Atlantik Norwegen Fjorde	N	18.06.2005	18.500	0,026
Atlantik Fuerteventura	↓	02.04.2005	21.400	0,025
Atlantik Brasilien	S	03.01.2004	22.200	0,027
Ostsee Zinnowitz	E	16.10.2003	3.700	0,028 !
Ostsee Wustrow	↓	16.04.2004	6.398	0,026 !
Nordsee Büsum	W	23.07.2002	14.200	0,024
Mittelmeer Zypern	E ↓	17.10.2002	22.928	0,026
Mittelmeer Mallorca	W	18.10.2002	22.006	0,026
Pazifik Kanada	N	22.09.2003	13.300	0,026
Pazifik Ecuador	↓	20.07.2003	19.900	0,027
Pazifik Chile Fjorde	S	16.03.2005	11.800	0,026
Indischer Ozean Mauritius		01.03.2004	20.300	0,027
Rotes Meer Ägypten		06.03.2006	24.200	0,027 !
Südchinesisches Meer Vietnam		01.04.2006	19.000	0,025
Karibik Miami		18.10.2003	17.800	0,024

Tab. 1: Ausgewählte Genetische Grundverhältnisse (GGV) von Meerwasser (aus Rechlin in Rechlin et al. 2010)

Tab. 1: Selected genetic ratios of marine water (Rechlin in Rechlin et al. 2010)

Das im Salzwasserstockwerk prägende $MgCl_2$ erreicht im Süßwasserstockwerk nur geringe prozentuale Anteile und kann im Gegensatz zu den salinaren Komponenten NaCl und $CaCl_2$ für die eindeutige Identifizierung Halit-salinarer Wässer nicht herangezogen werden. Als Berechnungssalz weist es vielmehr auf Wässer der Grundwasserneubildung mit längerer Verweildauer (Erdalkalisierung) oder noch ältere Wässer der Liegendspeisung mit oft organischem Hintergrund (z. B. Tertiär) hin. Als Echtsalz handelt es sich überwiegend um industrielle anthropogene Stoffeinträge wie beispielsweise Straßenlauge.

Im Diagramm erfolgt ebenfalls an der Grenze SMK $\leq 1/> 1$ eine Trennung von salinar und nicht salinar beeinflussten Wässern. Das korrespondiert mit dem durch das GGV $< 0{,}1/\geq 0{,}1$ abgegrenzten Salinarfeld (Abb. 1). Ein so identifizierter salinarer Stoffeintrag aus geogener und/oder anthropogener Ursache geht i. d. R. mit einem prozentualen Anteil von NaCl > 15 % am gesamten Lösungsinhalt einher.

Obwohl das GGV und der SMK auf unterschiedlichen Berechnungssalzen des Modells beruhen, korrespondieren beide über das prägende Bezugssalz NaCl und die Kalium-Salze miteinander, so dass sie grundsätzlich ähnliche Ergebnisse bei der Trennung der salinar von den nicht salinar beeinflussten Wässern aufweisen. Da der SMK weiterhin über die hypothetischen Salze der Grundtypen mit der Koordinatenberechnung des LP nach Valjašhko verbunden ist, kann mit seiner Hilfe die Süßwasserkomponente besser spezifiziert werden, d. h. bei Testpumpversuchen oder Zeitreihenuntersuchungen von Analysen die Zuspeisung nicht salinarer Wässer schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt relativ sicher verfolgt werden. Bei einer vergleichsweise starken Zunahme des SMK steigt das GGV hier vorerst nur moderat an oder bleibt nahezu konstant. Der SMK reagiert durch die Einbeziehung o. g. hypothetischer Salze in dieser Hinsicht wesentlich empfindlicher als das GGV. Der SMK wandert dann in Richtung des Außenrandes des Diagramms (weg vom NaCl-Pol) und geht bei Zunahme der stationären Vorratsanteile häufig mit einer Erhöhung der organischen Bestandteile des Grundwassers (NH_4, CSV_{Mn}, UV_{254}, DOC) einher [siehe Abb. 6 Grundwassermessstelle (GWM) Biegenbrück Oberpegel (OP)].

Durch die Vereinigung von Elementen des Valjašhko-LP als auch des GGV wird mit dem SMK eine Verifizierung der aus diesen gewonnenen Informationen ermöglicht. Das erlangt insbesondere bei der Unterscheidung Bedeutung, ob nach dem GGV schon ein salinarer Stoffeintrag oder aber noch Kalium-Sorption vorliegt. Ist letzteres gegeben, liegt der SMK (bei einer Lage des GGV im Salinarfeld hier i. d. R. im Bereich > 0,05 bis < 0,1) noch außerhalb des Salinarfeldes (s. Abb. 7 GWM Stechlin OP). Der SMK dient also vorzugsweise der Präzisierung der Aussage des GGV und des LP. Bei relativ stabiler Lage des SMK und GGV in Zeitreihenuntersuchungen befindet sich die Lösung in einem semistabilen Gleichgewicht der jeweiligen Vorratsanteile.

2.4 Interpretation der Lage bzw. deren Veränderungen von LP, GGV und SMK im Diagramm

Erst durch die zusammenhängende Betrachtung der in GEBAH dargestellten LP, GGV und SMK und die Korrelation ihrer Lagebeziehungen im Diagramm ist neben einer schon frühzeitigen Identifizierung salinarer bzw. nichtsalinarer Speisungsanteile unabhängig von der Konzentration der Lösung die Entwicklung der Zunahme bzw. des Abbaus der förderfähigen Grundwasservorräte (Süßwasserkomponente aus Grundwasserneubildung bzw. stationären Anteilen) prognostizierbar. Anhand der hier dargestellten Kombinationen sind im Wesentlichen folgende Aussagen ableitbar:

- Liegen das GGV und der SMK zwischen LP und Außenrand des Diagramms (Verbindung der Eckpunkte $NaHCO_3$, Na_2SO_4, $MgSO_4$, $MgCl_2$, $CaCl_2$ mit Lage gegenüber dem NaCl-Pol) und außerhalb des Salinarfeldes, ist ein anthropogener und/oder geogener salinarer Stoffeintrag vom Halit-Typ nicht ausgeprägt. Eine bevorstehende Salinarintrusion ist eher unwahrscheinlich.
- Liegen LP, GGV und SMK dicht beieinander, liefert dies einen ersten Hinweis auf eine möglicherweise unmittelbar bevorstehende Salzwasserintrusion. Dabei ist die absolute Chlorid (Cl^-)-Konzentration oftmals noch unauffällig ($Cl^- < 10$ mg/l), während das GGV und der SMK sich in einer Zeitreihe schon in Richtung des NaCl-Punktes bewegt haben.
- Liegt das GGV zwischen LP und Außenrand des Diagramms und innerhalb des Salinarfeldes, kann dies ein erstes Indiz für einen salinaren Stoffeintrag sein. Jedoch erst die Annäherung sowohl des GGV als auch des SMK an den LP, deutet auf den Beginn der Ausbildung einer salinaren Intrusionsfahne hin.
- Befindet sich das GGV zwischen LP und NaCl-Pol im Salinarfeld, weist das schon auf einen salinaren Stoffeintrag hin. Bewegt sich auch der SMK in Richtung des NaCl-Pols, ist eine Zunahme der Intensität einer salinaren Intrusion ausgeprägt.
- Befindet sich das GGV innerhalb und der LP außerhalb des Salinarfeldes, liefert der Abstand zwischen diesen einen Hinweis auf den noch förderfähigen Süßwasseranteil, d. h. je größer dieser Abstand, desto höher ist der noch verfügbare Grundwasservorrat. Wandert jedoch in Zeitreihenuntersuchungen der LP auf das GGV im Salinarfeld zu, ist ein Abbau dieser Vorratsanteile zu verzeichnen.

Grundsätzlich gilt, dass bei einer Lageänderung von LP, GGV und SMK in Richtung des NaCl-Pols das Vorhandensein salinar geprägter Wässer angezeigt wird. Nur in einem sehr frühen Entwicklungsstadium kann der SMK dabei nahezu konstant bleiben. Bei salinaren Stoffeinträgen reagiert das GGV am deutlichsten, gefolgt vom SMK und ermöglicht so, die Gefahr von Intrusionen salinarer Wässer sehr viel früher als bei alleiniger Betrachtung der Cl^--Konzentration und/oder des Valjašhko-Lagepunktes zu erkennen. Die alleinige Auswertung von Ganglinien des Chlorids lässt im Allgemeinen keine hinreichend sicheren Rückschlüsse auf zukünftige Entwicklungen zu.

Die Ausbildung von Salzwasserfahnen lässt sich hier erst dann erkennen, wenn diese schon konzentrationsrelevant geworden sind. Im Gegensatz dazu liefert insbesondere die systematische Veränderung des GGV zu einem erheblich früheren Zeitpunkt schon verlässliche Informationen, die mit dem SMK überprüft werden können. Die Cl^--Konzentrationen sind dabei oft noch unauffällig, und auch der LP nach Valjašhko zeigt zunächst nur undeutliche Veränderungen an. Vor diesem Hintergrund erlangt das GGV für die Salinar-Früherkennung, d. h. für die Prognose des besonders wichtigen Zeitpunktes des Beginns einer salinaren Intrusion die entscheidende Bedeutung.

2.5 Spezifizierung des GGV durch den SMK bei Betrachtung von Zeitreihen

Mit der Softwareversion GEBAH 1.3 wird durch die Darstellung des SMK wie oben beschrieben, das GGV präzisiert. Somit können die Aussagen zur Aktivierung von salinaren bzw. nicht salinaren Speisungsanteilen zu einem frühen Zeitpunkt noch weiter verfeinert werden. Das wird anhand folgender Kombinationen verdeutlicht:

- Wandern SMK und GGV zusammen in Richtung des Außenrandes des Diagramms, werden nicht salinare Wässer aktiviert.
- Wandert nur das GGV in Richtung des Außenrandes des Diagramms, der SMK bleibt jedoch nahezu konstant, liegt ein anthropogener und/oder geogener Stoffeintrag (z. B. organische Bestandteile aus nichtsalinarer Liegendspeisung) vor.
- Bleibt das GGV nahezu konstant und der SMK wandert in Richtung des Außenrandes des Diagramms, ist die Aktivierung einer Salzwasserfahne unwahrscheinlich.
- Wandert das GGV in Richtung des NaCl-Pols und der SMK bleibt konstant, liegt meist Kalium-Sorption vor. Unterschreitet das GGV hingegen einen Wert von 0,075, ist die beginnende Aktivierung einer Salzwasserfahne wahrscheinlich. Nur in Ausnahmefällen kann auch eine hochgradige Sorption vorliegen.
- Wandern GGV und SMK in kurzen zeitlichen Abständen in Richtung des NaCl-Pols, steht die Aktivierung einer salinaren Aufstiegsbahn unmittelbar bevor. Das Intrusionspotential erhöht sich, wenn sowohl GGV als auch SMK schon im Salinarfeld liegen, dann können auch die Cl^--Konzentrationen in kurzer Zeit erheblich ansteigen.
- Bei Anordnung des GGV im Salinarfeld zwischen SMK und Außenrand des Diagramms befinden sich die Süß- und Salzwasser-haltigen Vorratsanteile in einem semistabilen Gleichgewichtszustand, hier ist trotz der latenten Salzwassergefährdung eine signifikante Erhöhung des Intrusionspotenzials kurzfristig nicht zu erwarten.

Wird durch eine hydraulische Entlastung entweder durch GW-Entnahme und/oder Vorflutanbindung eine salinare Aufstiegsbahn aktiviert, erfolgt aufgrund ihres Druckpotenzials und ihrer höheren Dichte gegenüber dem Süßwasser eine „Platznahme“ des Salzwassers im beanspruchten GWL, die auch bei erheblicher Reduzierung der Förderleistung weitgehend stabil bleibt (Eigendynamik nach Rechlin & Lehmann 1982). Die Fahne bildet meist eine Aureole aus, deren Grenzen über das GGV und SMK gut zu diagnostizieren sind (Abb. 2). Veranschaulicht wird auch die Spezifizierung des GGV < 0,1 durch den SMK > 1,0 bei vorliegender Kalium-Sorption infolge längerer Verweilzeiten im salinar unbeeinflussten GWL.

2.6 Anwesenheit salinarer Wässer vom Halit-Typ

In GEBAH wird die Anwesenheit salinarer Wässer vom Halit-Typ ausgewiesen nach: nein/möglich/ja.
Für diese Einstufung werden die prozentualen Anteile von NaCl in der Lösung herangezogen (Tab. 2).
Bei einer Einstufung als „möglich“ ist ein geringer Anteil einer Salzwasserfahne schon erkennbar, die durch die hohe Verdünnung der Süßwasserkomponente aber noch einen diffusen Charakter aufweist.
Die Anwesenheit von Halit-Salinar kann allerdings im Natrium-Typ, der (wie unter Pkt. 2.1 beschrieben) grundsätzlich eine besondere Salinargefährdung aufweist, auch schon bei NaCl-Anteilen unter 10 % angezeigt werden, wenn das GGV zwischen LP und NaCl-Pol auch außerhalb des Salinarfeldes nicht weit entfernt vom SMK liegt. Die ursächlich vorhandenen salinaren Wässer werden in diesem Fall durch die nichtsalinaren Speisungsanteile überprägt, was durch einen relativ hohen SMK verdeutlicht wird.

Anwesenheit Halit-Salinar	NaCl (%)
nein	< 10
möglich	10–15
ja	> 15

Tab. 2: Bewertung der NaCl-Anteile in der Lösung
Tab. 2: Assessment of the amount of NaCl in solution

2.7 Bewertung des Intrusionspotenzials einer Salzwasserfahne nach LP und GGV

Anhand der Matrixkombination von LP und GGV erfolgt in GEBAH weiterhin eine Klassifizierung des Intrusionspotenzials einer Salzwasserfahne und Charakterisierung ihrer Mobilität von diffus-migrierend nach migrierend über intrusiv-migrierend bis hin zu intrusiv (s. Abb. 1 bei Brose & Hermsdorf in diesem Band). Maßgebend ist die Entwicklung des GGV, die Lage des LP im Diagramm modifiziert jedoch die ursächliche GGV-Einstufung (Abb. 1 und Tab. 3). Liegt beispielsweise das GGV in der Klasse der migrierenden Wässer (< 0,075) mit einem mittleren Intrusionspotenzial, der LP jedoch schon in unmittelbarer Nähe des NaCl-Pols, wird das Intrusionspotenzial der Lösung höhergestuft und als „hoch“ beurteilt. Werden durch das GGV (< 0,025) intrusive Wässer identifiziert,

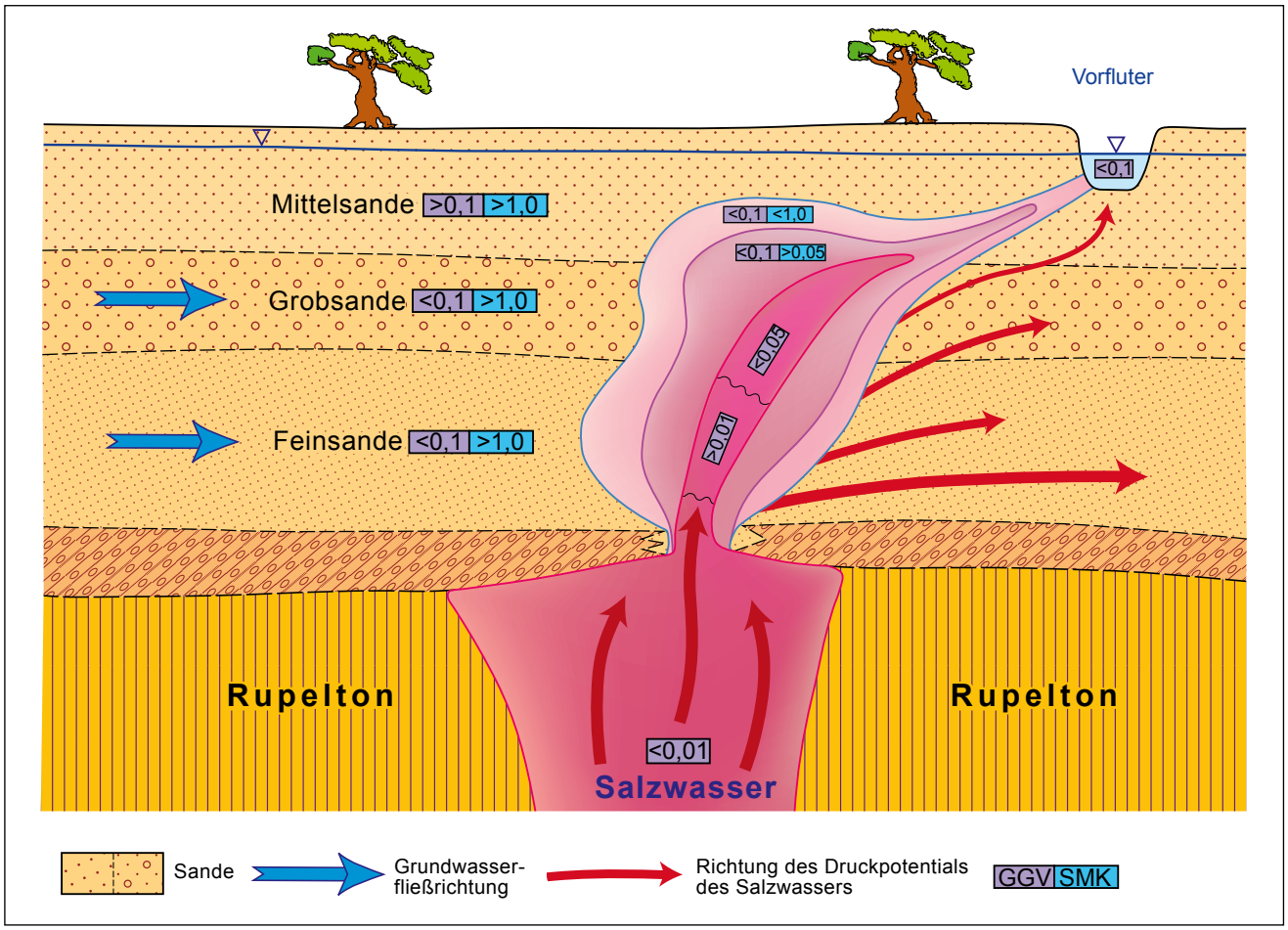


Abb. 2: Idealisierte Ausbildung einer Salzfahne in einem Süßwasser führenden Grundwasserleiter und Schematisierung mit Genetischem Grundverhältnis (GGV) und Salinarem Matrix Koeffizienten (SMK) (Rechlin in Rechlin et al. 2010)

Fig. 2: Idealized formation of a saltwater plume in a freshwater-bearing aquifer and schematization with GGV and SMK (Rechlin in Rechlin et al. 2010)

GGV	Mobilität	Intrusionspotenzial
≥ 0,1	diffus	ohne
< 0,1 ≥ 0,075	diffus-migrierend	gering
< 0,075 ≥ 0,05	migrierend	mittel
< 0,05 ≥ 0,025	intrusiv-migrierend	hoch
< 0,025	intrusiv	sehr hoch

Tab. 3: Mobilität und Intrusionspotenzial nach Zahlenwert des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) und Lagepunkt (LP)

Tab. 3: Mobility and intrusion potential calculated by GGV and LP

wird deren Intrusionspotenzial bei Lage des LP im Grenzbereich von salinaren und nicht salinaren Wässern (GGV < 0,1/≥ 0,1) herabgestuft und dann auch nur als „hoch“ und nicht als „sehr hoch“ bewertet. Somit wird eine detaillierte Bewertung des Verhaltens der salinaren Vorratsanteile ermöglicht.

3 Veranschaulichung der GEBAH-Interpretation anhand von Beispielgebieten

Zum besseren Verständnis soll die GEBAH-Systematik an einigen Beispielen veranschaulicht werden. Hierzu wurden insbesondere Standorte, in denen eine Beeinflussung des genutzten bzw. beobachteten GWL durch salinare Tiefenwässer gegeben ist, ausgewählt. Aber auch anhand von Referenzgebieten, wo diese Speisungsanteile noch nicht signifikant ausgeprägt sind und somit über-

wiegend der Grundwasserneubildung unterliegen, sollen die GEBAH-Ergebnisse erläutert werden. Die meisten der hier dargestellten hydrogeochemisch-genetischen Befunde wurden durch isotopenphysikalische Untersuchungen näher untersetzt. Im Beitrag BEDNORZ & BROSE in diesem Band werden diese Ergebnisse zusammen mit den geologischen Lagerungsverhältnissen ausführlich beschrieben.

3.1 WW Lindow-Gühlen

Der Förderbrunnen 3 des Wasserwerkes (WW) wurde aufgrund nachlassender Ergiebigkeit durch den Neubau des Brunnens 6 (Gühlen 1/06) in unmittelbarer Standortnähe im gleichen GWLK 2 ersetzt. Aufgrund der Salinarproblematik durch aufsteigende Tiefenwässer wurde nach Abschluss der Installationsarbeiten ein einwöchiger Pumpversuch (PV) am Förderbrunnen zur Beschreibung der hydrogeochemischen Entwicklung durch das LBGR fachlich begleitet. Hierzu erfolgte unmittelbar nach Beginn, in der Mitte und am Ende des PV eine Probenahme auf „geneserelevante“ und organische Summenparameter. In Abbildung 3 sind die mit GEBAH visualisierten genetischen Ergebnisse des PV und des jüngsten Förderzustandes (hierfür wurden dankenswerter Weise die Analysenergebnisse vom Trink- und Abwasserverband Lindow-Gransee übermittelt) dargestellt.

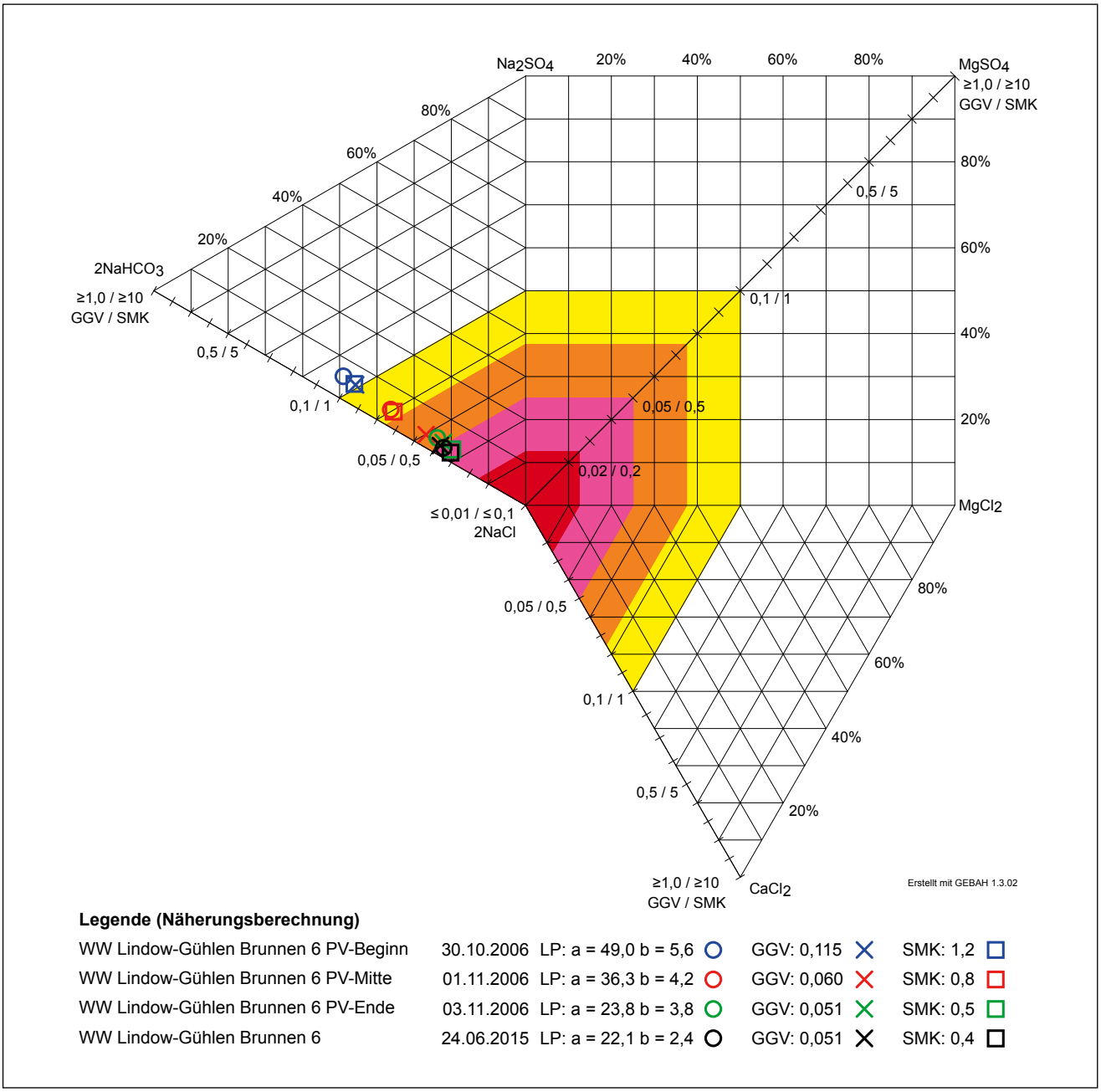


Abb. 3: Wasserwerk (WW) Lindow-Gühlen Förderbrunnen 6, genetische Bewertung mit GEBAH
GGV = Genetisches Grundverhältnis; SMK = Salinar Matrix Koeffizient; LP = Lagepunkt; PV = Pumpversuch
Fig. 3: Extraction well number 6 at the waterworks Lindow-Gühlen, the genetic assessment with GEBAH

Im Ruhezustand (30.10.2006) wird mit GEBAH schon bei einem Cl^--Gehalt von 12 mg/l aufgrund der dichten Lage von LP, GGV und SMK im Natrium-Typ am Rande des Salinarfeldes die Anwesenheit geogen-salinarer Wässer vom Halit-Typ als möglich eingestuft. Während des PV (01.11.2006) ist eine deutliche Wanderung des LP, GGV und SMK in Richtung NaCl-Pol bei nur moderatem Anstieg der Cl^--Werte auf 21 mg/l zu verzeichnen, wobei das GGV wie oben beschrieben am empfindlichsten reagiert. Diese Tendenz setzt sich zum Ende des PV (03.11.2006) mit weiterer Annäherung von LP und SMK an das GGV fort, die Cl^--Werte betragen auch jetzt nur 28 mg/l. Alle Lagepunktparameter weisen trotz geringer Cl^--Gehalte (!) auf Speisungsanteile salinarer Tiefenwässer hin. Für die Einstellung der Brunnenfahrweise (Erreichung eines semistabilen Gleichgewichtszustandes zwischen süß- und salzwasserhaltigen Vorratsanteilen) im Stadium der Früherkennung ist somit vor allem die Entwicklung des GGV maßgebend (die Cl^--Gehalte besitzen hierbei nur eine untergeordnete Bedeutung). Mit einer Grundlastförderung des Brunnens 6 von etwa 12 m³/h ist dieser Gleichgewichtszustand bei Cl^--Werten von ca. 50 mg/l und stabiler Lage von GGV, SMK und LP (letzte Analyse vom 24.06.2015) erreicht, so dass der Brunnen mit dieser Förderleistung ohne erkennbare Aufsalzungstendenz betrieben werden kann.

3.2 GWM Spreenhagen

Für die detaillierte Darstellung der hydrogeochemisch-genetischen Entwicklung wird hier exemplarisch der Mittelpegel (MP) dieser GWM (Ausbau 104–108 m u. GOK) ausgewählt. Abbildung 4 beinhaltet die derzeit letzte Vollanalyse des MP mit den Berechnungssalzen, GEBAH-Komponenten sowie die Cl^-- und GGV-Entwicklung seit Untersuchungsbeginn. Ersichtlich wird, dass auch schon bei einem Cl^--Wert von 33 mg/l mit einem GGV von 0,041, einem SMK von 0,6 und der unmittelbaren Nähe des LP deutlich salinare Speisungsanteile identifiziert werden. Auch der Anteil von NaCl mit ca. 29 % an der Lösung geht mit diesem Befund konform. Interessant ist, dass während des Untersuchungszeitraumes besonders seit 2012 eine Zunahme des Intrusionspotenzials (seit 2015 auffällig GGV < 0,05) im MP zu verzeichnen ist. Abbildung 5 veranschaulicht die Gesamtentwicklung im MP von LP, GGV und SMK im Beprobungszeitraum 2011 bis 2016. Korreliert man diese Entwicklung mit den bei der Probenahme gemessenen Wasserständen in den einzelnen Messstellen OP, MP, Unterpegel (UP)] sind folgende Schlussfolgerungen ableitbar:

- Der Wasserstand im OP (Ausbau im oberen unbedeckten GWL, 19–23 m u. GOK) ist unmittelbar niederschlagsabhängig, d. h. er unterliegt der aktuellen Grundwasserneubildung. Dieser genetische Befund wird durch Isotopenuntersuchungen gestützt (siehe Beitrag Bednorz & Brose).
- Die hydrogeochemisch-genetische Entwicklung des MP verläuft unabhängig vom Wasserspiegel des OP und der daraus resultierenden Druckdifferenz zu diesem. Auch bei zunehmenden Niederschlägen, die mit höheren GW-Ständen im OP einhergehen, vollzieht sich im Beprobungszeitraum eine Zunahme der salinaren Speisungsanteile im MP. Das bedeutet, dass eine Speisung des MP durch neubildungsgeprägte Wässer aufgrund der erbohrten mächtigen bindigen Deckschichten in unmittelbarer Standortnähe nicht stattfindet.
- Entscheidend für die geochemische Entwicklung des MP ist die Druckdifferenz zum „aufgesalzenen“ UP (Ausbau 131–135 m u. GOK; GGV ≤ 0,011, SMK ≤ 0,3, Cl^--Gehalte bis 582 mg/l). So korreliert die Zunahme der salinaren Speisungsanteile im MP mit einer Abnahme der Druckdifferenz zum UP.

Hier wird deutlich, dass die Wasserstandsentwicklungen im MP und UP nicht unmittelbar standortbezogen zu betrachten sind, sondern bei deren Beurteilung die Entwicklung im sehr weit entfernten Speisungsgebiet (sehr lange Aufenthaltszeiten im GWL-System, die durch Isotopenbefunde von mehreren tausend Jahren gestützt werden) maßgebend sind. Die „Erneuerung“ der nichtsalinaren stationären Komponente reagiert dementsprechend sehr zeitverzögert und verläuft abgekoppelt von den Niederschlagsereignissen im Standortbereich. Die großen Unterschiede des geochemischen Zustandes zwischen MP und UP sowohl in der GEBAH-Systematik als auch in der Mineralisation resultieren aus der Druckdifferenz, die durch diese trennenden bindigen Sedimente hervorgerufen werden. Diese GWM ist somit für die Beschreibung der hydrogeochemisch-genetischen Mechanismen im Rahmen der salinaren Früherkennung prädestiniert und daher weiterhin überwachungswürdig.

3.3 GWM Biegenbrück

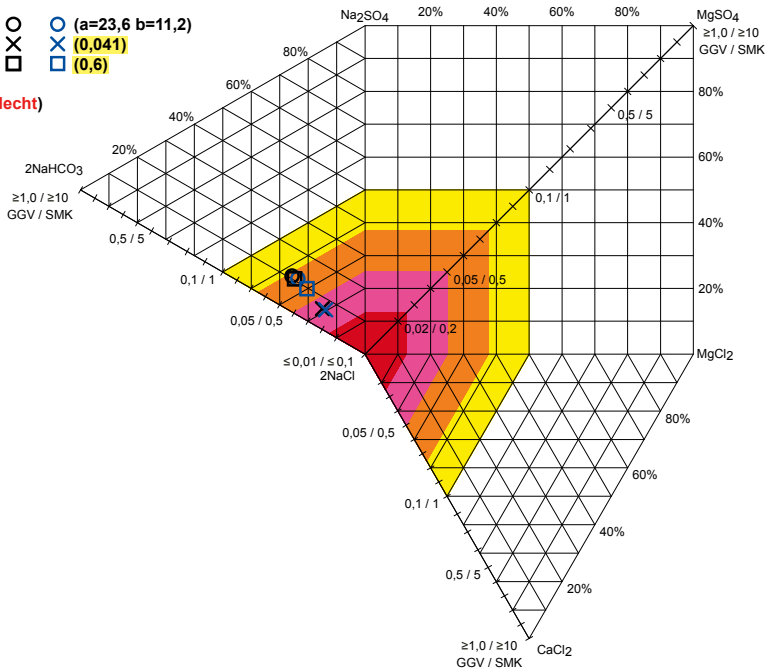
Im Rahmen des Salinarmonitorings des LBGR wurden auch hier zum Abgleich der hydrogeochemisch-genetischen Befunde an allen drei Messstellen (OP, MP, UP) Isotopenuntersuchungen vorgenommen. Die im tertiären GWL (GWLK 3) ausgebauten MP (Teufe 108–112 m) und UP (Teufe 160–164 m unmittelbar an der Rupelton-Oberkante) werden in GEBAH mit einem GGV 0,004 als intrusiv klassifiziert. Die Cl^--Werte im GWLK 3 liegen im Beprobungszeitraum bei 3 000 mg/l, d. h. es handelt sich um originäres Salzwasser im unmittelbaren Bereich einer aktiven Aufstiegsbahn aus dem Tiefenwasserstockwerk. Der im saalekaltzeitlichen GWLK 2 installierte OP (Teufe 29–33 m) ist durch mehrere Meter mächtige miozäne Braunkohlenschluffe vom GWLK 3 hydraulisch abgeschirmt. Genetisch werden stationäre nichtsalinare Wässer (GGV > 0,1, SMK >> 1) identifiziert (siehe Abb. 6). Durch die Isotopenuntersuchungen wurde der Anteil der alten Grundwasserneubildungs (GWN)-Komponente (ca. 53 a) am GW-Vorrat mit nur 10 % beziffert. Aufgrund der relativ stabilen Lage des GGV am Rande des Salinarfeldes und des hohen SMK ist eine unmittelbare Gefährdung durch salinare Tiefenwässer im OP bisher nicht gegeben. Hier handelt es sich überwiegend um eine nichtsalinare Liegendspeisung, die mit

Auswertung nach dem Genesemodell
Hy Spg 1/2011 MP ** 2016-08-30

Beschreibung: F 104-108 m u. GOK
Probennahmedatum: 30.08.2016 Labor: LLB
Vorortparameter: pH: 7,4; Lf: 298 [µS/cm];
Organische Parameter: DOC: 2,8 [mg/l]; UV254: 0,6 [1/m]

Legende
Lagepunkt Analyse / Näherung: (a=25,7 b=10,9) (a=23,6 b=11,2)
Lagepunkt GGV / Näherung: (0,043) (0,041)
Lagepunkt SMK / Näherung: (0,7) (0,6)
Bewertung ges. Analyse: mäßig
Bewertungen (Farbe): (gut, mäßig, schlecht)

Bilanz
Mineralisation: 225,045 mg/l (5,22 mmol/l)
Ionenbilanz: -0,0583 mmol/l (eq) -1,9088%
(DVWK 128/1992)

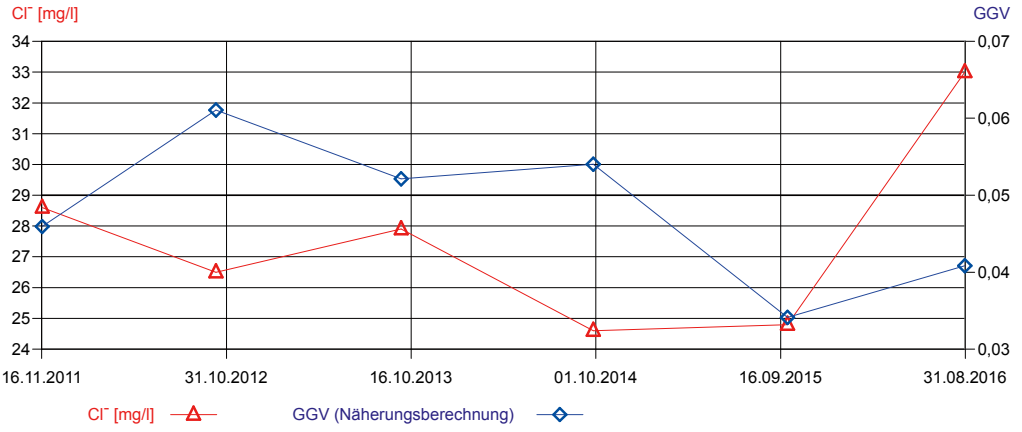


Anionen	Originalanalyse [mg/l]	[mmol/l (eq)]
HCO3	121,00	1,9844
SO4	7,7000	0,1602
Cl	33,000	0,9306
Br	<0,100	0,0006
NO3	<0,100	0,0008
B	0,0320	0,0089
I	0,0000	0,0000
NO2	<0,030	0,0003
PO4	0,2100	0,0066

Kationen	Originalanalyse [mg/l]	[mmol/l (eq)]
Ca	25,800	1,2874
Mg	3,9000	0,3206
Na	31,300	1,3616
K	1,4000	0,0358
NH4	0,1900	0,0105
Ba	0,0390	0,0006
Mn gel.	0,0490	0,0018
Mn ges.	0,0480	0,0017
Fe gel.	0,1950	0,0070
Fe ges.	0,2230	0,0080
Al	0,0000	0,0000
Zn	0,0000	0,0000

Berechnungssalze [%] - Originalanalyse / Näherung

Ca(HCO3)2	42,68/42,93	CaSO4	0,000/0,000	CaCl2	0,000/0,000	Ca(NO3)2	0,000/0,000	CaBr2	0,000/0,000
Mg(HCO3)2	10,63/10,62	MgSO4	0,000/0,000	MgCl2	0,000/0,000	Mg(NO3)2	0,000/0,000	MgBr2	0,000/0,000
NaHCO3	12,48/10,94	Na2SO4	5,309/5,206	NaCl	27,35/28,97	NaNO3	0,000/0,000	NaBr	0,021/0,020
KHCO3	0,000/0,000	K2SO4	0,000/0,000	KCl	1,188/1,188	KNO3	0,000/0,000	KBr	0,000/0,000
NH4HCO3	0,000/0,000	(NH4)2SO4	0,000/0,000	NH4Cl	0,354/0,095	NH4NO3	0,000/0,026	NH4Br	0,000/0,000
Karbonate	65,78/64,50	Sulfate	5,309/5,206	Chloride	28,89/30,25	Nitrate	0,000/0,026	Bromide	0,021/0,020



Orientierungen zum Salinar
Anwesenheit geogen-salinarer Wässer vom Halit-Typ: ja
Intrusionspotenzial geogen-salinarer Wässer vom Halit-Typ: hoch
Eignung der Messstelle für ein Salinarmonitoring: geeignet

Erstellt mit GEBAH 1.3.02

Abb. 4: Grundwassermessstelle Spreenhagen Mittelpegel (MP; 2016), genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 4: Monitoring well Spreenhagen MP (2016), the genetic assessment with GEBAH

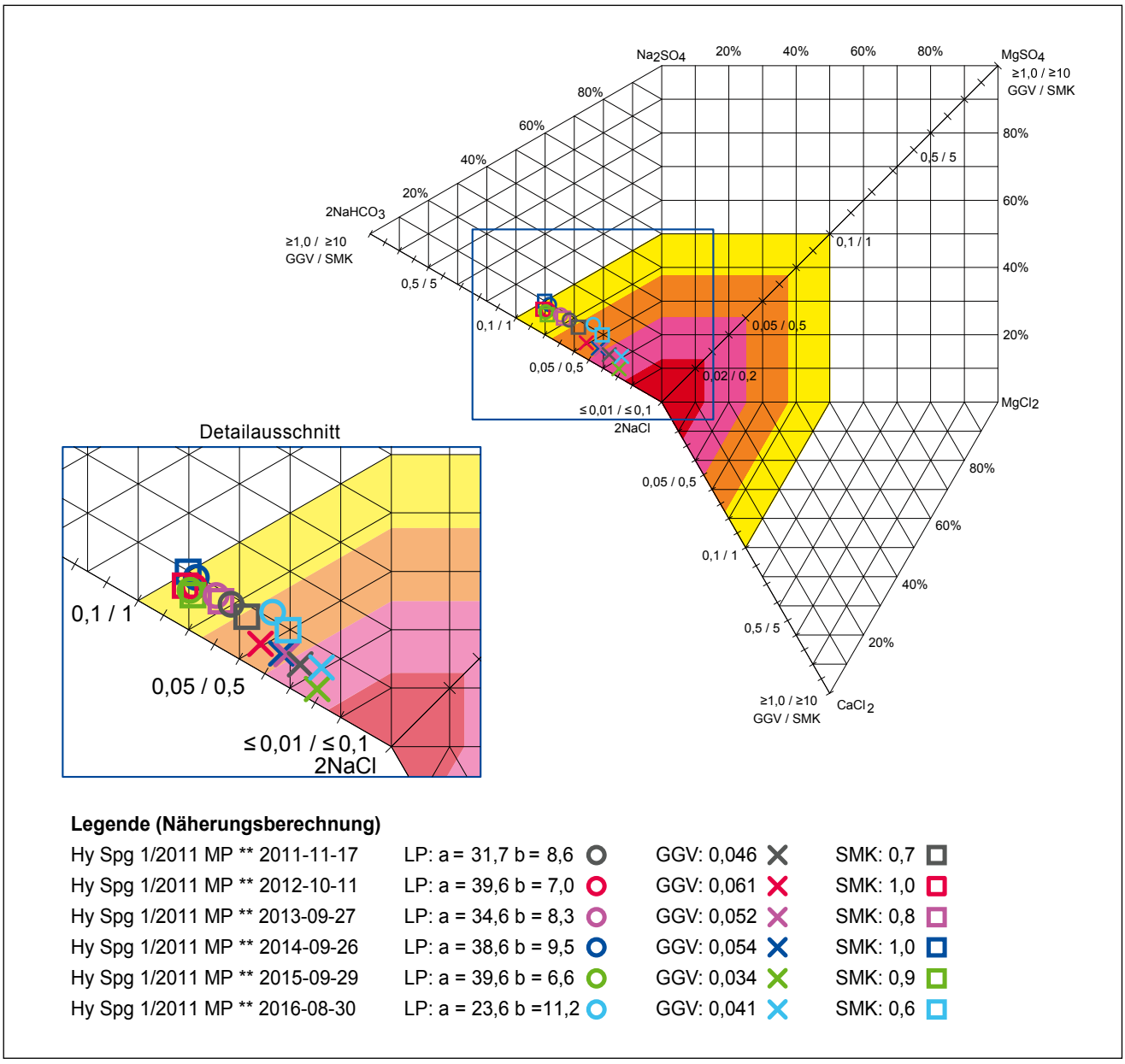


Abb. 5: Grundwassermessstelle Spreenhagen Mittelpegel (MP; Gesamtbild), genetische Bewertung mit GEBAH GGV = Genetisches Grundverhältnis; SMK = Salinar Matrix Koeffizient; LP = Lagepunkt
Fig. 5: Monitoring well Spreenhagen MP (general view), the genetic assessment with GEBAH

einer hohen organischen Belastung (vgl. DOC und UV_{254}) einhergeht (geogener Stoffeintrag). Der Abstand der Lagepunkte des SMK ist der Ungenauigkeit von 1,47 % in der Abweichung der Ionenbilanz geschuldet, deshalb wird die Qualität der Analyse auch nur mit „mäßig“ eingestuft. Aufgrund der Einordnung von LP, GGV und SMK ist dieses Analysenergebnis jedoch für eine genetische Interpretation insgesamt verwendbar.
Im Ergebnis der hier geschilderten Befunde (Ausbildung einer Salzwasserfahne im GWLK 3 und überwiegend stationäre Vorratsanteile im GWLK 2) ist auch diese GWM für die Beschreibung der hydrogeochemisch-genetischen Mechanismen im Rahmen der salinaren Früherkennung geeignet und weiter beobachtungswürdig.

3.4 GWM Neuglobsow

Diese Messstellengruppe wurde 2009 im Auftrag des LBGR im Rahmen des Salinarmonitorings errichtet. Sie befindet sich ca. 100 m landeinwärts am südöstlichen Ufer des Stechlinsees. Der Naturpark Stechlin ist durch die Ablagerungen der Weichsel-Kaltzeit geprägt. Er liegt zwischen der sogenannten Frankfurter Staffel im Süden sowie dem Fürstenberger Halt des Brandenburger Stadiums im Norden. Im Vorland des Fürstenberger Halts sind große Sanderflächen ausgebildet, deren Oberflächen von ca. 80 bis 100 m NN östlich des Stechlinsees bis auf 60 m NN im Bereich des Köpernitzsees abfallen. Die Schmelzwassersande bilden insgesamt einen bis zu 50 m mächtigen oberen unbedeckten GWL (GWLK 1), der

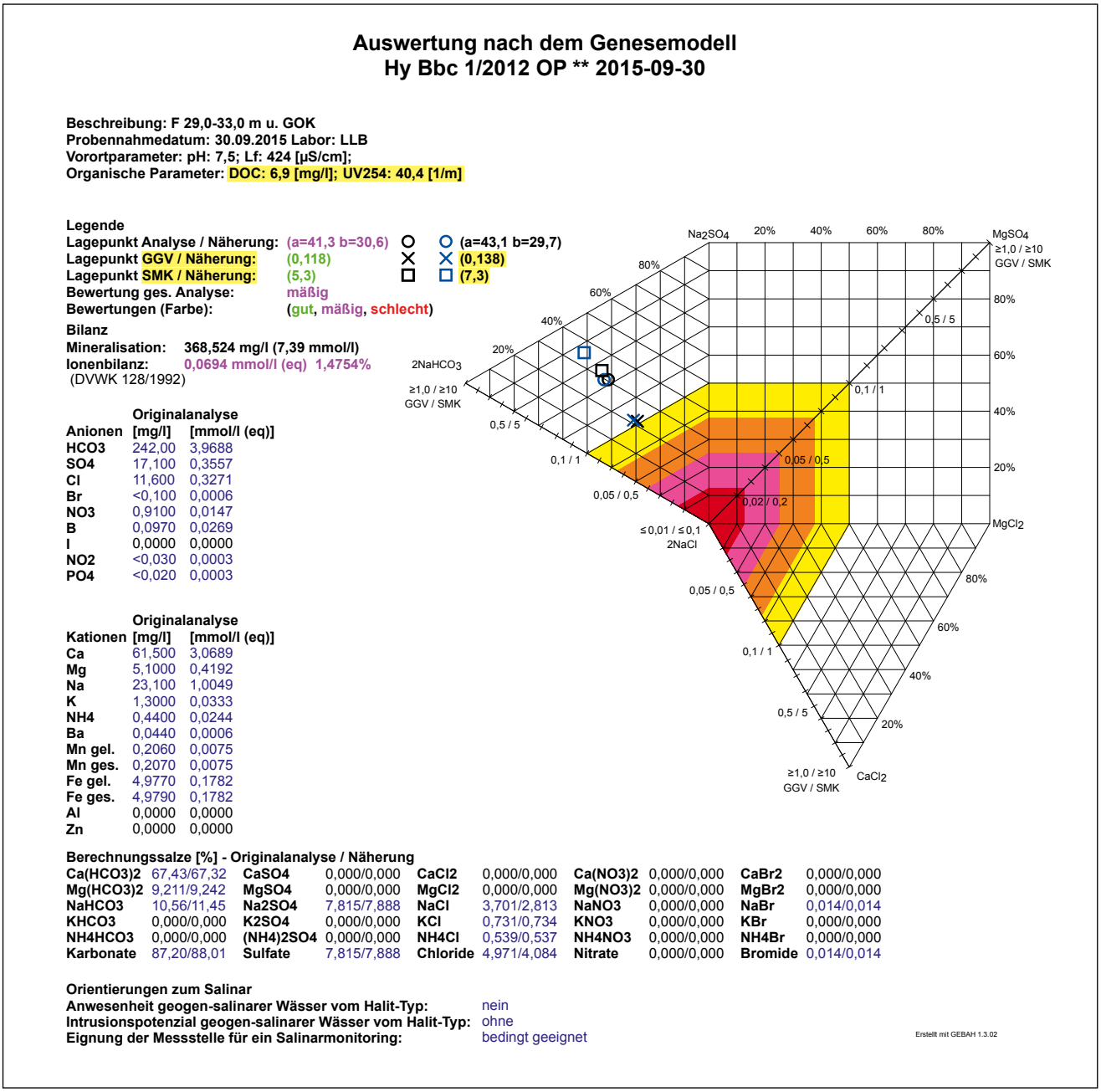


Abb. 6: Grundwassermessstelle Biegenbrück Oberpegel (OP; 2015), genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 6: Monitoring well Biegenbrück OP (2015), the genetic assessment with GEBAH

als Hauptgrundwasserleiter des Gebietes fungiert. Der OP wurde über den gesamten erbohrten Bereich des GWLK 1 mit einem Langfilter unmittelbar unter dem Ruhewasserspiegel in einer Teufe zwischen 4 bis 31 m und direkt über dem Saale-Geschiebemergel installiert. Der MP (Teufe 80–86 m) und der UP (Teufe 164–168 m) sind in den miozänen Sanden ausgebaut. Im Jahr 2010 wurde die Messstellengruppe um den UP-Tief (UPT), mit Ausbau in einem Teufenbereich von 226–231 m innerhalb der Cottbuser Schichten unmittelbar über der erbohrten Rupel-Folge, erweitert. Im UPT ist mit einem GGV < 0,01 (Cl^--Gehalte bis 600 mg/l) ein intrusives Salinar ausgebildet. Im UP und MP hingegen sind diese salinaren Speisungsanteile (GGV > 0,1) nicht mehr identifizierbar.

Die Spezifizierung des GGV < 0,1 (Lage im Salinarfeld) durch den SMK wird in Abbildung 7 anhand der Vollanalyse des OP in 2011 ersichtlich. Für die hydrogeochemisch-genetische Verifizierung wurden in diesem Jahr gleichzeitig Isotopenuntersuchungen vorgenommen. Das GGV mit 0,053 und der SMK von 1,1 weisen hier auf Kalium-Sorption aufgrund längerer Verweilzeiten im GWLK 1 hin. Die Dominanz der nichtsalinaren Komponente wird durch die isotopenphysikalischen Ergebnisse gestützt, die einen Jungwasser- bzw. GWN-Anteil von 100 % ausweisen. Den gealterten Neubildungswässern konnte durch die Tritium-/Helium3-Befunde eine Verweilzeit von etwa 33 a zugewiesen werden. Der Abstand zwischen LP (genetisch GWN)

Auswertung nach dem Genesemodell
Hy Ngw 1/2009 OP ** 2011-09-27

Beschreibung: F 4,0-31,0 m u. GOK; Alter $^3H/^3He$ 33a, Jungwasseranteil 100 %
Probennahmedatum: 27.09.2011 Labor: LLB
Vorortparameter: pH: 7,6; Lf: 557 [µS/cm];
Organische Parameter: DOC: 1,7 [mg/l]; UV254: 2,3 [1/m]

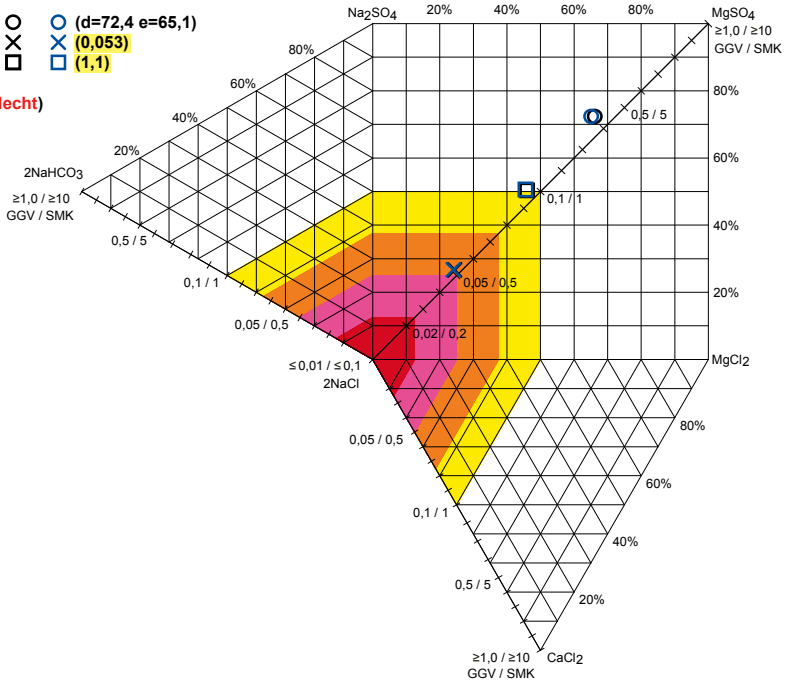
Legende

Lagepunkt Analyse / Näherung:	(d=72,4 e=66,2)	**(d=72,4 e=65,1)**
Lagepunkt GGV / Näherung:	(0,053)	**(0,053)**
Lagepunkt SMK / Näherung:	(1,1)	**(1,1)**
Bewertung ges. Analyse:	mäßig	
Bewertungen (Farbe):	(gut, mäßig, schlecht)	

Bilanz
Mineralisation: 447,179 mg/l (8,53 mmol/l)
Ionenbilanz: 0,0258 mmol/l (eq) 0,4359%
(DVWK 128/1992)

Anionen	Originalanalyse [mg/l]	[mmol/l (eq)]
HCO3	242,00	3,9688
SO4	66,400	1,3811
Cl	18,700	0,5273
Br	<0,100	0,0006
NO3	1,6400	0,0264
B	0,0150	0,0042
I	0,0000	0,0000
NO2	<0,100	0,0011
PO4	0,0500	0,0016

Kationen	Originalanalyse [mg/l]	[mmol/l (eq)]
Ca	96,600	4,8203
Mg	5,0000	0,4110
Na	15,300	0,6656
K	1,1000	0,0282
NH4	0,0900	0,0050
Ba	0,0050	0,0001
Mn gel.	0,0410	0,0015
Mn ges.	0,0770	0,0028
Fe gel.	<0,020	0,0004
Fe ges.	0,1990	0,0071
Al	<0,010	0,0006
Zn	0,0080	0,0002



Berechnungssalze [%] - Originalanalyse / Näherung

Ca(HCO3)2	67,21/67,22	**CaSO4**	14,42/14,12	**CaCl2**	0,000/0,000	**Ca(NO3)2**	0,000/0,000	**CaBr2**	0,000/0,000
Mg(HCO3)2	0,000/0,000	**MgSO4**	6,960/6,933	**MgCl2**	0,000/0,000	**Mg(NO3)2**	0,000/0,000	**MgBr2**	0,000/0,000
NaHCO3	0,000/0,000	**Na2SO4**	2,008/2,343	**NaCl**	8,931/8,883	**NaNO3**	0,322/0,000	**NaBr**	0,011/0,011
KHCO3	0,000/0,000	**K2SO4**	0,000/0,000	**KCl**	0,000/0,048	**KNO3**	0,135/0,427	**KBr**	0,000/0,000
NH4HCO3	0,000/0,000	**(NH4)2SO4**	0,000/0,000	**NH4Cl**	0,000/0,000	**NH4NO3**	0,000/0,021	**NH4Br**	0,000/0,000
Karbonate	67,21/67,22	**Sulfate**	23,39/23,39	**Chloride**	8,931/8,932	**Nitrate**	0,456/0,447	**Bromide**	0,011/0,011

Orientierungen zum Salinar

Anwesenheit geogen-salinarer Wässer vom Halit-Typ:	ja
Intrusionspotenzial geogen-salinarer Wässer vom Halit-Typ:	sehr gering
Eignung der Messstelle für ein Salinarmonitoring:	geeignet

Erstellt mit GEBAH 1.3.02

Abb. 7: Grundwassermessstelle Neuglobsow Oberpegel (OP; 2011), genetische Bewertung mit GEBAH
Fig. 7: Monitoring well Neuglobsow OP (2011), the genetic assessment with GEBAH

und GGV liefert zudem einen Hinweis auf den förderfähigen GW-Vorrat. Tritt bei hydraulischer Aktivierung, z. B. durch WW- oder Beregnungsbrunnen, in Zeitreihen eine Verringerung dieses Abstandes durch Wanderung des LP in Richtung GGV auf, werden diese durch GWN erneuerbaren Vorratsanteile abgebaut. Bewegen sich in dem Zusammenhang das GGV und auch der SMK in Richtung NaCl-Pol, kann eine damit einhergehende Speisung salinarer Tiefenwässer schon frühzeitig diagnostiziert werden. Hier sei nochmals darauf verwiesen, dass eine Aufsalzung in jedem genetischen Grundtyp, der durch die jeweils vorherrschenden Speisungsbedingungen charakterisiert wird, auftreten kann. Der Übersicht halber beschränkt sich die Darstellung der Aufsalzungsmechanismen anhand von Abbildungen in diesem Beitrag vorrangig auf den Natrium-Typ. Beispiele für geogen-salinare Speisungsanteile sowohl im Sulfat-Typ (WW Mildenberg) als auch im Magnesium-Typ (WW Flatow) finden sich in dem Beitrag von Bednorz & Brose in diesem Band.

Danksagung

Für die freundliche Durchsicht des Manuskriptes bedanke ich mich bei Herrn Berthold Rechlin, Potsdam.

Zusammenfassung

Für die frühzeitige und konzentrationsunabhängige Identifizierung salinarer Stoffeinträge steht seit 2011 die anwenderorientierte Software GEBAH zur Verfügung, die im Auftrag des LBGR durch die programmierende Firma GCI GmbH vertrieben wird. In diesem Beitrag erfolgt die Erläuterung der GEBAH-Systematik mit Beschreibung der Identifikatoren GGV, SMK und LP, die anhand von ausgewählten Beispielgebieten veranschaulicht wird.
Die Früherkennung geogen-salinarer Speisungsanteile besitzt vor allem bei der Nutzung der Grundwasservorräte durch WW-Betrieb für die langfristige Sicherstellung der Trinkwassergewinnung eine außerordentlich große Bedeutung. Aber auch für die Aufrechterhaltung des Förderbetriebes von Mineralwasservorkommen, die strengen Qualitätsanforderungen im Hinblick auf die Mineralisation unterliegen, ist die frühzeitige Identifizierung von salinaren Stoffeinträgen unabdingbar. Bereits im Vorfeld von signifikanten, i. d. R. irreversiblen negativen Beschaffenheitsänderungen durch Salzwasserintrusionen (Anstieg der Cl^--Konzentrationen über Trinkwasserverordnung (TVO)-Grenzwert und/oder organische Belastungen u. a. durch Huminsäuren) kann somit durch die rechtzeitige Anpassung der Brunnenfahrweise bzw. Optimierung der Brunnenstandorte gegengesteuert werden.

Summary

Since 2011, the user-oriented software GEBAH, which has been developed by the company GCI GmbH on behalf of LBGR, has been available for the early and concentration-independent identification of saline chemical inputs. This article explains the GEBAH systematics with a description of the GGV (genetic basic ratio), SMK (saline matrix coefficient) and LP (Valjašhko location point) identifiers, illustrated by selected sample areas.
The early detection of geogenic-saline feeding components is extremely important for the long-term reliability of drinking water production, especially in the use of groundwater resources by waterworks. However, early identification of saline inputs is also essential for the maintenance of mineral water deposits that are subject to strict quality requirements regarding mineralization. Even in the preliminary stages of significant, usually irreversible negative changes in the quality of saltwater intrusions (increase in Cl^- concentrations above the TVO limit and/or organic pollution due to humic acids, among other things) the well operation and optimization of well locations can thus be counteracted by early adaptation.

Literatur

Rechlin, B. & Lehmann, H.-W. (1982): Bericht zu den geologischen und hydrogeochemischen Verhältnissen im Raum Potsdam-Stahnsdorf-Saarmund unter besonderer Berücksichtigung der Nutheniederung südöstlich von Potsdam. – Bericht Rat des Bezirkes Potsdam, Abt. Geologie, 89 Bl., Potsdam (unveröff.)

Rechlin, B. (1997): Zur Anwendung des Hydrogeochemischen Genesemodells der Wässer in den Grundwasserleiterkomplexen des Landes Brandenburg (mittelbrandenburgischer Raum, Stand April 1997). – Brandenburg. geowiss. Beitr. **4**, 1, S. 67–71

Rechlin, B. (2008): Eine Methode zur konzentrationsunabhängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in süßwasserführende Grundwasserleiter und Oberflächengewässer. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 57–68

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. u. a. (1961): Geochemie der Halokinese. In: Sb. Tr. Geol. Fakut. Moskau, Izdat. Mosk. Univ. (russ.)

Anschrift des Autors:

Dipl.-Geol. Dietmar Brose
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
Dezernat Hydrogeologie
Inselstraße 26
03046 Cottbus
dietmar.brose@lbgr.brandenburg.de