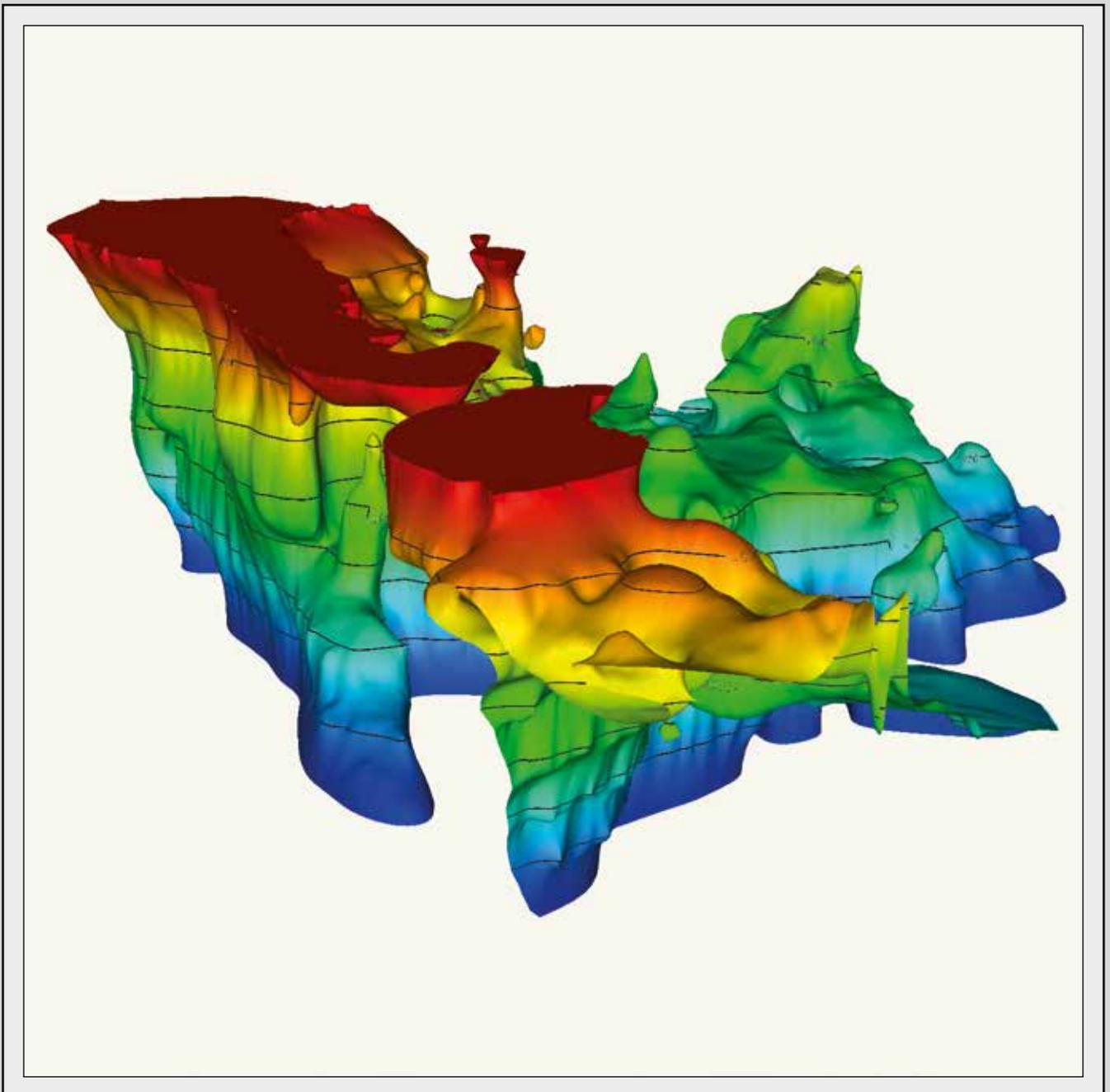


1/2
2017

Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge

Grundwasserversalzung in Brandenburg



Titelbild (zum Beitrag PETZOLD et al., S. 17):

3D-Darstellung der Salzwasserintrusion (rot) im Untersuchungsgebiet Freienbrink

Herausgeber: © Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, Präsident: Hans-Georg Thiem
Inselstr. 26, 03046 Cottbus
Telefon: (0355) 48640-0, Telefax: (0355) 48640-510, e-mail: lbgr@lbgr.brandenburg.de, Internet: www.lbgr.brandenburg.de

Schriftleitung: Dr. Jaqueline Strahl

Redaktionsbeirat: Dr. Jaqueline Strahl, Dr. Werner Stackebrandt, Dr. Hans Ulrich Thieke, Angelika Seidemann,
Prof. Dr. Ralf-Otto Niedermeyer, Alexander Limberg, Prof. Dr. Thomas Raab

Fachredaktion: Dr. Jaqueline Strahl
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
Inselstr. 26, 03046 Cottbus
Tel. (0355) 48640-156, Fax (0355) 48640-510, e-mail: jaqueline.strahl@lbgr.brandenburg.de, <http://www.lbgr.brandenburg.de>

Hinweise zur Abfassung der Manuskripte sind auf der 3. Umschlagseite des Heftes angegeben.
Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

Erscheinungsweise: Die Schriftenreihe erscheint i. d. R. jährlich in einem Doppelheft. Gebühr für dieses Heft: 12,00 €

Layout, Satz und Druck: LGB (Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg)

Printed in Germany
ISSN 0947-1995

**Geophysikalische und hydrochemische
Untersuchungen zur
Grundwasserversalzung in Brandenburg**

	INHALT	CONTENTS	Seite
HANS-GEORG THIEM	Vorwort	Foreword	5
DIETMAR BROSE & ANGELA HERMSDORF	Geogene Versalzung von Grundwasserleitern in Brandenburg	Geogenic salinization in aquifers of Brandenburg	7–16
HELLFRIED PETZOLD, UWE KABOTH & ANGELA SONNTAG	Geoelektrische Untersuchungen von Salzwasserintrusionen in Süßwasser führende Grundwasserleiter und Oberflächengewässer	Geophysical investigation of saltwater intrusions into freshwater aquifers and surface water	17–27
RAINER HERD & WLAD SCHAFRIK	Detektion der Süß-/ Salzwassergrenze mittels geoelektrischer und elektromagnetischer Verfahren – Beispielhafte Untersuchungen an einem Standort westlich der Stadt Müllrose	Detection of the freshwater/ saltwater boundary with geoelectric and electromagnetic methods – exemplary investigations west of the city of Müllrose	29–37
MARTIN LEHMER & UWE KABOTH	Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen zum Salzwassermonitoring in Brandenburg – raumzeitliche Charakterisierung der Süß-/Salzwassergrenze	Well-logging analysis for the monitoring of salt water in Brandenburg – spatiotemporal characterisation of the salt water level	39–51
DIETMAR SCHÄFER, KARSTEN ZÜHLKE & SILVIA DINSE	Modellbasierte geohydraulische Systemanalyse zur Salinar- und Huminstoffproblematik im Wasserwerk Potsdam-Leipziger Straße als Grundlage von Bewirtschaftungsempfehlungen	Model-based geohydraulic system analysis to localize influx of saline deep water and humic substances at the waterworks Potsdam-Leipziger Straße as basis of recommendations for management	53–67
DIETMAR BROSE	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	69–82
FALK BEDNORZ & DIETMAR BROSE	Altersdatierung mittels Isotopenanalytik zur Verweilzeitbestimmung und Identifizierung von Speisungsanteilen des Grundwassers in Brandenburg	Isotope age dating for residence time estimation and identification of different groundwater influx portions in fresh water aquifers of Brandenburg	83–101
GERHARD HOTZAN	Ergebnisse von Untersuchungen zur Identifikation und Verbreitung salinärer Wässer im Raum Müllrose	Results from investigations for identification and dissamination of saline waters in the region Müllrose	103–109
ANGELA HERMSDORF & NORMAN PYRITZ	Das Salzwassermonitoring im Land Brandenburg	The salt water monitoring in Brandenburg	111–128

	INHALT	CONTENTS	Seite
	Kurzmitteilungen	Short news	
HELGE ALBERT & ANKE BEBIOLKA	Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e. V. – 28. traditionelle 1. Mai-Exkursion 2017 – Bunte Seen und große „Schuppen“ im Muskauer Faltenbogen		28
	Buchbesprechung		
OLAF JUSCHUS	Physische Geographie der Meere und Küsten – Studienbücher der Geographie		38

Sehr geehrte Leser,

wenn es um den Schutz unserer Grundwasservorkommen geht, wird dieser in der Öffentlichkeit oftmals in Zusammenhang mit Maßnahmen gegen anthropogene Stoffeinträge, vor allem aus landwirtschaftlicher und gewerblicher Nutzung sowie Altlasten gebracht. Aber die Süßwasser führenden Grundwasserleiter unterliegen auch einer Gefährdung durch geogene Prozesse, die durch menschliche Einwirkung durchaus verstärkt und beschleunigt werden können.

Der vorliegende Sonderband beschäftigt sich in diesem Zusammenhang mit aufsteigendem Salzwasser aus der Tiefe, das für die Wasserversorger bei der Bewirtschaftung der Grundwasserlagerstätten seit den 1980er Jahren eine zunehmende Herausforderung darstellt. So kam es bereits zu massiven Qualitätsbeeinträchtigungen durch saline Tiefenwässer, die zu einer unmittelbaren Gefährdung der Trinkwassergewinnung führten. Daher beschäftigt sich das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) seit geraumer Zeit mit den Prozessen und Ausbreitungsmechanismen sowie der Früherkennung dieser Wässer. Vor diesem Hintergrund wurde durch die Hydrogeologen des Geologischen Dienstes von Brandenburg im LBGR ein Salzwasserkolloquium veranstaltet, das den Wasserversorgungsunternehmen, den Wasserbehörden sowie den Fachplanern den aktuellen Kenntnisstand und angewandte Erkundungsmethoden präsentierte. Aufgrund der großen Nachfrage und des Interesses der Teilnehmer soll dieser Sonderband des LBGR den erworbenen Erfahrungsschatz im Umgang mit Aufsalzungserscheinungen in den wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserleitern darstellen.



Neben einer allgemeinen Einführung in die Salzwasserproblematik im Land Brandenburg enthält dieser Sonderband Beiträge zu geophysikalischen Erkundungsmethoden der Süß-/Salzwassergrenze, zur hydrogeochemisch-genetischen Früherkennung und Altersbestimmung salinärer Wässer, zu Modellierungen und Klassifizierungen von Versalzungserscheinungen mit letztendlichem Ausblick auf das landesweite Salinarmonitoring. Durch die Bündelung des Kenntnisstandes zur geogenen Binnenversalzung wird ein Überblick über die ablaufenden Prozesse und Möglichkeiten der Identifizierung von Salzwasseraufstiegsbahnen gegeben. Eine außerordentlich große Bedeutung erlangt hierbei die Früherkennung geogen-salinärer Speisungsanteile für die langfristige Sicherstellung der Trinkwassergewinnung. Aber auch unter wirtschaftlichen Aspekten, besonders für die Aufrechterhaltung des Förderbetriebes der in Brandenburg angesiedelten Mineralwasserunternehmen, ist die frühzeitige Identifizierung von salinaren Stoffeinträgen existentiell.

So wurde auf Grundlage des Fachwissens des LBGR ein Ersatzwasserfassungs-Standort in einem salinar beeinträchtigten Grundwasserkörper im Raum Kersdorf für das Wasserwerk Briesen ausgewiesen. Durch Einsatz der entwickelten geophysikalischen Erkundungsmethoden konnte der hydrogeochemisch kartierte Kenntnisstand zur Salzwasserverbreitung sowie den Speisungsbedingungen des für die Trinkwassergewinnung vorgesehenen Grundwasserleiters präzisiert und auf dieser Grundlage die Anordnung von Messstellen und Förderbrunnen projektiert werden. Unter aktiver fachlicher Begleitung des LBGR laufen derzeit die Erkundungsarbeiten mit Errichtung der entsprechenden Grundwassermessstellen und der Fassungstrasse.

Die hier publizierten Erkenntnisse sollen dazu beitragen, vor allem bei salinärer Beeinflussung von Wasserfassungs- und Mineralwasserstandorten rechtzeitig durch die Optimierung der Fahrweise von Brunnen zu reagieren und gegenzusteuern.

A handwritten signature in black ink that reads "Hans-Georg Thiem". The signature is stylized and includes a large, sweeping flourish at the end.

Hans-Georg Thiem
Präsident
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 7–16	5 Abb., 2 Tab., 23 Zit.
------------------------------	---------	----------------	---------	-------------------------

Geogene Versalzung von Grundwasserleitern in Brandenburg

Geogenic salinization in aquifers of Brandenburg

DIETMAR BROSE & ANGELA HERMSDORF

1 Exkurs

Dieser Beitrag gibt eine allgemeine Einführung in die Salz-wasserproblematik im Land Brandenburg und erläutert wichtige geologische Grundlagen sowie die Aufstiegsmechanismen salinärer Tiefenwässer in das Süßwasserstockwerk des norddeutschen Tieflandes. Die in diesem Band folgenden Beiträge befassen sich detailliert mit den Methoden der salinaren Früherkennung, der Beschreibung von Erkundungsmethoden der Süß-/Salzwassergrenze im Untergrund und der Modellierung der Ausbreitung von Salzwasserfahnen sowie den diesbezüglichen Monitoringsystemen im Land.

Das Auftreten von Versalzungserscheinungen in unserer Region wird immer noch als geologische Besonderheit angesehen. Jedoch beschäftigten sich bereits seit dem 19. Jahrhundert Botaniker intensiv mit den an der Erdoberfläche vorkommenden Salzstellen im küstenfernen Bereich des Binnenlandes. Aufmerksam geworden durch die für brandenburgische Verhältnisse untypische Flora, kartierten sie halophytische sowie halophile Pflanzen und untersuchten auch teilweise die Salzgehalte im Boden und im Wasser. Hauptsächlich KLÖDEN (1828) und ASCHERSON (1859) waren im 19. Jahrhundert wegbereitend und bemüht, eine vollständige Erfassung der Salzstellen im Land Brandenburg zu erreichen. Anfang des 20. Jahrhunderts erfolgte durch ASCHERSON (1912) eine weitere Dokumentation, die dann vor allem in den 1960er Jahren und später durch MÜLLER-STOLL & GÖTZ (1962, 1993) erweitert wurde. Aktuell sei auf das EU-LIFE-Projekt (NUL 2010) in Brandenburg verwiesen, welches sich mit den hydrogeologischen, bodenkundlichen und botanischen Grundlagen sowie den Maßnahmen zur Erhaltung oberflächennaher Salzwasseraustritte beschäftigt.

Im genannten EU-LIFE-Projekt ist versucht worden, sich mit der Begrifflichkeit „Versalzung“ auseinander zu setzen (HERMSDORF 2010). Jedoch sind die damaligen diskutierten Ansätze von DAVIS & DE WIEST (1967) sowie GRUBE & WICHMANN (2000) für Brandenburg unpraktikabel. Zum einen kann das Grundwasser bei diesen Festlegungen bereits eine erst schwache geogene Versalzung aufweisen. Zum anderen

ist es für weiterführende Arbeiten wichtig, die Früherkennung der Grundwasserversalzung zu forcieren, um bei unerwünschten Entwicklungen wasserwirtschaftlich entsprechend reagieren zu können. Mittlerweile kann man davon ausgehen, dass sich die ausschließliche Berücksichtigung der Konzentrationsbetrachtungen von Chlorid (Cl⁻) oder auch Sulfat (SO₄²⁻) überholt hat, diese jedoch weiterhin als Orientierungs- oder Schwellenwerte dienen können. Wichtiger sind neben Konzentrationsüberlegungen in der Lösung nunmehr die Bewertung der Anteile hypothetischer Salze hauptsächlich von Natriumchlorid (NaCl) und Kaliumchlorid (KCl) sowie die Betrachtung von Salinarverhältnissen und -koeffizienten wie das Genetische Grundverhältnis (GGV) und der Salinar Matrix Koeffizient (SMK; RECHLIN 2008).

Obwohl die Versalzung durch die NaCl-Wässer in Brandenburg prägend ist, treten auch Calciumsulfat (CaSO₄) beeinflusste Salzwässer wie z. B. im Gebiet des Salzstockes Blankensee in Mittelbrandenburg auf. Eine generelle Ausnahme bilden Wässer mit einem hohen prozentualen Anteil von Calciumchlorid (CaCl₂ > 10 %), mit erhöhtem eigendynamischen Druckpotential (Salzwasserartereser), die direkt aus dem Salzwasserstockwerk aufsteigen (RECHLIN & LEHMANN 1982).

In Brandenburg kann als Indikator für eine geogene Versalzung des Grundwassers die Über- bzw. Unterschreitung der in Tabelle 1 genannten Parameter herangezogen werden. Diese Orientierungswerte beruhen auf langjährigen Erfahrungen mit dem Programm GEBAH (RECHLIN et al. 2010).

Parameter	Wert	Einheit
Cl ⁻	> 15	mg/l
Berechnungssalz NaCl	> 15	%
GGV	< 0,1	-
SMK	≤ 1	-

Tab. 1: Orientierungsanzeiger für salinare Stoffeinträge im Süßwasserstockwerk in Brandenburg

Tab. 1: Indicator of saltwater intrusion of freshwater aquifers

Diese Parameter müssen im Zusammenhang betrachtet werden, die Anwesenheit von „anthropogenen Salzen“, wie Streu- und Siliersalze ist vorher auszuschließen.

2 Hydrogeologische Rahmenbedingungen von geogenen Salzwasserintrusionen in das Süßwasserstockwerk

Geogene Versalzungen in den Süßwasser führenden Grundwasserleitern (GWL) entstehen in Norddeutschland durch die Intrusion von Meerwasser (marine Versalzung) und den Aufstieg von hoch mineralisierten Tiefenwässern und Salzstockablaugungen (geogene Versalzung). Tiefenwasserantrieb und Salzstockablaugungen werden als Binnenversalzung zusammengefasst, die auch für den Brandenburger Raum typisch sind (Abb. 1). Für das Land Brandenburg fungiert hauptsächlich der unteroligozäne Rupelton als Haupttrennhorizont zwischen dem hoch mineralisierten Tiefenwasserstockwerk und den oberflächennahen, Süßwasser führenden Grundwasserleiterkomplexen (GWLK) der tertiären und quartären Lockergesteine (Abb. 1; HERMSDORF 2006). Nur in der Lausitz übernehmen ältere Tonmergelsteine (meist Keuper) diese trennende Funktion. Die Oberfläche des Rupeltons, der durchschnittlich 80–100 m Mächtigkeit erreicht, liegt bei ca. -200 bis -100 m NN. Durch erosive Gletscheraktivitäten bzw. deren Schmelzwässer und/oder halokinetische Bewegungen der Salzstrukturen wurden Schwächezonen bis hin zu Fehlstellen im Rupelton (u. a. LIMBERG et al. 2016) geschaffen, die es ermöglichen, dass die salinaren Tiefenwässer auf Grund ihres Druckgradienten aufsteigen können. Kommen hydraulisch wirksame Vorflutsysteme als Entlastungsgebiete hinzu, kann sogar die Gelän-

doberfläche erreicht werden, wie zahlreiche Binnensalzstellen dokumentieren. Auch die Druckentlastungen durch Wasserwerksbetrieb begünstigen den Aufstieg von geogenen Tiefenwässern in den beeinflussten Einzugsgebietsteilen.

Der glazialeustatische und -isostatisch dirigierte Einfluss der Weltmeere auf die Dynamik und Zusammensetzung des Grundwassers in unserem Raum wurde mit dem o. g. Aufbau terrestrischer Sedimentfolgen zunehmend differenziert und modifiziert. Dem „hydrogeologischen Hauptzyklus“ wurden mächtigkeits-, relief- und stoffabhängige regionale Zyklen zugeordnet oder aufgesetzt (ZIESCHANG 1974). Sie waren und sind nur noch entfernt vom Niveau des Meeresspiegels, dafür aber zunehmend von der Relief- und Vorflutsituation und vom Klima abhängig. Neubildungsgebiete (Druckaufbaugebiete) stehen regionalen Niederungsgebieten (Entlastungszonen) gegenüber. Abhängig von Höhenunterschieden, Lagerungsverhältnissen und geohydraulischen Wirkungskräften können in diesen Entlastungsgebieten ergiebige Grundwasseraustritte oder Liegendspeisungen auftreten. Hierbei kommt der Betrachtung der Grenzfläche zwischen Süß- und Salzwasser und somit dem hydrostatischen Gleichgewicht eine entscheidende Bedeutung zu. BADON-GHYBEN (1889) und HERZBERG (1901; beide in ZIESCHANG 1974) beschrieben damals bereits diesen Zustand quantitativ, so dass die Position der Grenzfläche berechnet werden kann. Dieses sogenannte BGH-Prinzip lässt sich theoretisch zwar berechnen, jedoch nur schwer in die Natur übertragen. Weiterhin wird sich mit diesen hydraulischen Phänomenen in verschiedener Literatur auch bis zur heutigen Zeit beschäftigt (HANEMANN & SCHIRRMESTER 1998, GRUBE et al. 2000), wobei es eine Herausforderung für die hydraulische Modellierung ist, derartige Tiefenwässeraufstiege plausibel nachzuvollziehen.

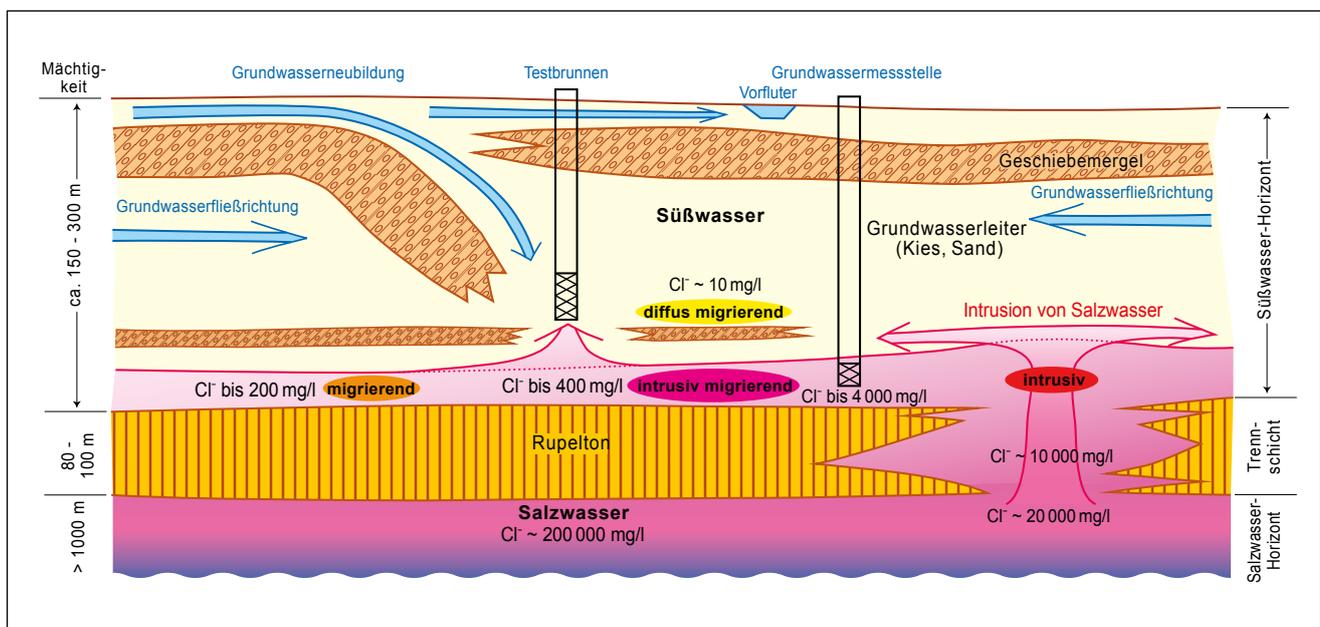


Abb. 1: Prinzipskizze Salzwaterintrusion (Vortrag RECHLIN 2005, leicht verändert nach HERMSDORF 2010 und ergänzt durch BROSE 2017)

Fig. 1: Schematic figure shows the principal process of saltwater intrusion.

So sprechen GRUBE et al. (2000) von Untersuchungen tieferer GWL, die gegenüber genutzten GWL ein sehr hohes Druckpotenzial aufweisen. Sie beschreiben die Dynamik der Süß-/Salzwassergrenze mit den entsprechenden wirksamen Einflussfaktoren, wie u. a. die Nähe zur Salzstruktur, Morphologie, Grundwasserneubildung, Wasserwegsamkeiten und Durchflussmengen. In den damaligen Berechnungen wird bei einem Anstieg oder Absenken des Süßwasserpotenzials um 1 m von einer Erniedrigung bzw. Hebung der Süß-/Salzwassergrenze von 38 m ausgegangen.

Technische Eingriffe, wie Grundwasserabsenkungen sowohl in Brunnen aber auch bei Grundwasserhaltungsmaßnahmen im Rahmen von Bauvorhaben können aufgrund der Druckentlastung im Bereich des Absenkungstrichters, insbesondere im Schwankungsbereich der Grundwasseroberfläche, Änderungen in der Beschaffenheit nach sich ziehen (u. a. Sulfat- und Nitratbelastungen). Diese künstlichen Druckentlastungen können ähnlich wie in Niederungsgebieten in geogenen Schwächezonen den Aufstieg von salinaren Tiefenwässern induzieren, so dass die Süß-/Salzwassergrenze angehoben wird. Bei einer radialsymmetrischen Anströmung findet die maximale Anhebung dieser Grenze direkt unter einem Brunnen statt, da hier die größte Entlastung erfolgt. Es entsteht also unter dem Absenktrichter des Entnahmebrunnens ein sogenannter „Upconing“ (Abb. 2). Aufgrund des niedrigeren hydraulischen Potenzials im Brunnenzentrum strömt das Wasser aus den umliegenden Bereichen in das Brunnenzentrum. Gleichzeitig aber kommt es auch zu einem Aufstieg des tiefergelegenen Salzwassers. Diese Aufwärtsbewegung des Salzwassers lässt sich nur vermeiden, indem ein entsprechendes Gegengewicht zu dem aufgestiegenen Salzwasser aufgebaut wird, z. B. durch

Reinfiltration eines Teilstromes des Förderwassers unterhalb der betroffenen Brunnen.

3 Hydrogeochemisch-genetische Bewertungsmethoden zur Früherkennung von Salzwasserintrusionen

Insbesondere für die Früherkennung der Versalzungsmechanismen im Süßwasserstockwerk wurde beginnend im damaligen Landesamt für Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) das Genesemodell entwickelt (RECHLIN 1997), dessen Arbeiten im jetzigen Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) kontinuierlich fortgeführt werden. Voraussetzung für eine frühzeitige Identifizierung von Anteilen salinärer Wässer ist die konzentrationsunabhängige Betrachtung des Grundwassers, um auch schon in geringen Mineralisationsbereichen (< 300 mg/l) etwaige Aufsalzungserscheinungen im süßwasserführenden Grundwasser ermitteln und gegebenenfalls rechtzeitig Abwehrmaßnahmen entwickeln zu können.

Die Grundlage für die Entwicklung des Genesemodells bildete das Geochemische Typendiagramm von VALJAŠKO u. a. (1961), das ursprünglich für die Bewertung hochkonzentrierter Lösungen und den aus ihrer Eindunstung entstehenden Salzgesteinen entwickelt wurde. Dies geschah in der damaligen Sowjetunion vor dem Hintergrund der Untersuchungsarbeiten für die Kalisalzerkundung. Die erfolgreiche Anwendung des Verfahrens auf das geringer mineralisierte Süßwasserstockwerk erfolgte durch RECHLIN etwa ab 1980. So konnte mit dem VALJAŠKO-Konzept auf der Grundlage genauer Kenntnisse der hydrogeologischen Verhältnisse

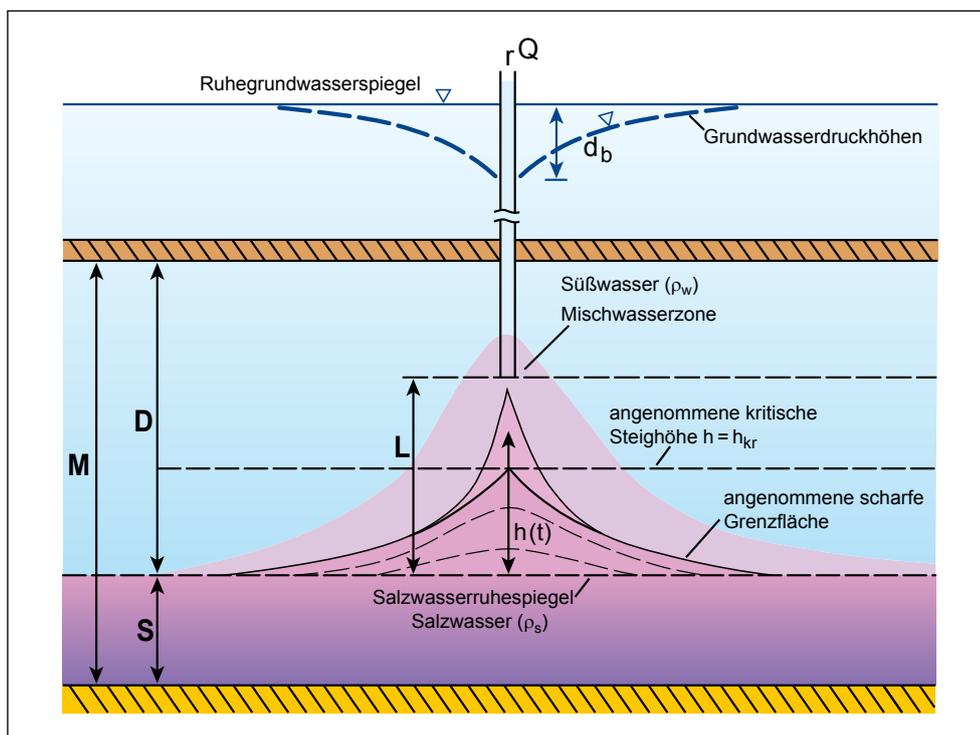


Abb. 2:
 Salzwasseraufstieg unter einem Vertikalbrunnen (nach PANTELEIT 2004)
 M – Mächtigkeit der Grundwasserleiterkomplexe (GWLK) gesamt in m;
 S – Mächtigkeit des Salzwasser beeinflussten Grundwassers in m;
 D – Mächtigkeit des unbeeinflussten Grundwassers in m;
 L – Abstand Salzwasserspiegel – Unterkante Filterrohr in m;
 r^Q – geförderte Menge in Zeiteinheit;
 d_b – Absenkungstrichter in m;
 $h(t)$ – Anstieg des Salzwasserspiegels in Zeiteinheit

Fig. 2:
 Saltwater upconing beneath a pumping well (after PANTELEIT 2004)

der Einzugsgebiete untersuchter Wasserwerke eine deutlich bessere Beurteilung der hydrogeochemischen Situation und daraus abgeleiteter Speisungsanteile der Grundwasservorkommen erreicht werden. Im Ergebnis dessen erfolgte die Erarbeitung erster Grundsätze der Betriebsweise von salinar gefährdeten Wasserwerken und deren Test in der Praxis (RECHLIN 1987).

Die Anwendbarkeit dieser Herangehensweise wurde 1986 letztendlich durch die Erarbeitung eines Förderregimes für das durch Salzwasserintrusion im Jahre 1983 in Teilen nicht mehr förderfähige Wasserwerk (WW) Potsdam „Leipziger Straße“ nachgewiesen. Durch die genetische Identifizierung der nutzbaren Süßwasseranteile aus aktueller Grundwasserneubildung und des Ufer- und Seebodenfiltrats sowie der statischen nicht oder nur noch eingeschränkt am Wasserkreislauf teilnehmenden Grundwasservorkommen konnte der Einfluss der salinaren Wässer auf den genutzten Hauptgrundwasserleiter auch bei großer Verdünnung schon sicher beurteilt werden. Auf dieser Grundlage wurde der Weiterbetrieb dieses WW sogar mit Steigerung der Bedarfsspitzen ohne wesentliche qualitative Beeinträchtigungen gesichert (RECHLIN 1987). Aufbauend auf diese sehr positiven Ergebnisse erfolgte die Weiterentwicklung zum Genesemodell, das nunmehr grundwassergenetische Indikatoren auf der Basis von hypothetischen Berechnungssalzen nutzt.

Die nach der LBGR-Nomenklatur (MANHENKE et al. 1995) ausgehaltenen GWLK weisen entsprechend der geologischen Lagerungsverhältnisse typische Ionenzusammensetzungen der Wässer auf, mit deren Hilfe eine genetische Typisierung vorgenommen werden kann. Im Genesemodell erfolgt eine Berechnung der in dissoziierter Form vorliegenden Hauptinhaltsstoffe des Grundwassers im Lockergestein (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe/Mn (gelöst), Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- sowie der N-Komponenten) zu hypothetischen Salzen entsprechend der Löslichkeit ihrer Ionenverbindungen. Neben der Konzentrationsunabhängigkeit liegt der Vorteil der Methodik darin, dass für die Berechnungen im Wesentlichen die nach den jeweils geltenden gesetzlichen Vorschriften ohnehin zu erhebenden o. g. Hauptparameter für die Grundwasseranalytik verwendet werden. Für eine sichere genetische Interpretation müssen allerdings generell sehr hohe Genauigkeitsanforderungen an die Analytik [Abweichung der Ionenbilanz (e) i. d. R. $\leq 1\%$] gewährleistet werden, die in der Laborpraxis auch im Routinebetrieb nachweislich sichergestellt werden können. Insbesondere bei Gesamtmineralisationen $< 300 \text{ mg/l}$ ist die Einhaltung dieser Prämisse unverzichtbar.

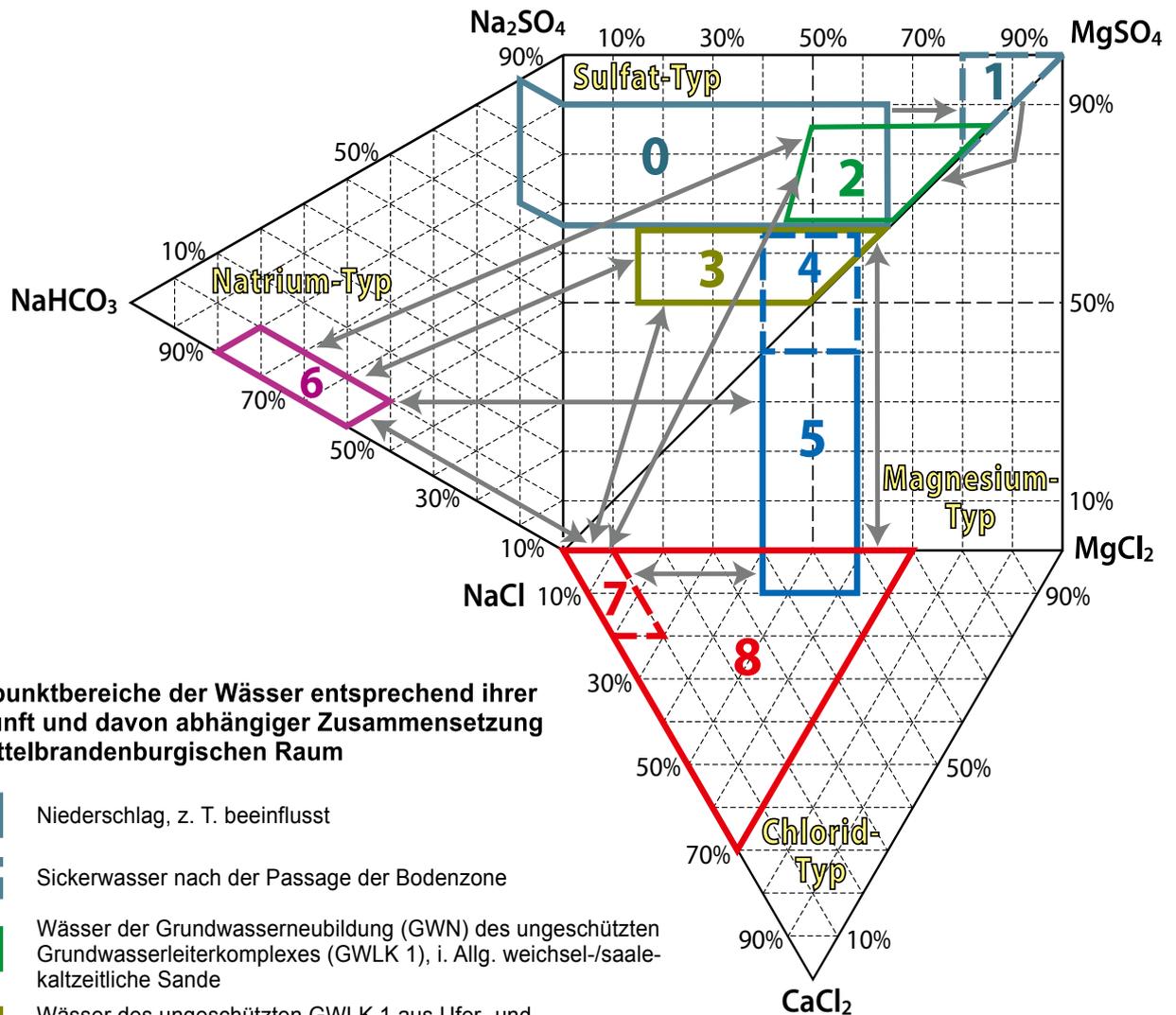
Die Zuordnung der Wässer zu genetischen Grundtypen (Abb. 3) erfolgt nach den Verhältnissen der Moläquivalente der Karbonat- und Sulfationen zu den Moläquivalenten der Calcium- und Magnesiumionen. Eine ausführliche Beschreibung der Grundtypen (Natrium-, Sulfat-, Magnesium- und Chlorid-Typ) sowie der Berechnungsmatrix der Lagepunkte im Typendiagramm nach VALJAŠHKO u. a. (1961) findet sich in RECHLIN (1997). Die Eckpunkte des Diagramms werden durch die jeweils leichtlöslichen Salze des entsprechenden

Grundtyps gekennzeichnet, aus deren prozentuaem Verhältnis zueinander der Lagepunkt in diesem resultiert. Da das Verhältnis dieser Salze je nach Zusammensetzung der Wässer variieren kann, kommen verschiedene Lagepunkte in diesem Diagramm zustande, die somit unterschiedlichen empirisch ermittelten Speisungsanteilen zugeordnet werden können. Den gemeinsamen Eckpunkt aller Grundtypen bildet das Salz NaCl . Dieser Eckpunkt erlangt somit die entscheidende Bedeutung bei der Bewertung der Intensität der salinaren Stoffeinträge.

Mit dem Genesemodell nach RECHLIN ist es möglich, die Herkunft der Grundwässer im Lockergestein zu identifizieren, weiterhin können unter Berücksichtigung des Grundwasserfließgeschehens indirekt Aussagen zu den geologischen Lagerungsverhältnissen und daraus ableitbar zum Geschütztheitsgrad der Grundwasserleiter auch zwischen einzelnen Bohraufschlüssen bei geringer Erkundungsdichte getroffen werden (Abb. 4).

Der GWLK 1 wird durch neubildungsgeprägte Wässer charakterisiert, die Sulfat angereichert sind (bestimmend ist das hypothetische Salz CaSO_4), entsprechend des Auftretens auch der leichter löslichen Sulfat-Salze Na_2SO_4 und MgSO_4 werden diese Wässer im Genesemodell dem Sulfat-Typ zugeordnet. Auf seiner Passage durch den Untergrund unterliegt das Grundwasser vielfältigen hydrogeochemischen Prozessen. Im Ergebnis dessen seien beispielhaft die Kalium-Sorption, Sulfat-Reduktion und die Anreicherung der Erdalkalien Calcium und Magnesium (Kationenaustauschprozesse) genannt, die das Auftreten bestimmter hypothetischer Salze bedingen. Die so „gealterten“ Wässer sind vor allem durch das Salz $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ gekennzeichnet und befinden sich im Genesemodell entweder im Magnesium-Typ (Erdalkalisierung bedingt das Auftreten des Salzes MgCl_2) bzw. im Natrium-Typ (Sulfat-Reduktion mit zunehmender Abnahme von CaSO_4 und das gemeinsame Auftreten der Salze Na_2SO_4 sowie NaHCO_3). Diese Wässer finden sich vor allem im Liegenden des GWLK 1 sowie im GWLK 2 (Abb. 4). Grundwässer der GWLK 2 und GWLK 3, die durch mächtige bindige Deckschichten abgeschirmt sind und nicht mehr dem aktuellen Wasserkreislauf unterliegen, sind dagegen nahezu sulfatfrei. In diesen meist statischen i. d. R. sehr gering mineralisierten Grundwässern werden die Kationen vollständig durch Hydrogenkarbonat aufgebraucht (Auftreten von NaHCO_3). Bei fehlendem Sulfat befinden sich die Lagepunktbereiche dieser Wässer auf der NaHCO_3 - NaCl -Achse des Natrium-Typs im Genesemodell.

Angemerkt werden muss, dass Wässer mit massiven anthropogenen Stoffeinträgen in nahezu allen Grundtypen des Genesemodells auftreten können, wobei hier die Lagepunktbereiche von Süßwasservorkommen im Chlorid-Typ (charakteristisch für das Salzwasserstockwerk) erste diesbezügliche Hinweise liefern können. Deshalb ist bei der hydrogeochemisch-genetischen Bewertung der Grundwasservorkommen eine Recherche der Flächennutzung im Einzugsgebiet unter Einbeziehung der geologischen Lagerungsverhältnisse unabdingbar.



Lagepunktbereiche der Wässer entsprechend ihrer Herkunft und davon abhängiger Zusammensetzung im Mittelbrandenburgischen Raum

- 0 Niederschlag, z. T. beeinflusst
 - 1 Sickerwasser nach der Passage der Bodenzone
 - 2 Wässer der Grundwasserneubildung (GWN) des ungeschützten Grundwasserleiterkomplexes (GWLK 1), i. Allg. weichsel-/saalekaltzeitliche Sande
 - 3 Wässer des ungeschützten GWLK 1 aus Ufer- und Seebodenfiltrat
 - 4 Wässer im Liegenden des GWLK 1 bzw. im Bereich hydrogeologischer Fenster zwischen GWLK 1 und GWLK 2
 - 5 Wässer mit längeren Aufenthaltszeiten ("ältere GWN") des geschützten GWLK 2
i. Allg. saalekaltzeitliche Sande
 - 6 gut geschützte Wässer des GWLK 3 ohne bzw. nur mit geringen Anteilen von GWN
i. Allg. elsterkaltzeitliche und tertiäre Sande
 - 7 sehr gut geschützte, hoch mineralisierte Wässer des Tiefenwasserstockwerks (TWS 1)
i. Allg. Rupelbasissande, Aquifere von Kreide, Jura, Trias
 - 8 sehr gut geschützte, hoch mineralisierte Wässer des TWS 2, i. Allg. intrasalinare Restlaugen des Röt, Zechstein
- ↔ Entwicklungen der Lagepunkte auf dem Transportweg der Wässer nach ihrer Herkunft bzw. den Lagerungsverhältnissen

Abb. 3: Hydrogeochemisches Genesemodell der Grundwasserleiter des Landes Brandenburg (nach RECHLIN 1997)
 Fig. 3: Hydrogeochemical Genesis Model of aquifers of Brandenburg (after RECHLIN 1997)

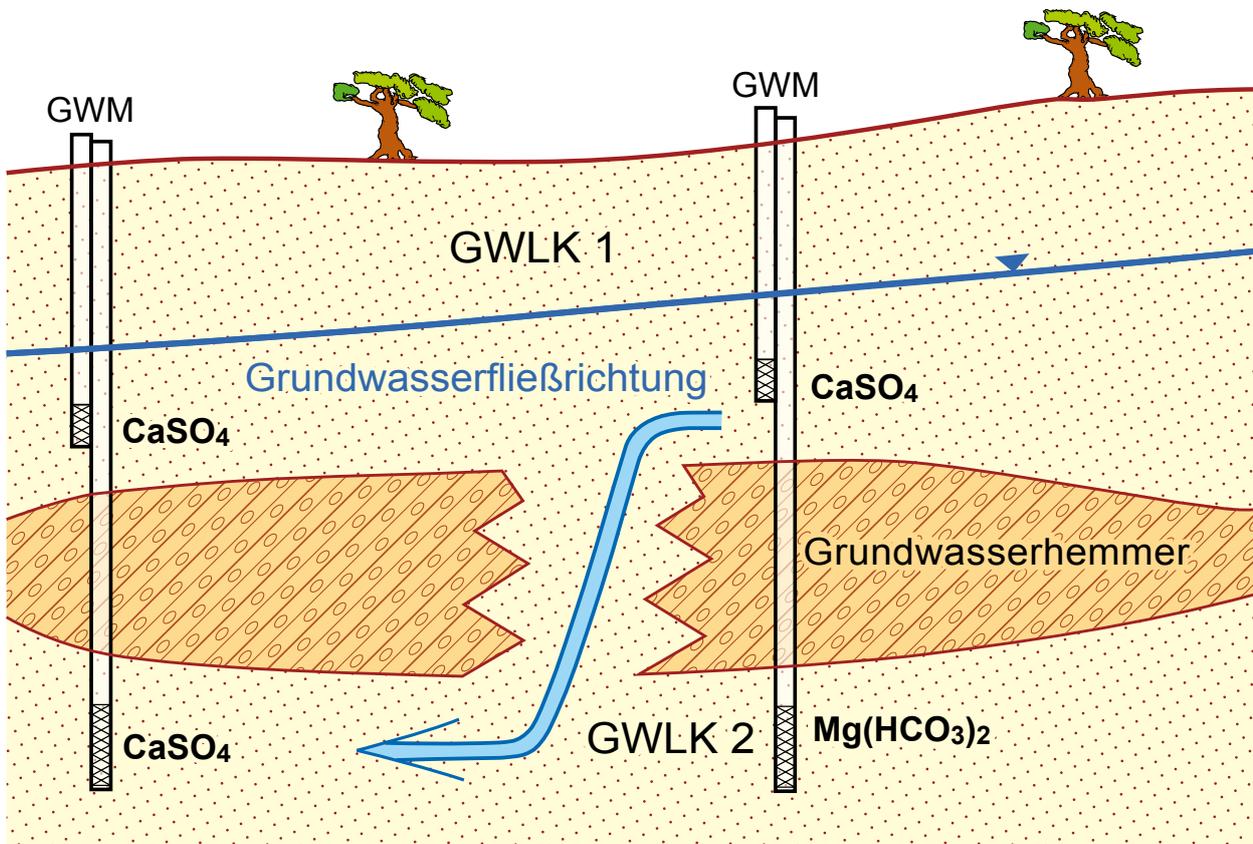
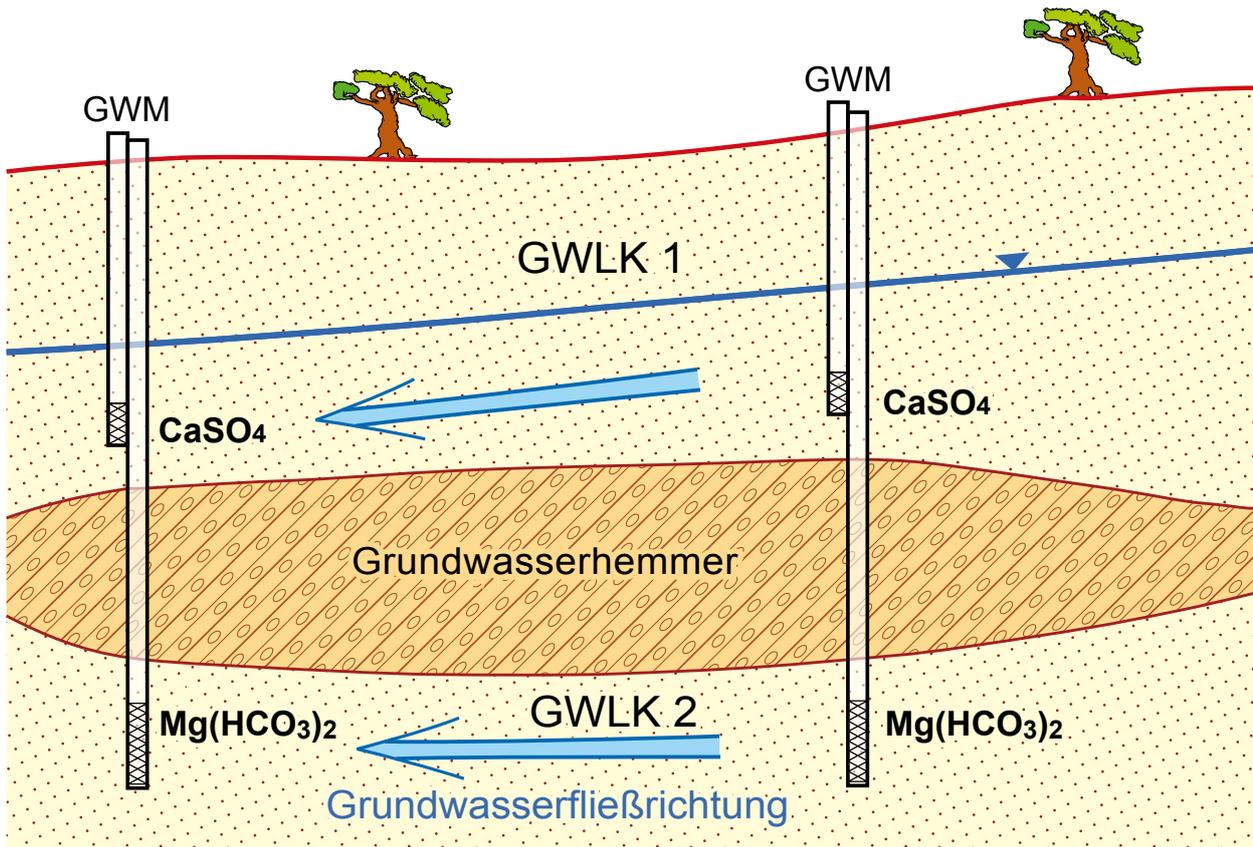


Abb. 4: Möglichkeiten der genetischen Identifizierung der Speisungsbedingungen von GWLK;
 GWM = Grundwassermessstelle, GWLK = Grundwasserleiterkomplex

Fig. 4: Possibilities of genetic identification of origin of groundwater in aquifers

HERMSDORF (2010) weist auf die Klärungsmöglichkeit der Verbreitung von hydraulisch wirksamen Transportbahnen im Grundwasserleiter hin.

Das Lagepunkt-konzept nach VALJAŠKO u. a. (1961) wurde durch RECHLIN (2008) um das GGV und 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 salinärer Stoffeinträge die wichtigsten Koeffizienten. Ihre Darstellung erfolgt weiterhin in einem modifizierten VALJAŠKO-Diagramm, das als praxisnahe Grundlage für die Interpretation der Berechnungsergebnisse herangezogen werden kann. Anhand der Matrixkombination von Lagepunkt und GGV erfolgt darüber hinaus eine Klassifizierung des Intrusionspotenzials einer Salzwasserfahne und Charakterisierung ihrer Mobilität von diffus-migrierend nach migrierend über intrusiv-migrierend bis hin zu intrusiv (Abb. 1).

Die Früherkennung geogener Salzwasserintrusionen spielt insbesondere für die Sicherstellung der Versorgung von qualitätsgerechtem Trinkwasser eine entscheidende Rolle.

Die Herleitungen des Genesemodells finden sich in der Programmierung der anwenderorientierten Software GEBAH (RECHLIN et al. 2010) wieder, die seit 2011 durch die Firma GCI GmbH im Auftrag des LBGR vertrieben und in diesem Band im Beitrag von D. BROSE näher erläutert wird. Für die Praxis steht somit eine effektive Überwachungsmethode bei der Bewirtschaftung der Grundwasserlagerstätten zur Verfügung.

4 Einsatz von GEBAH bei großen Datenmengen für die Identifizierung salinärer Wässer

Im Rahmen der fortlaufenden Bewertung der Rohwasserbeschaffenheit der WW im Land Brandenburg, welche seit 2003 durch das jetzige Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU) durchgeführt wird, konnte erstmals 2013 eine Auswertung von Massendaten mit der Software GEBAH erfolgen. Insbesondere im Teilprojekt 8a (HYDOR 2015) wurde sich intensiv mit den Versalzungen in den Brunnen von WW auseinandergesetzt.

Mit GEBAH können für die Auswertung von Versalzungsercheinungen Felder zur „Anwesenheit salinärer Wässer vom Halit-Typ in der Lösung“ und „Intrusionspotenzial salinärer Wässer vom Halit-Typ“ selektiert werden, die eine Einstufung zur Intensität einer salinaren Beeinflussung der Grundwässer in den Brunnen oder Grundwassermessstellen (GWM) zulassen. Mit Hilfe des GGV, das bei nicht eindeutigen Fällen hinzugezogen wurde, konnte im Ergebnis dieser Auswertung eine fünfstufige Klassifizierung entwickelt werden, um die Daten der über 5 500 Analysen effizienter handhaben zu können (Tab. 2).

Aufgrund der Inhomogenität der Anzahl der Analysen pro WW (zwischen 1 und 50), die nach eingehender Fehlerbetrachtung und Selektion ($e = < 5\%$) zur Verfügung standen, musste noch eine weitere praktikable Abschätzung für die konkrete Einstufung gefunden werden. Es wurden sechs Klassen gebildet, wobei die Klassen 1 und 2 auf geogen salinare Einflüsse bzw. derartige Hinweise schließen ließen. Die $\geq 10\%$ Anteile dieser Analysen pro WW waren ausschlaggebend für die Einstufung einer Versalzung oder Anzeichen einer Versalzung. Zusammenfassend leitete sich aus diesen Rahmenbedingungen das in Abbildung 5 dargestellte Fließschema ab.

Anwesenheit salinärer Wässer vom Halit-Typ in der Lösung	Intrusionspotenzial salinärer Wässer vom Halit-Typ	GGV	Fünfstufige Ergebnis-Klassifizierung
ja	mittel, hoch, sehr hoch	n. b.	geogen-salinar beeinflusst
wahrscheinlich; möglich	gering, sehr gering	n. b.	Hinweise auf geogen-salinare Beeinflussung
n. b.	gering, sehr gering	0,05–0,1	
n. b.	gering sehr gering	> 0,1	nicht geogen-salinar beeinflusst
nein; unwahrscheinlich	ohne	n. b.	
keine Berechnung möglich	keine Berechnung möglich	n. b.	bisher keine Bewertung möglich, weitere Untersuchungen notwendig
alle anderen Fälle		n. b.	Widerspruch in Anwesenheit salinärer Wässer und Intrusionspotential

Tab. 2: Fünfstufige, analysenbezogene Klassifizierung der GEBAH-Ergebnisse (HYDOR 2015); „n. b.“ = nicht berücksichtigt

Tab. 2: Five-step analytical classification of results from GEBAH model (HYDOR 2015); „n.b.“ = not included

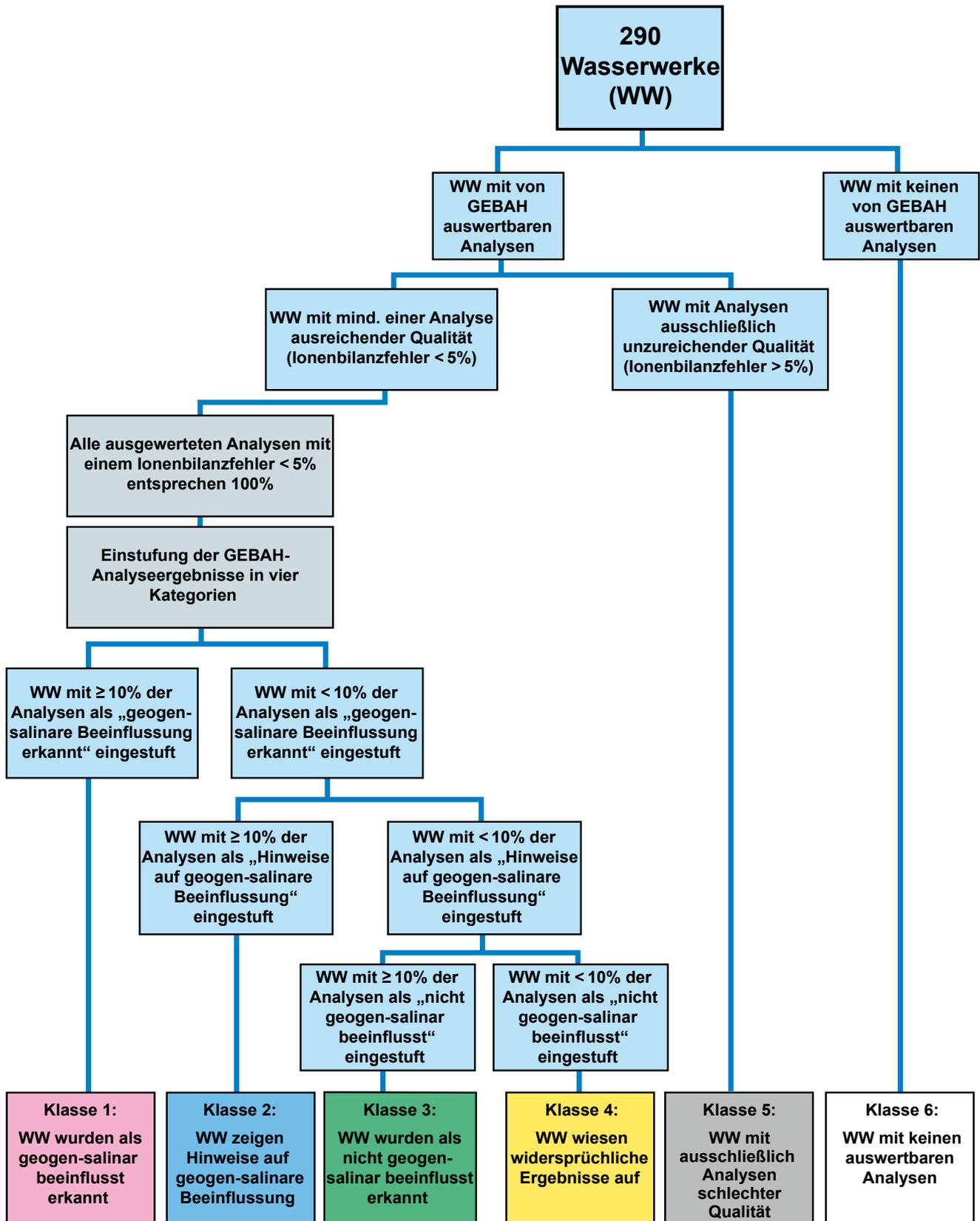


Abb. 5: Fließdiagramm zur Ausweisung der Salzwassereinflüsse für die Wasserwerke (HYDOR 2015)

Fig. 5: Flow chart for the identification of saltwater influences for waterworks (HYDOR 2015)

Insgesamt konnten so ca. 290 der derzeit 435 WW hydrogeochemisch-genetisch mit GEBAH bewertet werden. Von diesen 290 ließen sich 54 % (über 150 WW) den Klassen 1–2 zuordnen, konkret gehören 59 WW der Klasse 1 also „geogen salinar beeinflusst“ an. Die rein schematische Herangehensweise birgt natürlich auch Fehler in sich. So wurde davon ausgegangen, dass die im GEBAH für Versalzung herangezogenen Felder „Anwesenheit salinärer Wässer vom Halit-Typ in der Lösung“ und „Intrusionspotenzial salinärer Wässer vom Halit-Typ“ abhängig von einander auftreten. War dies nicht der Fall, wurde diese Analyse in die Klasse 4 als Widerspruch deklariert. Im Anschluss an diesen Bericht konnten in Zusammenarbeit mit dem LBGR durch Recherche der hydrogeologischen Verhältnisse diese Widersprüche geklärt werden.

Die hier vorgestellte Methode soll einen pragmatischen Lösungsansatz für die Auswertung von vielen Analysen (z. B. > 5 000 Datensätze) aufzeigen, der mit Hilfe des Salinarfeldes in GEBAH gut unterlegt werden konnte. In der nächsten Bewertung der WW hinsichtlich salinärer Einflüsse soll die hier beschriebene Methodik noch weiter verfeinert werden. Neben der Beobachtung der geogenen Beeinflussung von Brunnen oder des Einzugsgebietes von WW werden im Land auch verschiedene Grundwassermonitoringsysteme durch die Nutzung vorhandener aber auch den Neubau von GWM an exponierten Standorten betrieben. Das LBGR arbeitet weiterhin an der Ertüchtigung von Methoden zur Früherkennung etwaiger Salzwasseraufstiegsbahnen aus dem Liegenden in süßwasserführende Horizonte, das betrifft insbesondere den tieferen quartären (saale- oder elsterkaltzeitliche GWL) und tertiären Untergrund. Beispielhaft seien hier die GWM mit Mehrfachausbau Spreenhagen, Biegenbrück und Müllrose (vgl. auch den Beitrag BEDNORZ & BROSE in diesem Band) genannt. Das LfU errichtete 2005 (HANNAPPEL et al. 2007) ein Monitoring zur Beobachtung möglicher Salzwasseraufstiege im wasserwirtschaftlich relevanten Hauptgrundwasserleiter, für die erstmalig Ergebnisse in HERMSDORF & PYRITZ (s. Beitrag in diesem Band) vorgestellt werden.

Danksagung

Für die freundliche Durchsicht des Manuskriptes bedanken wir uns bei Herrn Berthold Rechlin, Potsdam.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag gibt einen Überblick zur geogenen Binnenversalzung im Land Brandenburg und die ablaufenden Prozesse und Möglichkeiten der hydrogeochemisch-genetischen Identifizierung von Salzwasseraufstiegsbahnen. Diese Erkenntnisse sollen in Zusammenhang mit den folgenden Beiträgen letztendlich dazu dienen, vor allem bei salinärer Beeinflussung von Wasserfassungsstandorten entsprechend frühzeitig durch die Optimierung/Anpassung der Fahrweise

und Standorte von Brunnengalerien/Einzelbrunnen reagieren und gegensteuern zu können.

Summary

This paper provides an overview about the geogenic inland salinization happening in Brandenburg and introduces the relevant processes and opportunities for the hydrochemical-genetic identification of flow paths with rising saltwater. Those insights, in combination with further contributions are finally supposed to allow the detection of saline impacts on water catchment areas to react with premature optimization/adjustments in the operation mode of well galleries/single wells and to take suitable counter-measures.

Literatur

- ASCHERSON, P. (1859): Die Salzstellen der Mark Brandenburg, in ihrer Flora nachgewiesen. – Zeitschr. Dt. geolog. Ges. **11**, S. 90–100, 1 Karte
- ASCHERSON, P. (1912): Verzeichnis der in ihrer Flora bekannten Salzstellen der Provinz Brandenburg. – Jb. preuß. geol. Landesanst. **32**, S.494–496
- DAVIS, S. N. & R. J. M. DE WIEST (1967): Hydrogeology. – 2. Aufl., 463 S., New York i. e. (Wiley)
- GRUBE, A., WICHMANN, K., HAHN, J. & K. NACHTIGALL (2000): Geogene Grundwasserversalzung in den Porengrundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. – Veröff. aus dem Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, Bd. 9, 203 S.
- HANNAPPEL, S., RIETZ, C., KOSECK, R., POHL, S., HOTZAN, G. & A. HERMSDORF (2007): Aufbau des Sondermessnetzes Geogene Grundwasserversalzung in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **14**, 1, S. 5–14
- HANNEMANN, M. & W. SCHIRRMESTER (1998): Paläohydrogeologische Grundlagen der Entwicklung der Süß-/Salzwassergrenze und Salzwasseraustritte in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **5**, 2, S. 61–72
- HERMSDORF, A. (2006): Überblick zur Grundwasserversalzung im Land Brandenburg. – Bericht Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, 12 S., Kleinmachnow (unveröff.)
- HERMSDORF, A. (2010): Überblick über die Grundwasserversalzung im Land Brandenburg und ihre Spezifikation für die Binnensalzstellen. – Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg **19**, 1/2, S. 9–15
- HYDOR (2015): Erfassung belastungsrelevanter Parameter in Rohwasserproben von Wasserwerken im Land Branden-

- burg. – Bericht zum Teilprojekt 8a, Zeitraum 2011–2013, 87 S., Berlin (unveröff.)
- KLÖDEN, K. F. (1828): Beiträge zur mineralogischen und geognostischen Kenntnis der Mark Brandenburg 1–5. – Programm zur Prüfung der Zöglinge der Gewerbeschule, 90 S., Berlin
- LIMBERG, A., JONAS, O. & A. KOLBERG (2016): Detektion möglicher Fehlstellen im Rupelton durch Messung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit in tiefen Grundwassermessstellen im Land Berlin. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **23**, 1/2, S. 11–15
- MANHENKE, V., HANNEMANN, M. & B. RECHLIN (1995): Gliederung und Bezeichnung der Grundwasserleiterkomplexe im Lockergestein des Landes Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **1**, S. 12
- MÜLLER-STOLL, W. R. & H. G. GÖTZ (1962): Die Märkischen Salzstellen und ihre Flora in Vergangenheit und Gegenwart – Wiss. Z. Päd. Hochschule Potsdam, Math-naturwiss. R **7**, 1/2, S. 243–296
- MÜLLER-STOLL, W. R. & H. G. GÖTZ (1993): Vegetationskarten von Salzstellen Brandenburgs. – Verh. Bot. Ver. Berlin-Brandenburg **126**, S. 5–24
- NUL (2010): Binnensalzstellen in Brandenburg. – Natur- und Landschaftspflege in Brandenburg, Beiträge zu Ökologie, Natur- und Gewässerschutz **19**, 1/2, 119 S.
- PANTELEIT, B. (2004): Geochemische Prozesse in der Salz-Süßwasserübergangszone. – Berichte FB Geowissenschaften der Universität Bremen **225**, 128 S.
- 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. (1987): Bericht zu den Untersuchungsergebnissen der hydrochemischen Entwicklung der Brunnengalerien des Wasserwerkes II „Potsdam-Leipziger Straße“ des VEB WAB Potsdam zur Ermittlung von Förderraten als Voraussetzung von Bewirtschaftungsvarianten. – Bericht Rat des Bezirkes Potsdam, Abt. Geologie, 20 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.)
- ZIESCHANG, J. (1974): Ergebnisse und Tendenzen hydrogeologischer Forschung in der DDR. – Z. angew. Geol. **20**, 10, S. 452–457

Anschrift der Autoren:

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

Dipl.-Geol. Angela Hermsdorf
Landesamt für Umwelt Brandenburg
Ref. W15 Altlasten, Bodenschutz, Grundwassergüte
Postfach 60 10 61
14410 Potsdam
angela.hermsdorf@lfu.brandenburg.de

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 17–27	12 Abb., 1 Tab., 6 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	-------------------------

Geoelektrische Untersuchungen von Salzwasserintrusionen in Süßwasser führende Grundwasserleiter und Oberflächengewässer

Geophysical investigation of saltwater intrusions into freshwater aquifers and surface water

HELLFRIED PETZOLD, UWE KABOTH & ANGELA SONNTAG

1 Einleitung

Im Rahmen gewässerökologischer Untersuchungen wurde im Bereich eines Altarmes der Spree eine Chlorid-Anomalie im Grundwasser festgestellt, deren Herkunft bezüglich eines möglichen Gefährdungspotentials zu klären war. Das Untersuchungsgebiet liegt in der Nähe der Ortschaft Freienbrink, südöstlich von Berlin. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, befinden sich im Umfeld des Altarmes

zahlreiche Grundwassermessstellen (GWM). Die Filter dieser Grundwassermessstellen sind oberflächennah im unbedeckten Grundwasserleiter ausgebaut. Regelmäßige Beprobungen des Grundwassers ergaben signifikante Erhöhungen bei den Chlorid-Konzentrationen, insbesondere im Bereich der GWM P2 und P3. Hier erreichten die Spitzen bis zu 188 mg/l (vgl. Abb. 1), wohingegen sich die Normalwerte (Background) zwischen 6 und 33 mg/l bewegen.

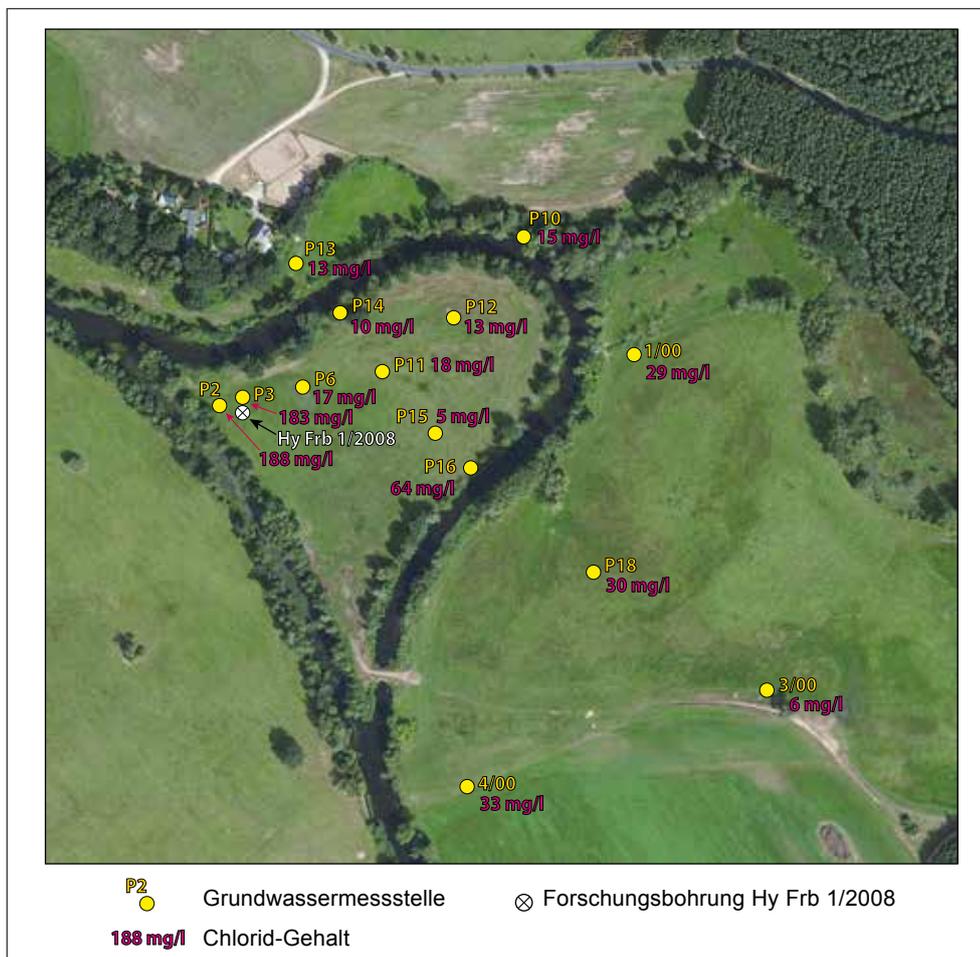


Abb. 1:
Untersuchungsgebiet

Fig. 1:
Investigation area

Die ursprünglich gehegte Vermutung, dass es sich bei der Chlorid-Anomalie um einen anthropogenen Stoffeintrag handelt, konnte durch die historischen Recherchen nicht bestätigt werden. Deshalb wurden geologische, hydrogeochemisch-genetische und geoelektrische Untersuchungen durchgeführt.

2 Hydrogeochemisch-genetische Bewertung

Um mögliche Ursachen für die Chlorid-Anomalie herausfinden zu können, wurden die Grundwasseranalysen aus dem Jahre 2008 hydrogeochemisch-genetisch mit der Software GEBAH (RECHLIN et al. 2010) ausgewertet. Eine ausführliche

Beschreibung zur Methodik und Auswertung mittels GEBAH erfolgt im Beitrag von D. BROSE in diesem Band.

Die Grundwasser-Analysenwerte der GWM wurden in GEBAH eingegeben, die hypothetischen Salze und die entsprechenden Salinarkoeffizienten berechnet und im Diagramm dargestellt (Abb. 2).

Im Ergebnis zeigte sich, dass es sich bei den Wässern mit den geringeren Chlorid-Gehalten um die erwarteten Neubildungswässer handelt, bei denen ein Genetisches Grundverhältnis (GGV) von gleich/größer 1 vorliegt. Dagegen weisen die Wässer mit den erhöhten Chlorid-Werten (GWM 2 und 3) ein GGV von 0,031 bzw. 0,024 auf, d. h. dass bei diesen Wässern eindeutig Speisungsanteile salinärer Tiefenwässer diagnostiziert werden konnten. Somit stammen diese höher

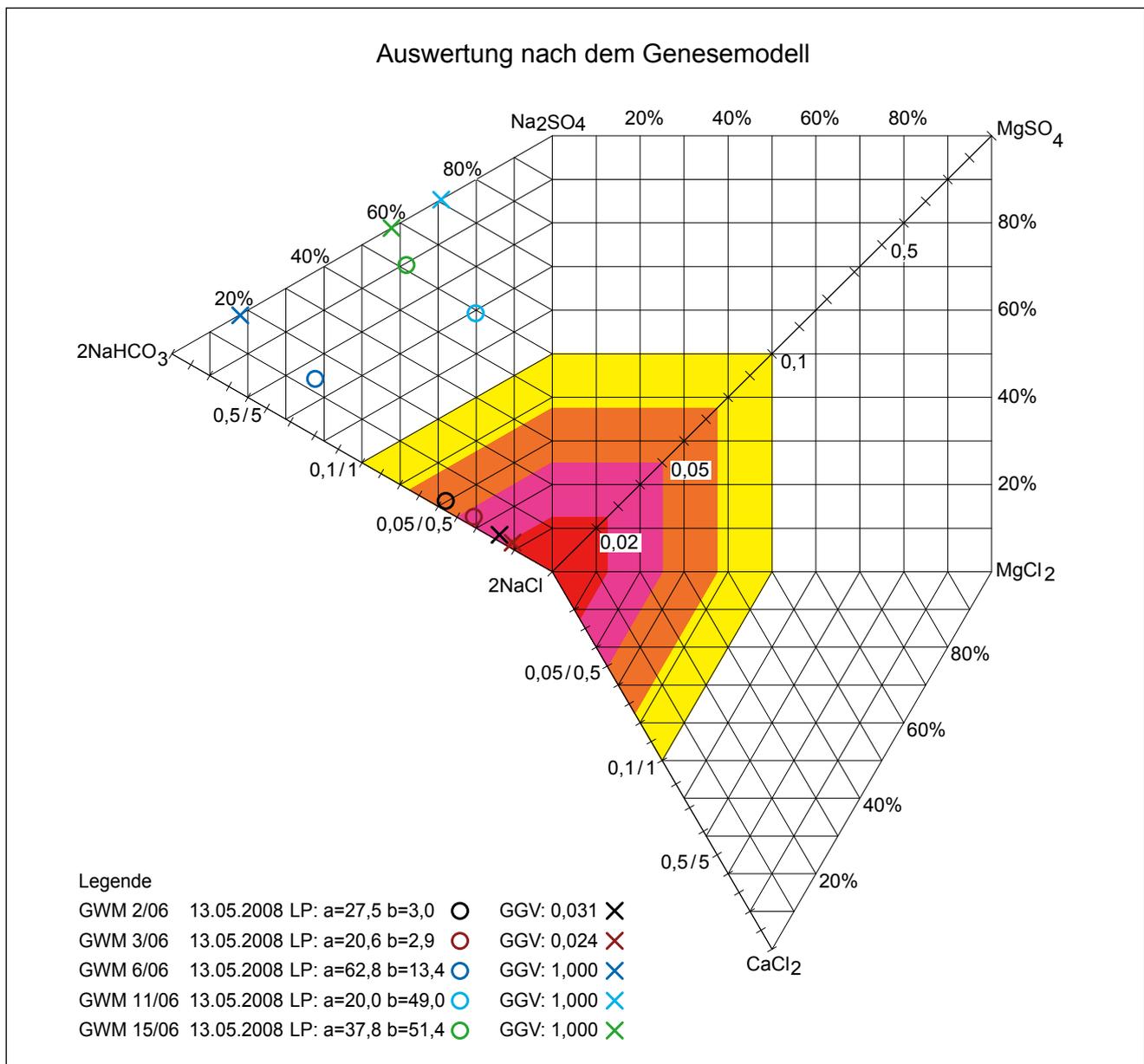


Abb. 2: Grundwassermessstellen Freienbrink, genetische Bewertung mit GEBAH (RECHLIN et al. 2010); GGV = Genetisches Grundverhältnis, GWM = Grundwassermessstelle

Fig. 2: Groundwater observation well Freienbrink, genetic assessment with software GEBAH

mineralisierten Wasser aus dem mesozoischen Schichtenverband und sind wahrscheinlich über eine quartäre Rinne ins Süßwasserstockwerk gelangt. Die Existenz einer solchen quartären Rinnenstruktur in unmittelbarer Umgebung des Bearbeitungsgebietes konnte anhand der in den letzten Jahrzehnten durchgeführten quartärgeologischen Untersuchungen belegt werden (vgl. Kap. 3).

3 Geologische Situation

Das Untersuchungsgebiet Freienbrink befindet sich im Landkreis Oder-Spree ca. 5 km nordwestlich der Ortslage Spreenhagen in jenem Teil Brandenburgs, der aus glazial-morphologischer Sicht als Berlin-Fürstenwalder Spreetalniederung (SCHOLZ 1962) bezeichnet wird und ein Teilstück des Berliner Urstromtales darstellt. Um die konkrete geologische Situation im Untersuchungsgebiet zu klären, wurde im Jahr 2008 eine Forschungsbohrung (Hy Frb 1/2008; Abb. 1) abgeteuft.

Quartäre Lockergesteinsserien bedecken nicht nur das Untersuchungsgebiet, sondern auch dessen näheres und weiteres Umfeld. Die Erdoberfläche im näheren Umfeld wird im Wesentlichen durch weichselzeitliche Urstromtal- sowie holozäne Flussablagerungen und Vermoorungen gebildet. Lokal, wie bei Freienbrink, aber auch nördlich der Spree, treten geringmächtige Dünen und Flugsandfelder auf.

Das Liegende der quartären Sedimentfolgen wird überwiegend von tertiären Schichten gebildet (vgl. Abb. 3 und 4). Das Tertiär, gegliedert in Paläozän, Eozän, Oligozän, Miozän und Pliozän (vgl. Abb. 4), überdeckt mit seinen Lockersedimenten in nahezu geschlossener Verbreitung die mesozoischen Ablagerungen im Bereich der Norddeutschen Senke und bildet zusammen mit den überlagernden quartären Schichten das känozoische (Locker-) Deckgebirgsstockwerk.

Tiefreichende quartäre Erosionen im näheren Umfeld des Bearbeitungsgebietes haben zur vollständigen Ausräumung der Sedimente des Miozäns (sichere Sedimentbelege für pliozäne Ablagerungen fehlen) geführt, so dass elsterzeitliche Ablagerungen denen des Oligozäns direkt aufliegen. Die größtenteils mächtige unteroligozäne Rupel-Folge, bestehend aus Tonen, Tonmergeln, Schluffen und Schluffmergeln, bildet die natürliche Barriere zwischen liegendem Salzwasser- und hangendem Süßwasserstockwerk. In Gebieten quartärer Tiefrinnen wurden diese Mächtigkeitsreduziert bzw. vollständig erodiert (Abb. 4) und die quartären Rinnensedimente haben sich z. T. bis in mesozoische Ablagerungen eingeschnitten und somit eine Wegsamkeit für den Aufstieg salinärer Tiefenwässer in das Süßwasserstockwerk geschaffen. Die quartären Tiefrinnen stellen eines der interessantesten glaziären Phänomene dar. Sie treten vor allem im mittleren Brandenburg mit Basiswerten deutlich unter -100 m NN bis -200 m NN in Erscheinung. In unmittelbarer Nähe zum Untersuchungsgebiet konnten sowohl östlich

als auch westlich derartige Rinnenstrukturen nachgewiesen werden (JORTZIG 2000, SONNTAG 2004).

Die bereits in der Zerfallsphase des Eises der 1. elsterzeitlichen Inlandeisbedeckung einsetzende Rinnenverfüllung führte zu lithologisch heterogenen und wenig horizontbeständigen Abfolgen; Bänder- und massige Beckenschluffe, häufig vermischt mit verlagertem miozänen Sedimentmaterial, verzahnen sich horizontal wie vertikal mit verschiedenenkörnigen Sanden oder Kiesen sowie verstürzten oder verflossenen Geschiebemergeln (Abb. 3, 4). Durch den 2. Elster-Eisvorstoß erfolgte eine starke Überprägung der

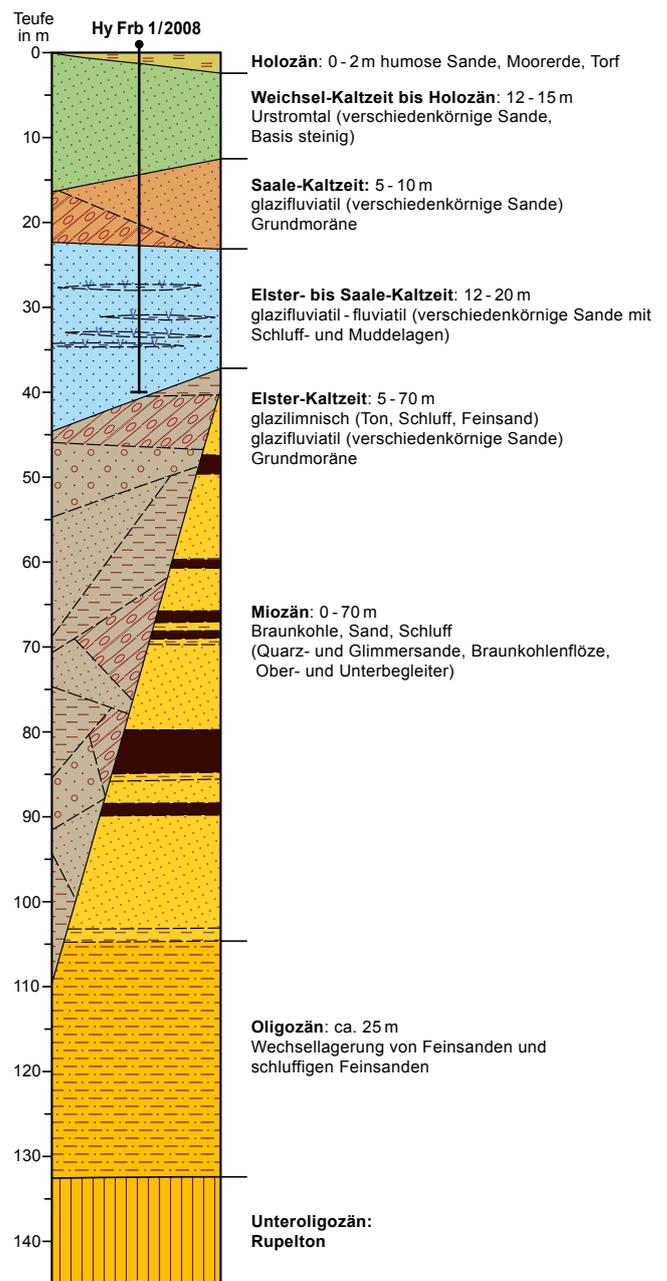


Abb. 3: Geologisches Normalprofil des Untersuchungsgebietes

Fig. 3: Geological cross section of investigation area

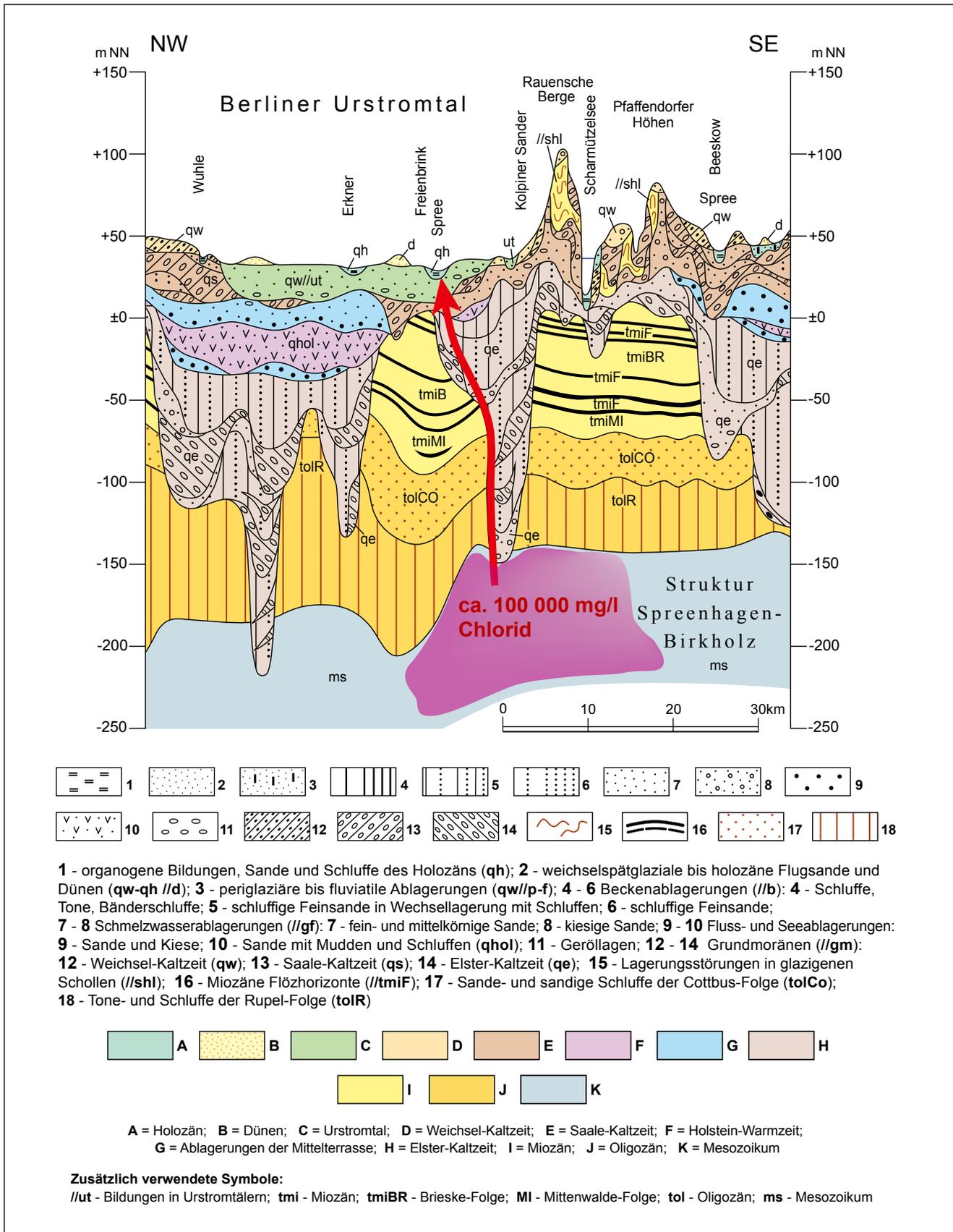


Abb. 4: Schematische Schnittdarstellung der Geologie des weiteren Untersuchungsgebietes (modifiziert nach LIPPSTREU & JORTZIG 1997) einschließlich der abgeleiteten Aufstiegsrichtung Chlorid-haltiger Wässer aus dem Mesozoikum.

Fig. 4: Schematic cross section of the extern investigation areas

Rinnenflanken, verbunden mit intensiver Deformation sowohl der unteren, noch wenig verfestigten Rinnenfüllungen als auch der an den Rinnenrändern und in den Rinnenzwischengebieten anstehenden tertiären Sedimente.

Mit dem Eisrückbau im Elster-Spätglazial und dem damit verbundenen Nachrücken der Flüsse nach Norden und Nordwesten kam es zur Ablagerung fluviatiler Sande und Kiese. Während die unteren Profilabschnitte noch stark schmelzwasserbeeinflusst sind (Hy Frb 1/2008: Mittelsande von 35 bis 33 m unter Gelände), zeigen die hangenden Abschnitte bereits sehr deutlich den zunehmenden Einfluss der von Süden vorrückenden Flüsse (am Standort: von 33 bis 31 m unter Gelände).

Durch das Ausschmelzen von Toteis im Elster-Spätglazial und dem allmählichen Wiederanstieg des Grundwasserspiegels bildete sich im Gebiet von Berlin und seiner Umgebung eine weitflächige, archipelartige Seenlandschaft heraus, die zum Sedimentationsraum für holsteinwarmzeitliche limnische und limnisch-fluviatile Ablagerungen wurde. Diese sind nahezu im gesamten Gebiet von Berlin und dessen Umland verbreitet, konnten am direkten Standort allerdings nicht nachgewiesen werden.

In der ausgehenden Holstein-Warmzeit und dem beginnenden Saale-Frühglazial kam es aufgrund der zunehmenden Klimaverschlechterung erneut zu verstärkter fluviatiler Sedimentation. Das Saale-Frühglazial war durch mehrfache Kälte- und Wärmeschwankungen gekennzeichnet, verbunden jeweils mit Veränderungen im Sedimentationsgeschehen. Insgesamt erfolgte in diesem Zeitraum eine mehrphasige, weitflächige periglaziär-fluviatile bis periglaziär-limnische Verschüttung und Auffüllung des Reliefs bis auf ca. +20 m NN, im unmittelbaren Untersuchungsgebiet auf +13 m NN (Hy Frb 1/2008).

Die saalezeitliche Inlandvereisung wurde mit einer ausgeprägten Vorschüttphase eingeleitet, was sich weit verbreitet in der Ablagerung z. T. mächtiger Schmelzwassersande dokumentiert. Die überwiegend fein- bis mittelkörnigen, seltener grobkörnigen und kiesigen Sande lassen sich bei Auflagerung auf fluviatile Sande an Hand von Bohrproben nur schwer von diesen abtrennen, so auch im Untersuchungsgebiet. Die im Hangenden lagernden saalezeitlichen Grundmoränenbildungen weisen häufig ostbaltische Kleingeschiebeassoziationen auf (Abb. 3, 4). Durch neuere Untersuchungen konnte belegt werden, dass sowohl die Grundmoränen des Älteren wie auch des Jüngeren Saale-Eisvorstoßes ostbaltisch geprägte Geschiebefrachten führen können. Da überdies beide saalezeitlichen Eisvorstöße ein nur wenig voneinander abweichendes Transgressionsniveau hatten, wird eine Zuordnung zum ersten oder zweiten Eisvorstoß wesentlich erschwert, zumal im Bearbeitungsgebiet und dessen näherem Umfeld nur ein saalezeitliches Grundmoränenpaket auftritt (Abb. 3). Daher wurde die von 19,8 bis 21,5 m unter Gelände erbohrte Grundmoräne nur als allgemein saalezeitlich eingestuft und auf eine weitere

Differenzierung verzichtet. Das Ausschmelzen des saalezeitlichen Eises führte zur weitflächigen Sedimentation von Schmelzwassersanden. Am Standort der Bohrung Hy Frb 1/2008 erreichen diese auf Grund des Erosionsschnittes innerhalb des Urstromtales nur noch Mächtigkeiten von 4,8 m (15–19,8 m unter Gelände).

Der glaziäre Abschnitt der Weichsel-Kaltzeit wird, ähnlich wie in der Saale-Vereisung, mit einer akzentuierten Vorschüttphase eingeleitet, wobei bis zu 30 m mächtige glazifluviatile Sande abgelagert wurden. Diese Vorschüttssande bestehen aus zumeist geschichteten verschiedenkörnigen Sanden mit kiesigen Bändern und Lagen. In ihren hangenden Bereichen zeigen sie häufig Deformationsstrukturen, die beim Überfahren durch das Brandenburg-stadiale Eis verursacht wurden. Weichselzeitliche Schmelzwassersande und Grundmoränen bilden den das Berliner Urstromtal flankierenden Hochflächenbereich. Innerhalb des Urstromtales wurden diese Ablagerungen weitestgehend durch die weichselzeitlichen Schmelzwässer erodiert und treten nur untergeordnet als Durchragungen auf, so u. a. in einem südlich der Spree gelegenen Hochflächengebiet (bei Gosen – Neu Zittau), das aus weichselzeitlichen Sanden der Vorschüttphase und weichselzeitlicher Grundmoräne aufgebaut ist.

Das Berliner Urstromtal stellt nicht nur eine markante morphologische Erscheinung, sondern zugleich auch die bedeutendste Bildung der weichselzeitlichen Eiszerfallsphase dar. Die Entwicklung des Berliner Urstromtales erfolgte zweiphasig. Es diente sowohl den Schmelzwässern des Brandenburger als auch des Pommerschen Stadiums der Weichsel-Kaltzeit als Abflussbahn in Richtung Nordwesten zur Elbe und damit letztlich in die Nordsee.

Die Sedimentfüllung des Berliner Urstromtales besteht überwiegend aus fein- bis grobkörnigen Sanden, wobei die Talsandbasis häufig kiesig ausgebildet ist. Die Auflagerungsfläche der Talsande ist unregelmäßig; nicht selten treten tiefe Auskolkungen auf, aber auch erosionsterassenartige Auflagerungen auf älteren Bildungen sind festzustellen. Die Mächtigkeit der Talsande schwankt in weiten Grenzen, liegt im Durchschnitt aber bei 15 bis 20 m. Am Standort der 2008 niedergebrachten Bohrung wird eine Talsandmächtigkeit von 14 m dokumentiert, bestehend aus Fein- und Mittelsanden sowie einer kiesigen Basis, die der saalezeitlichen Grundmoräne auflagert.

Im weichselperiglaziären Zeitabschnitt kam es zu einer Überprägung nicht nur der Hochflächenareale, sondern auch der Gebiete der Urstromtäler und ihrer Nebentäler. So wurden die aus den Hochflächengebieten ausgespülten und verlagerten Sedimente in die Niederungsbereiche transportiert und dort den Talsanden als Schwemmkegel, wie z. B. im Raum Erkner, aufgesetzt. Nach dem weitestgehenden Zerfall des Weisel-Eises führten Vegetationsfreiheit, verbunden mit trocken-kalten Klimabedingungen, zu beträchtlichen äolischen Materialverlagerungen, insbesondere in den trocken gefallen Talsandarealen der Niede-

rungsgebiete und den weitflächigen Sanderablagerungen der Hochflächen. Die vielfach bereits weichselhoch- bis -spätglazial aufgewehten Flugsandfelder und Dünen haben, mit Unterbrechungen, bis in die jüngste Zeit hinein beträchtliche Umformungen erfahren. Dünen und Flugsandfelder haben generell eine weite Verbreitung, wobei Ausdehnung und Mächtigkeit stark differieren. Besonders eindrucksvolle Dünengebiete, die z. T. deutlich ihre Umgebung überragen, finden sich u. a. im Müggelseegebiet. Im Untersuchungsgebiet sind sie eher kleinflächig und geringmächtig verbreitet.

In den Bach- und Flussgebieten führten die geänderten Gefälleverhältnisse während des Holozäns zu Einschnitten und teilweise mehrphasiger Auen- und Mäanderbildung sowie zu Laufverlegungen (vgl. Abb. 1). In den so entstandenen holozänen Ablagerungsräumen wurden verschiedenartige limnische Mudden und/oder limnisch-fluviatile sandig-humose Bildungen sedimentiert. Die zunehmende Verlandung der Wasserflächen führte zur Entstehung von Arealen mit Moorerde sowie Niedermooeren. In Bächen und Flüssen, wie u. a. auch in der Spree, wurden verschiedenkörnige, zumeist mit organischer Substanz durchsetzte Sande (Auensande) sedimentiert. Holozäne Bildungen verteilen sich als Moorbildungen und/oder sandige limnisch-fluviatile Sedimente über das gesamte Untersuchungsgebiet. Ihre Mächtigkeit ist überwiegend gering und schwankt zwischen 1 und etwa 5 m. Am Standort wurden 1 m mächtige holozäne Ablagerungen erbohrt (0,5 m stark zersetzter Torf unterlagert von 0,5 m Fein- und Mittelsanden).

4 Messverfahren Widerstands-Geoelektrik

Der für geoelektrische Messungen entscheidende petrophysikalische Parameter ist der spezifische elektrische Widerstand ρ^* des Gesteins. Dieser hängt u. a. von der relativen Dielektrizitätskonstante ab, wodurch eine Erhöhung des Wassergehaltes eine Abnahme des spezifischen Widerstandes infolge der elektrolytischen Leitfähigkeit des Poren- bzw. Kluftwassers bewirkt. Im Wesentlichen wird der spezifische elektrische Widerstand für den Lockergesteinsbereich bestimmt durch:

- den Porenraum bzw. Korngröße,
- die Porenfüllung, d. h. den Grad der Wassersättigung und
- den Mineralisationsgrad des Porenwassers.

Daher weisen verschiedene Sedimente im Lockergesteinsbereich unterschiedliche spezifische elektrische Widerstände auf (Tab. 1).

Daraus ergeben sich Widerstandscontraste zwischen folgenden Lockergesteinen:

- rollig zu bindig,
- rollig zu kohlig,
- rollig trocken zu rollig wassergesättigt und
- süßwasser- zu salzwassergesättigt.

Lockergesteine	Widerstände in Ohmmeter (Ω m)
Kies, trocken	1 000
Kies, wassergesättigt	60–300
Kies, mineralisiert	20–60
Sand, trocken	800
Sand, wassergesättigt	50–150
Sand, mineralisiert	10–40
Geschiebemergel	40–100
Lehm	20–50
Löß	15–20
Schluff	10–50
Ton	5–40
Torf	15–50
Braunkohle	10–50

Tab. 1: Spezifische elektrische Widerstände von Lockergesteinen

Tab. 1: Specific electrical resistivities of unconsolidated rocks

Letzterer Kontrast ist Grundlage der vorliegenden Untersuchungen zur Ermittlung von Salzwasseraufstiegszonen.

Für den erfolgreichen Einsatz der Widerstandsgeoelektrik müssen zwei wichtige Voraussetzungen erfüllt sein:

- ein deutlicher Widerstandscontrast und
- eine ausreichende relative Schichtmächtigkeit (im Verhältnis zur Tiefe).

Beide Bedingungen sind in ihrer Wechselwirkung zu betrachten. Vor der Durchführung geoelektrischer Messungen sind sorgfältige Untersuchungen über die Lösbarkeit der gestellten Aufgabe anhand von Bohrungen, theoretischen Modellrechnungen und gegebenenfalls von Testmessungen durchzuführen.

Bei den geoelektrischen Widerstandsverfahren wird dem Boden künstlicher elektrischer Gleichstrom aufgeprägt. Stromeinspeisung und Spannungsabgriff werden galvanisch vorgenommen. Dies erfolgt mit Messelektroden, welche einen direkten Bodenkontakt haben müssen.

Alternativ können die Leitfähigkeiten als Kehrwert des spezifischen Widerstandes mit elektromagnetischen Messungen ermittelt werden. Hier ist kein direkter Bodenkontakt erforderlich, da die Messungen mit zwei tragbaren Spulensystemen erfolgen.

Bei der Widerstandsgeoelektrik kommen Vierpunktanordnungen (Abb. 5) zum Einsatz, von welchen es eine Vielzahl von Varianten gibt. Unter Berücksichtigung der Abstände

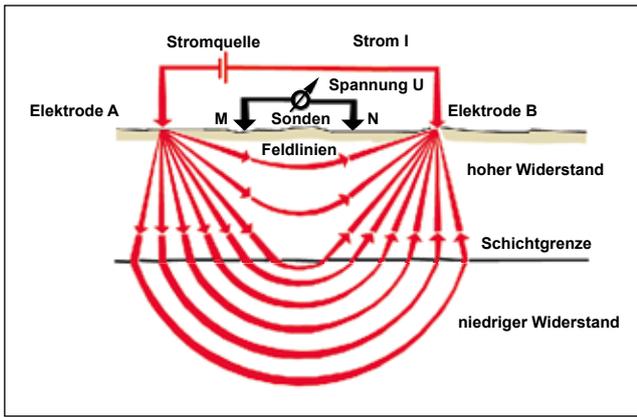


Abb. 5: Messprinzip der Widerstandsgeoelektrik

Fig. 5: Principle of resistivity measurement with a four-electrodes array

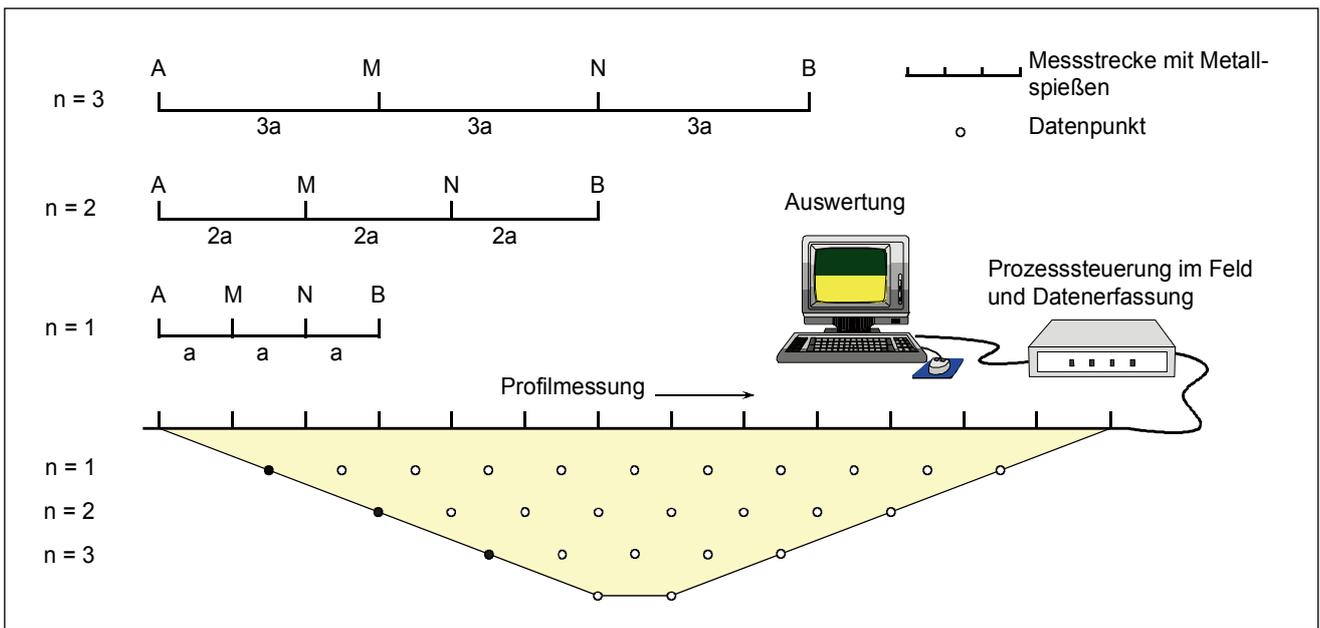


Abb. 6: Messprinzip einer Wenner-Sondierungskartierung (modifiziert nach KNÖDEL et al. 1997)

Fig. 6: Principle of 2D resistivity measurement with WENNER electrode array

der Messelektroden ($k = \text{Geometriefaktor}$) und den Messgrößen I (Gleichstrom) und ΔU (Spannungsdifferenz) ergibt sich für den spezifischen elektrischen Widerstand ρ^* des Untergrundes folgende Beziehung:

$$\rho^* = \frac{\Delta U}{I} * k$$

Der Geometriefaktor k wird aus den jeweiligen Abständen zwischen den Strom (A, B)- und Messelektroden (M, N) berechnet.

Eine rationelle und heute fast nur noch angewandte Weiterentwicklung ist die geoelektrische Sondierungskartierung (Mehrelektrodenmessung). Unter Nutzung eines Steuergerätes ist diese geoelektrische Sondierungskartierung (Abb. 6), eine Kombination beider Verfahren (Sondierung und Kartierung). Sie entspricht einer dichten äquidistanten Folge von Sondierungen bzw. mehreren Kartierungen mit stufenweise vergrößerter Auslagelänge (Wirkungstiefen) auf einem Profil. Damit wird die horizontale Widerstandsverteilung

in unterschiedlichen Niveaus erfasst. Bei der Feldmessung sind mehrere Metallspieße auf einem Profil über einen Kabelbaum miteinander verbunden. Ein Prozessrechner übernimmt die Ansteuerung der Metallspieße als Elektroden oder Sonden. Hierbei wird eine bestimmte Messkonfiguration auf dem Profil automatisch weitergeschaltet. Nach Erreichen des Profilendes erfolgt eine Erhöhung des Sondenabstandes (also der Eindringtiefe) und die erneute Übermessung des Profils. Dieser Vorgang wiederholt sich bis alle festgelegten Wirkungstiefen durchgemessen sind. Die Einzelmessungen werden dem jeweiligen Aufstellungszentrum als x-Koordinate und einer dem Elektrodenabstand entsprechenden Teufe als y-Koordinate zugeordnet. So erhält man eine zweidimensionale Verteilung (teufenabhängige Änderung) des scheinbaren spezifischen Widerstandes, die als "Pseudosektion" bezeichnet wird. Durch Inversion der Messdaten werden reale Tiefen- und Widerstandswerte ermittelt. Diese ergeben bei flächenhaften Messungen mit mehreren Parallelprofilen einen 3D-Datenkubus. Daraus können dann verschiedene Horizontal- und Vertikalschnitt-

te des spezifischen Widerstandes ermittelt und dargestellt werden. Unter Einbeziehung von geologischen Bohrungen, Pegeln und Sondierungen kann dann eine 3D-Darstellung der geologischen Lagerungsverhältnisse oder der hydrologischen Situationen ermittelt werden. Diese Komplexinterpretation ergibt eine wesentlich verbesserte Darstellung der Lagerungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet.

5 Messdurchführung

Entsprechend der Zielstellung – Kartierung der Widerstandsverteilung bis 20 m Tiefe – wurden im Untersuchungsgebiet (400 x 350 m) Spreebogen Freienbrink (vgl. Abb. 1) neun Geoelektrikprofile quer zur Spree und drei Profile parallel zur Spree gemessen. Der Messelektrodenabstand für die Sondieranordnung betrug 5 m und der Profilabstand 25 m.

Als Messgerät ist das GMS 150 der Firma GeoSys Leipzig verwendet worden. Das Messgebiet war vorwiegend Weidefläche. Messelektroden und Messkabel konnten dort problemlos positioniert werden (Abb. 7). Beim Auslegen des Messkabels über die Spree wurde ein Schlauchboot benutzt (Abb. 8). Die Lage der Profile ist in der Abbildung 9 dargestellt.

6 Messergebnisse

Aus den geoelektrischen Messprofilen (Primäresultate) wurden durch Inversion die Vertikalschnitte mit realen Tiefen und spezifischen Widerständen berechnet und als geoelektrische Vertikalschnitte abgebildet. In der Abbildung 10 sind die repräsentativen Profile K3, K5 und K6 dargestellt. Man erkennt vom Profilanfang im Norden bis zur Spree bei 300 m einen zunehmenden niederohmigen Bereich, welcher durch das aufsteigende Salzwasser hervorgerufen wird (Widerstandswerte unter $80 \Omega\text{m}$, rote Linie). Aus diesen Daten (x, y, z und Widerstandswert) ist ein 3D-Datensatz generiert worden. In den daraus ermittelten 2D-Horizontalschnitten für unterschiedliche Tiefen erkennt man deutlich die Kontur der Salzwasserintrusion (Abb. 11). Während sie in einer Tiefe von 2,5 m lediglich an den GWM 2 sowie längs der Spree ausgebildet ist, nimmt der niederohmige Bereich bei 5 und 10 m in der Fläche zu und hat bei 20 m Tiefe die größte Verbreitung.

Für die Gesamtschau der Struktur der migrierenden salinaren Tiefenwässer wurde eine 3D-Darstellung erzeugt (siehe Abb. 12). Darin ist deutlich die stark differenzierte Kontur der Salzwasserintrusion zu erkennen.

Zusammenfassung

Im Rahmen gewässerökologischer Untersuchungen wurde im Bereich eines Altarmes der Spree eine Chlorid-Anomalie von 188 mg/l im oberflächennahen Grundwasser festgestellt. Hydrogeochemisch-genetische Bewertungen der Grundwasseranalysen mit der Software GEBAH ergaben in



Abb. 7: Untersuchungsgebiet der Geoelektrik

Fig. 7: Investigation area of geoelectric



Abb. 8: Geoelektrische Messungen über die Spree

Fig. 8: Geoelectric measurements over the river spree

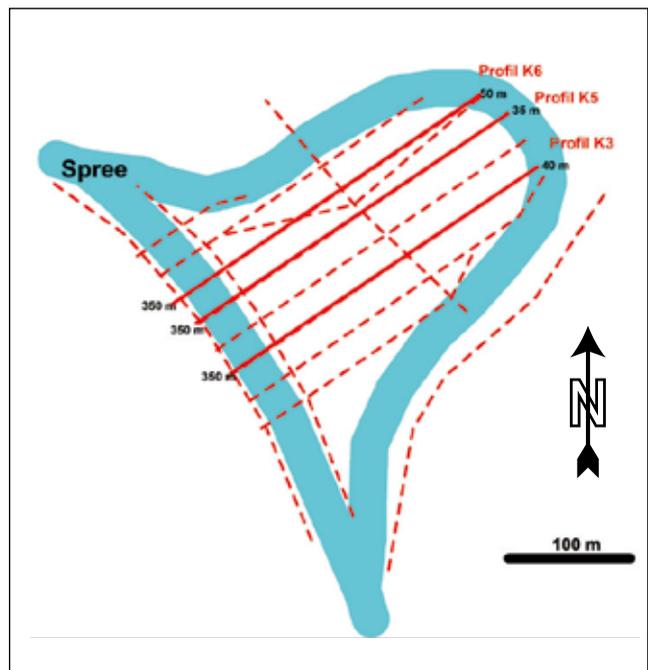


Abb. 9: Lage der Messprofile im Untersuchungsgebiet

Fig. 9: Location of the measurement profiles in the investigation area

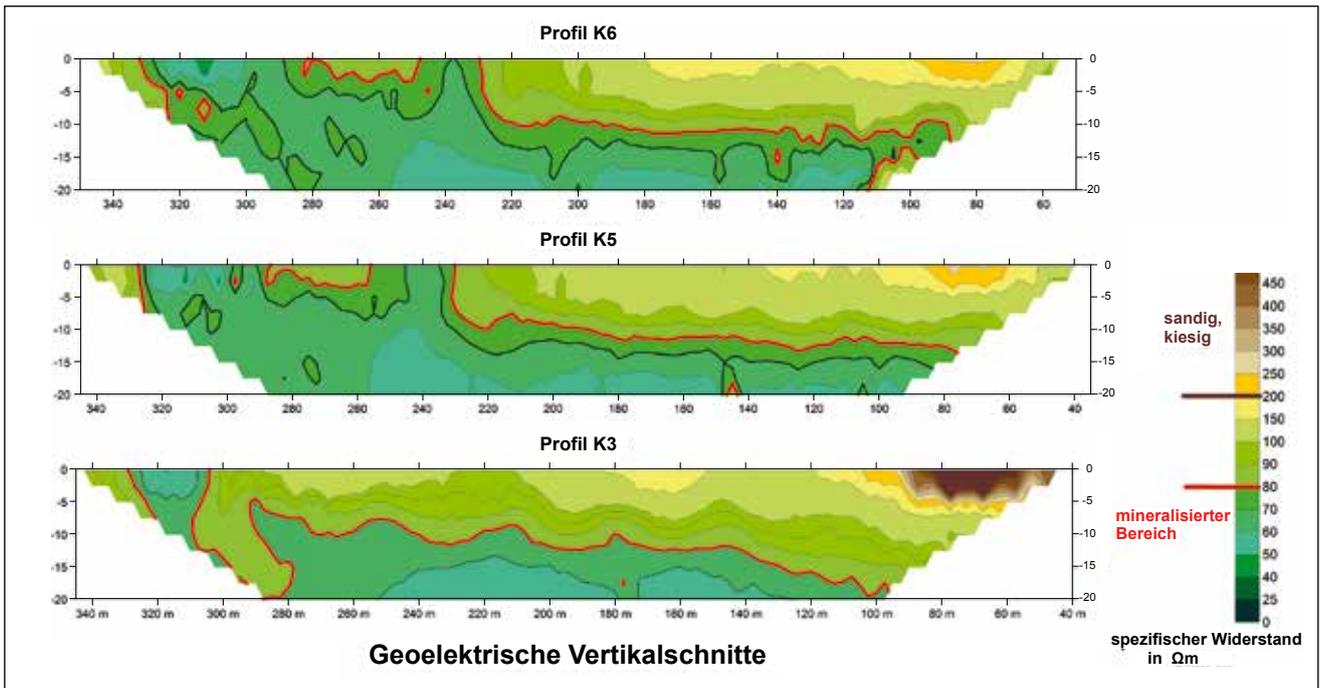


Abb. 10: Geoelektrische Vertikalschnitte zu den Messprofilen K3, K5 und K6

Fig. 10: Geoelectrical cross sections

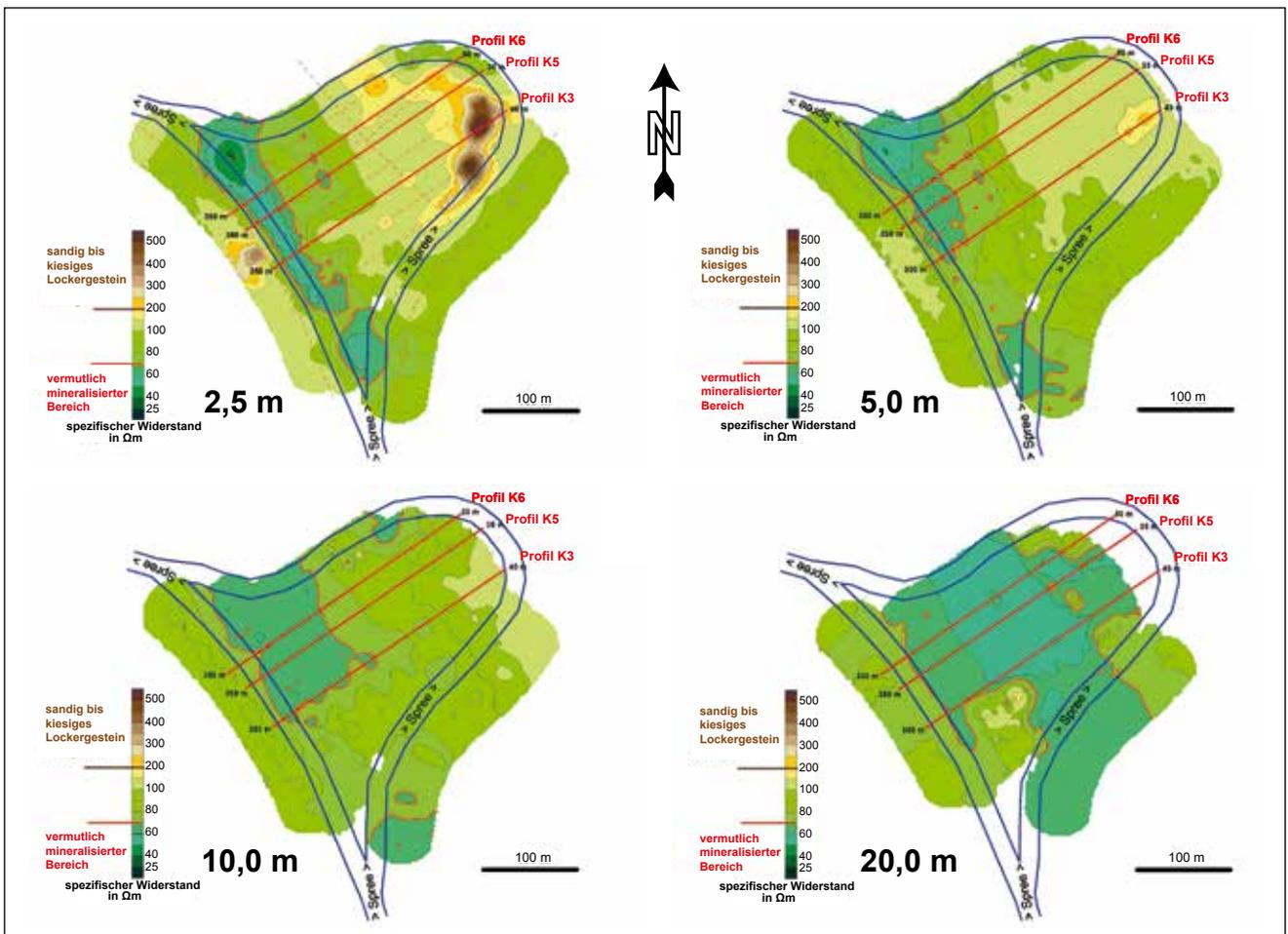


Abb. 11: Geoelektrische Horizontalschnitte in den Tiefenbereichen 2,5 m, 5 m, 10 m und 20 m

Fig. 11: Geoelectrical horizontal sections

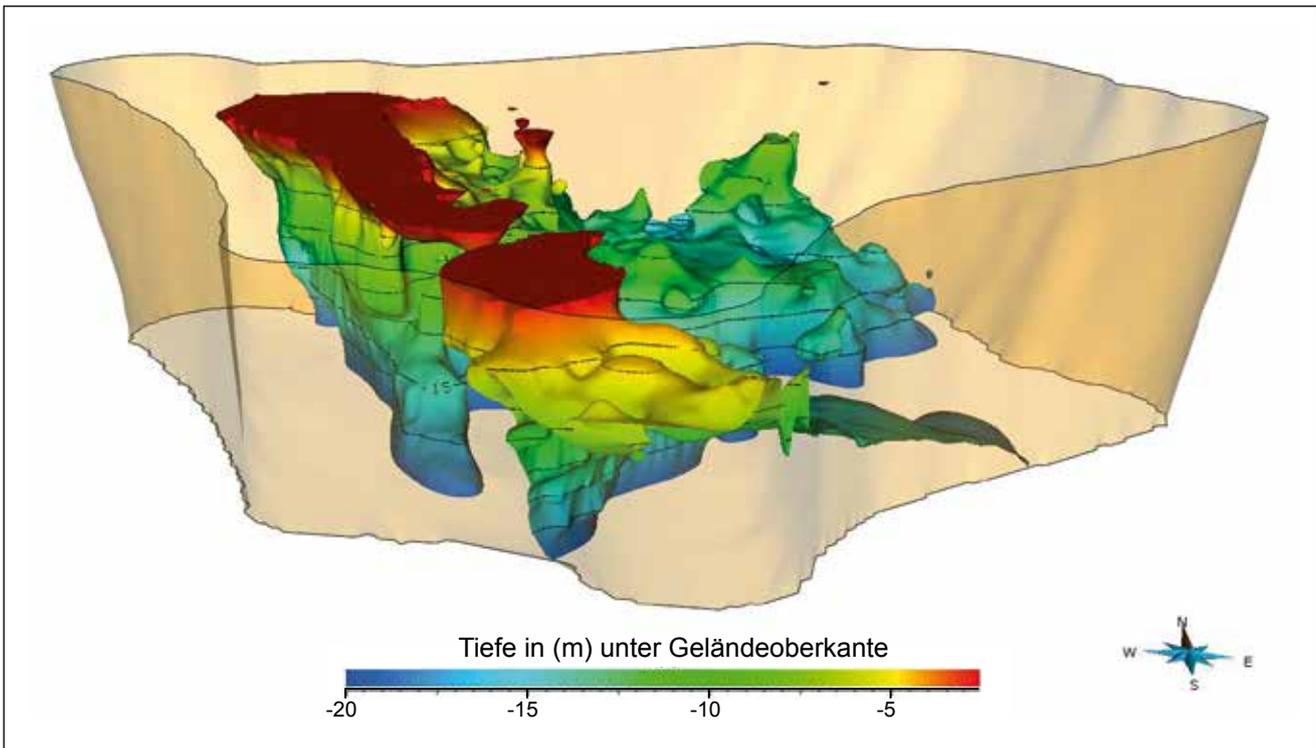


Abb. 12: 3D-Darstellung der Salzwasserintrusion (rot) im Untersuchungsgebiet
 Fig. 12: 3D-view of the saltwater intrusion (red) in the investigation area

der Diagnose eindeutig Speisungsanteile von salinaren Tiefenwässern. Aus der Bewertung der geologischen Situation wird ersichtlich, dass diese salinaren Wässer aus mesozoischen Schichten stammen müssen und über eine quartäre Rinne ins Süßwasserstockwerk gelangen.

Für die Detektion der Konfiguration der Salzwasserintrusion sind neun Geoelektrikprofile gemessen worden. Aus den geoelektrischen Messdaten wurden durch Inversion die Vertikalschnitte mit realen Tiefen und spezifischen Widerständen berechnet und als geoelektrische Vertikalschnitte ausgegeben. Des Weiteren ist aus den ermittelten Widerstandswerten mit den zugehörigen Raumdaten ein 3D-Datensatz generiert worden, der wiederum die Grundlage für die Berechnung und Darstellung von 2D-Horizontalschnitten sowie eines 3D-Modells bildet.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine recht gute Abbildung der hydrogeologischen Situation mit der Salzwasserintrusion im Untersuchungsgebiet durch die Widerstandsgeoelektrik möglich ist. Die Genauigkeit der geophysikalischen Methode liegt im Meter-Bereich. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz ist jedoch bei diesem Verfahren ein unbedeckter Grundwasserleiter.

Summary

Within the framework of water ecologic investigations of an abandoned meander channel of the river Spree, a chloride anomaly of 188 mg/l was determined in near surface groundwater samples. Hydrogeochemical-genetic assessments of

the groundwater analyses with the software GEBAH clearly showed the influence of deep saline water. From the assessment of the geological situation, it can be seen that these saline waters must originate from deeper Mesozoic layers and reach the freshwater aquifers via a quaternary channel. In order to detect the pattern of the saltwater intrusion, nine geoelectric profiles were measured. The geoelectric vertical sections with real depths and specific electrical resistivity were calculated by an inversion algorithm to process geoelectrical measurement data. Furthermore, a 3D data set has been generated from the measured resistivity values, which forms the basis for the calculation and representation of 2D horizontal sections as well as a 3D model.

Overall, it can be stated that geoelectric resistivity measurements provide a good insight into the hydrogeological situation of areas where saline water moves into freshwater aquifers. The accuracy of the geophysical results is in the meter range. However, a requirement for the successful use of this method is an unconverted aquifer.

Literatur:

JORTZIG, H. (2000): Geologische Übersichtskarte 1 : 100 000 – Karte ohne Quartär mit Darstellung der Tiefenlage der Quartärbasis. – Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Kleinmachnow

KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & G. LANGE (1997): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Alt-

lasten. – Band 3: Geophysik, S. 144, Berlin, Heidelberg
(Springer-Verlag)

LIPPSTREU, L. & H. JORTZIG (1997): Abbildung in: LIPPSTREU, L., HERMSDORF, N. & A. SONNTAG (1997): Geologische Übersichtskarte 1 : 300 000. –Landesamt für Geologie und Rohstoffe Brandenburg und Landesvermessungsamt Brandenburg, Kleinmachnow, Potsdam

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

SCHOLZ, E. (1962): Die naturräumliche Gliederung Brandenburgs. – Veröffentl. d .Pädag. Bezirkskabinetts, 93 S., Potsdam

SONNTAG, A. (2004): Tiefenlage der Quartärbasisfläche des Landes Brandenburg 1: 500 000. – Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Kleinmachnow

Anschrift der Autoren:

Dr. rer. nat. Hellfried Petzold
Althoffstraße 23
14482 Potsdam
hellfriedpetzold@online.de

Dipl.-Geol. Uwe Kaboth
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Dezernat Hydrogeologie
Inselstraße 26
03046 Cottbus
uwe.kaboth@lbgr.brandenburg.de

Dipl.-Ing. (FH) Angela Sonntag
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Dezernat Geologische Landesaufnahme/Geoarchiv
Inselstraße 26
03046 Cottbus
angela.sonntag@lbgr.brandenburg.de

Kurzmitteilung

Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e. V. – 28. traditionelle 1. Mai-Exkursion 2017 – Bunte Seen und große „Schuppen“ im Muskauer Faltenbogen

Die traditionelle geologische Exkursion des Vereins der Geowissenschaftler in Berlin und Brandenburg e.V. am 1. Mai 2017 ging in den polnischen Teil des Geoparks Muskauer Faltenbogen. Auf der Exkursion und während des Vorbereitungssymposiums konnten alle Interessierten wie schon in den letzten Jahren wieder einiges dazu lernen.

Das vorbereitende Symposium fand am 29.04.2017 statt. Unser Exkursionsziel, der „Geopark Muskauer Faltenbogen“, wurde geologisch und im Sinne der touristischen Vermittlung vom – zumindest uns bekannten – allerbesten Kenner dieser glazitektonischen Struktur, Dr. M. Kupetz, vorgestellt. Während seiner zwei Vorträge spürten wir, dass er in seinem ureigenen Element war und alle hörten gespannt zu.

Eingeleitet wurde das Symposium von Dr. C. Ellger von der GeoUnion Alfred-Wegener-Stiftung. Er zeigte den langen Weg von der Idee der Gründung des 1. Geoparks bis zur heutigen Vielfalt auf und diskutierte die Institution „Geopark“ als Instrument für geowissenschaftliche Öffentlichkeitsarbeit. Es folgten die o. g. zentralen Vorträge von Dr. M. Kupetz. Im Anschluss daran berichtete sehr interessant Herr D. Protzmann, Kommunalpolitiker und Direktor des Amtes Joachimsthal (Schorfheide), wie sich ein Geopark in der Lokalpolitik widerspiegelt und umsetzen lässt, hier der Geopark Eiszeitland am Oderrand. Einfach ist das offenbar nicht. Enthusiasmus und Ausdauer gehören mindestens dazu. Beides hat Herr Protzmann und Frau Quart.

Anschließend wurde von Dr. G. Lutze ein weiteres geologisch ausgerichtetes Projekt aus unserer Region vorgestellt,



Abb. 1: Exkursionspunkt Bergbaurestgewässer mit erodierter Abraumphalde (Foto A. BEBIOLKA)

die „Märkische Eiszeitstraße“. Auch hier steht die Vermittlung der Geologie und der Landschafts- und Kulturgeschichte sowie die Gewinnung neuer Erkenntnisse über die Region im Fokus. Die Menschen vor Ort und die Besucher aus der Ferne können sich an zahlreichen Stationen zu den Besonderheiten und zum Formenschatz der Landschaft informieren. Das macht Arbeit, hat aber Anerkennung.

Ein schönes Schlusswort des Symposiums mit exzellenter Würdigung der Vortragenden, mit Heraushebung des Themas, konnten wir wie gewohnt von Prof. J. H. Schroeder genießen. Der Höhepunkt war selbstverständlich die eigentliche Exkursion am 1. Mai 2017. Nun ging es in den polnischen Teil des Hufeisens, die Form des Muskauer Faltenbogens. Gleich zum Anfang machten wir Halt am „Teufelsstein“, an einem noch nicht untersuchten, sehr wahrscheinlich prähistorischen Opfer- oder Ritualstein (?). Eine wirklich schöne Bemerkung einer Exkursionsteilnehmerin auf die allgemeine Frage hin, warum hier noch keine tiefere archäologische Untersuchung stattgefunden hätte, war, man könne doch das Mysterium um diesen bearbeiteten Riesenfindling einfach belassen. Das lässt für jeden Besucher Spielraum für eigene Gedanken und Interpretationen. Das stimmt natürlich. Und der Findling ist mit rund 40 m³ Volumen ziemlich groß. Er weist mehrere, sternförmig angeordnete, vielleicht unvollendete Einkerbungen bzw. Löcher auf. Vergleichbare Bearbeitungsspuren waren den Exkursionsteilnehmern nicht bekannt. Das Mysterium wird wohl weiterhin offen bleiben.

Im polnischen Teil des Geoparks erwartete uns ein schön angelegter, mit instruktiv zweisprachig beschriebenen und gut bebilderten Tafeln ausgestatteter Wanderweg. Dieser führte uns an prägnanten geologischen Punkten vorbei. Beispielsweise an Bergbaurestgewässern mit bizarren Erosionsformen an den Seeufern, die durch den Abbau von Braunkohle und Ton für die Keramikherstellung entstanden, ausstreichende Kohleflöze, versunkene Wälder an Gieserstrukturen, saure Quellen mit Quellschüsseln aus Gips, Goethit, Schwertmannit und Jarosit – wie gesagt, alles immer gut erklärt an Schautafeln und bei unserer Exkursion noch viel besser mit der Erfahrung von Jahrzehnten und eben mit viel Herz von Dr. M. Kupetz. Einfach ein Genuss.

Ausdrücklich Dank sagen möchten wir den Organisatoren Frau Dr. A. Ehling und Herrn Dr. H. Feldrappe, den Vortragenden im Symposium und insbesondere Herrn Dr. M. Kupetz. Er hat der diesjährigen Exkursion den fachlichen Hintergrund gegeben und auch die Begeisterung für diesen Geopark mit seinen Besonderheiten in uns geweckt. Mit Erfolg!

Wer nachlesen möchte, dem sei noch folgende Literaturquelle genannt. Dr. Kupetz und seine Frau haben zum Muskauer Faltenbogen ein bemerkenswertes, reich illustriertes Buch veröffentlicht (Dr. Kupetz nannte es im Vortrag bescheiden „das Pfeil Buch“):

KUPETZ, A. & M. KUPETZ (2009): Der Muskauer Faltenbogen. – Wanderungen in die Erdgeschichte 24, 224 S., München (Verlag Dr. Friedrich Pfeil), ISBN 978-3-89937-100-0

Helge Albert und Anke Bebiolka

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 29–37	8 Abb., 1 Tab., 1 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	------------------------

Detektion der Süß-/Salzwassergrenze mittels geoelektrischer und elektromagnetischer Verfahren – Beispielhafte Untersuchungen an einem Standort westlich der Stadt Müllrose

Detection of the freshwater/saltwater boundary with geoelectric and electromagnetic methods – exemplary investigations west of the city of Müllrose

RAINER HERD & WLAD SCHAFRIK

Einleitung und Zielstellung

Zur Sicherung der Trinkwasserversorgung werden in Brandenburg quartäre Süßwasserreservoirare genutzt. Diese sind von dem tiefer liegenden Salzwasserstockwerk durch den unteroligozänen Rupelton getrennt. Infolge elsterkaltzeitlicher Eisvorstöße und dem nachfolgenden Abschmelzen der Inlandseismassen entstanden im Pleistozän tiefreichende Rinnensysteme, welche die Rupeltonbarriere reduzierten bis teilweise völlig erodierten. Eine weitere Beeinträchtigung der Barrierewirkung erfolgte durch tektonische Störungssysteme, die lokal zu einem Versatz des Rupeltons führten. Beim Auftreten entsprechender Druckgradienten erfolgt eine Migration von salinen Tiefenwässern über diese Fehlstellen in die Süßwasserreservoirare mit entsprechenden Folgen für deren Nutzung. Im Rahmen des Projektes „Detektion der Süß-/Salzwassergrenze bis 200 m Tiefe mittels geoelektrischer und elektromagnetischer Un-

tersuchungen an einem Standort westlich der Stadt Müllrose“ sollten die Tiefenlage und räumliche Verteilung der Süß-/Salzwassergrenze in diesem Gebiet erkundet werden (s. Abb. 1). Zu diesem Zweck wurde eine am Lehrstuhl Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft der BTU Cottbus-Senftenberg entwickelte Methode, die eine Kombination von geoelektrischen und elektromagnetischen Verfahren verwendet, eingesetzt.

Untersuchungsmethodik

Die verwendete Untersuchungsmethodik stellt eine Kombination aus geoelektrischer Tomographie (ERT) und Frequenzbereichs-Elektromagnetik (Frequency Domain Electromagnetic Method, FDEM, nachfolgend als EM bezeichnet) dar. Da das Prinzip der ERT bereits im Beitrag von PETZOLD et al. in diesem Band erläutert wird, werden im

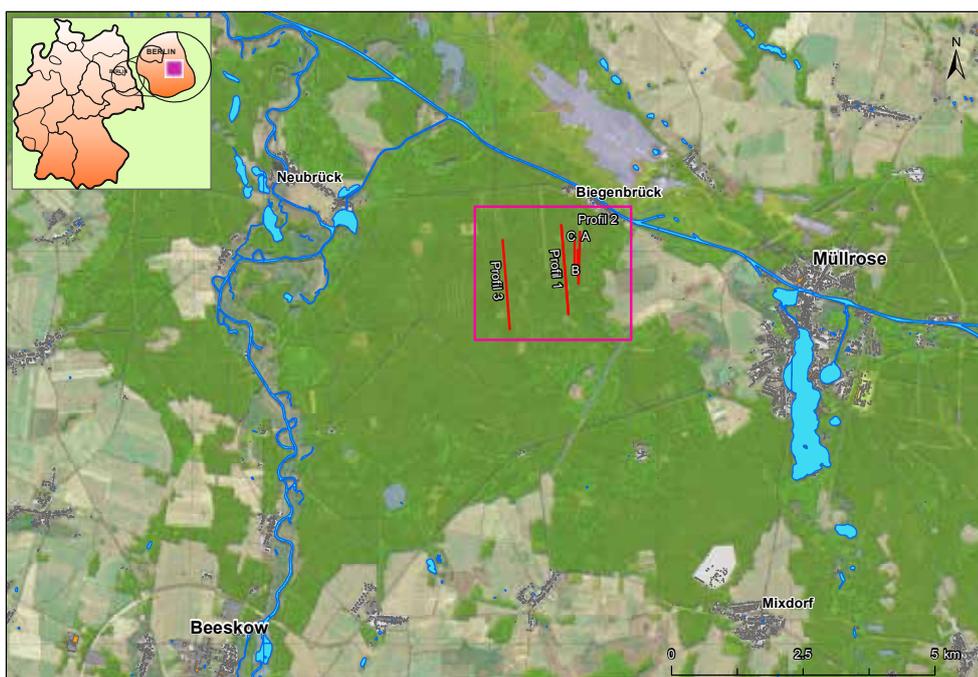


Abb. 1:
Lage des
Untersuchungsgebietes und
der Untersuchungsprofile
westlich Müllrose

Fig. 1:
Location of the investigation
area and investigated
profiles west of Müllrose

Folgenden für den Bereich ERT nur die wesentlichen Spezifika kurz vorgestellt während das EM-Verfahren im Detail beschrieben wird.

Geoelektrische Tomographie (ERT)

Einsatzmöglichkeiten und Grenzen

Das Verfahren der ERT misst die elektrischen Widerstände des Untergrundes. Hier spielen einerseits die Gesteinswiderstände und andererseits das eventuell vorhandene Porenfluid eine Rolle. Typische Gesteinswiderstände sind in Tabelle 1 aufgeführt. Besonders aussagekräftig ist das Verfahren beim Auftreten von großen Widerstandskontrasten, z. B. zwischen Fest- und Lockergesteinen, zwischen Salz- und Süßwasser sowie zwischen Luft oder Sediment erfüllten Bereichen. Die Auflösung der Methode wird durch den Elektrodenabstand bestimmt. Große Elektrodenabstände ermöglichen eine große Erkundungstiefe bei geringer vertikaler und horizontaler Auflösung, kleine Elektrodenabstände ermöglichen dagegen eine hohe Auflösung im oberflächennahen Bereich bei einer nur geringen Erkundungstiefe. Die verwendete Messgeometrie ermöglicht eine Erkundungstiefe von ca. 70 m.

Aufgrund der Notwendigkeit der galvanischen Ankopplung der Elektroden an den Untergrund stellen extrem gering leitfähige Deckschichten (z. B. trockene Sande) wegen der hier auftretenden hohen Übergangswiderstände eine Schwierigkeit bei geoelektrischen Messungen dar.

Material	Widerstand (Ωm)
Kies (trocken)	> 1 000
Kies (wassergesättigt)	200–300
Sand (trocken)	> 1 000
Sand (wassergesättigt)	80–200
Ton (trocken)	> 1 000
Ton (wassergesättigt)	3–30
Schluff (wassergesättigt)	15–60
Geschiebemergel (wassergesättigt)	30–80
Braunkohle (wassergesättigt)	15–40
Torf (wassergesättigt)	15–80
Brackwasser	< 10
Meereswasser	< 1

Tab. 1: Typische elektrische Widerstände von verschiedenen Materialien

Tab. 1: Typical electrical resistivities of different materials

Die wesentliche Aufgabe der geoelektrischen Messungen im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen war die Lieferung eines Widerstandsmodells bis ca. 70 m Tiefe, das als Startmodell für die Inversion der elektromagnetischen Daten benötigt wird. Dieses Modell ist notwendig in Bereichen, in denen geophysikalische Bohrlochmessungen, aus denen ebenfalls Widerstandsmodelle/Startmodelle abgeleitet werden können, nicht vorhanden sind bzw. nicht zur Verfügung stehen.

Messdurchführung

Die Untersuchungen erfolgten auf langen, geraden Profillinien. Zum Einsatz kam ein Messgerät der Marke SYSCAL Pro Switch 48 unter Verwendung von 48 Elektroden und einem Multielektroden-Kabel mit 10 m Abgriffen, hergestellt von IRIS Instruments, Orleans, Frankreich. Folgende Grundeinstellungen wurden verwendet:

- Angelegte Spannung: 800 V
- Injektionszeit: 1 s
- Qmax (max. Messwertabweichung): 3 %
- Wiederholungsmessungen: min. 3, max. 6
- Elektrodenkonfiguration: Wenner-Alpha-Anordnung
- Anzahl der Elektroden: 48
- Elektrodenabstand: 10 m

Elektromagnetik (EM)

Als zentrales Erkundungsverfahren zur Bearbeitung der Fragestellung wurde das EM-Verfahren eingesetzt. Das Verfahren basiert auf dem Einsatz von elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Frequenz zur Bestimmung der Untergrundwiderstände. Das System besteht aus 2 Spulen, einer Sende- und einer Empfangsspule (s. Abb. 2). Mithilfe einer stromdurchflossenen Sendespule wird ein elektromagnetisches Signal in den Boden gesendet, dieses erzeugt insbesondere in den leitfähigen Bodenpartien Ströme, die wiederum ein sekundäres elektromagnetisches Feld erzeugen. Der Magnetfeldanteil dieses Sekundärfeldes wird mit der Empfangsspule aufgezeichnet und über eine Kabelverbindung mit dem Primärsignal verglichen, sowohl der phasengleiche Anteil (In-Phase) als auch der phasenverschobene Anteil (Out-Phase) werden registriert. Aus dem Verhältnis Sekundärfeld/Primärfeld (Hs/Hp) lässt sich die Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund bestimmen.

Durch die Verwendung von mehreren Frequenzen (Frequenz-Sondierung) sowie durch Variation der Sender/Empfänger-Abstände (geometrische Sondierung) können unterschiedliche Eindringtiefen realisiert werden. Unter Verwendung des aus der geoelektrischen Untersuchung abgeleiteten Widerstandsmodells als Startmodell erfolgt eine Inversion der elektromagnetischen Primärdaten (In-Phase-, Out-Phase-Werte für jede Frequenz und Messgeometrie) zunächst zu 1D-Widerstands-Schichtmodellen (s. Abb. 2, rechts) und eine anschließende Zusammenführung zu 2D-Widerstandsverteilungen.

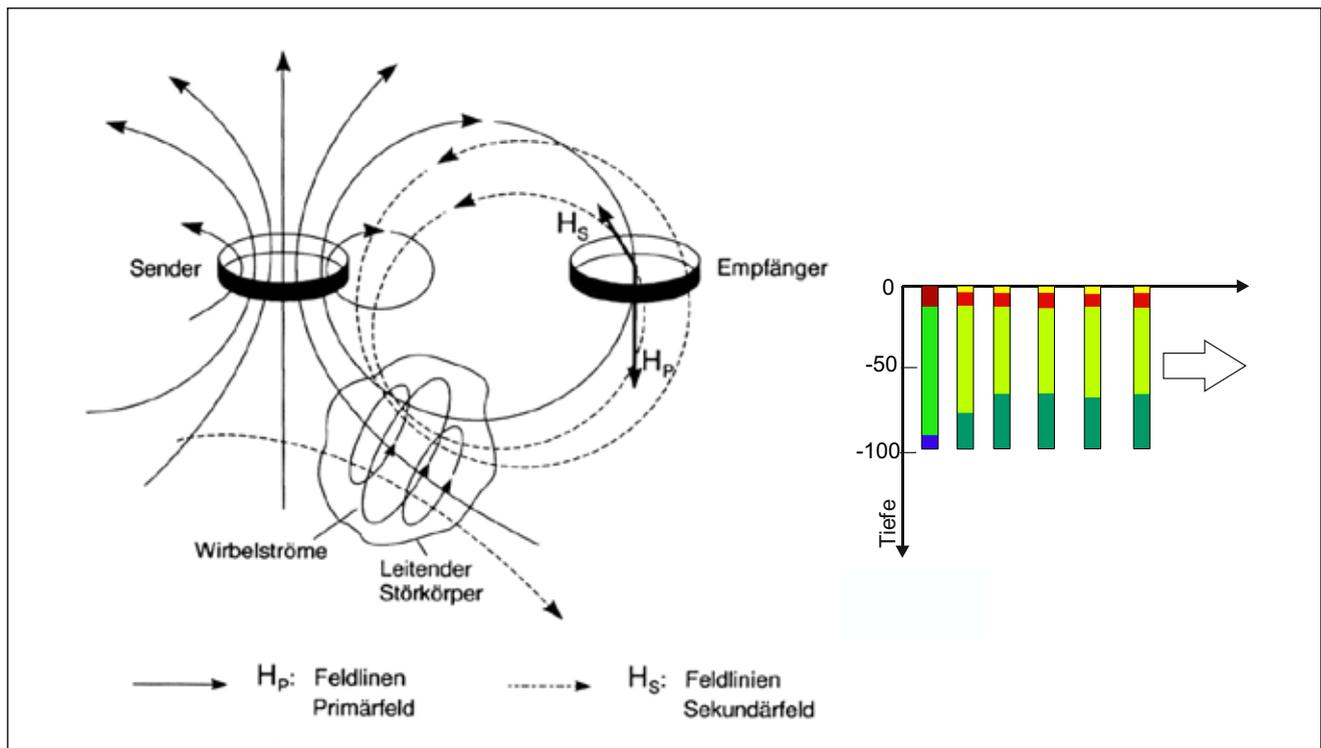


Abb. 2: Funktionsweise eines elektromagnetischen Zweispulens-Systems nach PORSTENDORFER et al. (1985) (links) sowie Darstellung der 1D-Widerstands-Schichtmodelle (rechts)

Fig. 2: Principle of an electromagnetic 2-coil system after PORSTENDORFER et al. (1985) (left) and illustration of 1D resistivity models

Einsatzmöglichkeiten und Grenzen

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei dem EM-Verfahren um ein Induktionsverfahren handelt, ist es insbesondere für die Detektion gut leitfähiger Schichten und Körper (wie z. B. salinar beeinflusste Bereiche eines lithologischen Profils) geeignet. Ein großer Vorteil gegenüber der Geoelektrik besteht darin, dass eine galvanische Ankopplung an den Untergrund entfällt, insbesondere häufig auftretende hohe Übergangswiderstände bei geringleitfähigen Deckschichten (trockene, märkische Sande) stellen eine Schwachstelle des ERT-Verfahrens dar, die bei der EM entfällt. Ein Nachteil der EM ist die Störanfälligkeit durch metallische Leiter (Zäune, Rohrleitungen, elektrische Leitungen). Diese erzeugen ebenfalls Sekundärfelder, welche die Messungen empfindlich stören können.

Messdurchführung

Analog zu den geoelektrischen Untersuchungen erfolgten die elektromagnetischen Messungen auf den gleichen, geraden Profillinien. Verwendet wurde das System MAXMIN 1-9 von APEX Parametrics, Kanada. Als Spulenanordnung wurde die horizontal koplanare Anordnung ausgewählt, da diese eine maximale Sender/Empfänger Kopplung gewährleistet. Die maximale Empfindlichkeit liegt bei dieser Anordnung in der Tiefe des 0,4 fachen Abstands zwischen Sender- und Empfängerspule. Verwendet wurden 8 Frequenzen zwischen 110 Hz und 14 080 Hz, wodurch unterschiedliche Eindringtiefen realisiert wurden (Frequenz-Sondierung).

Durch die Verwendung verschiedener Abstände (50 m und 100 m Separation) zwischen Sender- und Empfängerspule wurde die Erkundungstiefe variiert. Die maximale Erkundungstiefe entspricht bei der 100 m Separation 150 m. Zur Interpretation der Daten wurde zunächst, mittels des Inversionsprogramms IX1Dv3 von Interpex, an den jeweiligen Messpunkten ein 1D-Widerstands-Schichtmodell erzeugt (s. Abb. 2, rechts), anschließend erfolgte die Anordnung der Widerstands-Schichtmodelle entlang des Profilverlaufs und die zweidimensionale Interpretation.

Lage des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im südlichen Brandenburg, ca. 5 km westlich der Stadt Müllrose (s. Abb. 1). Aufgrund von Anzeichen eines Salzwassereinflusses auf die lokalen Aquifere wurde es für die Untersuchungen durch das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe ausgewählt. Die Untersuchungsprofile verlaufen annähernd Nord/Süd.

Ergebnisse und Diskussion

Allgemeine Erläuterungen

Das Erkundungsziel „die Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze bzw. der Salzwasser beeinflusste Bereich eines litho-

logischen Profils“ zeichnet sich aufgrund des salinar beeinflussten Porenfluids durch niedrige Widerstandswerte aus und wurde per Definition auf den Widerstandswert $< 10 \Omega\text{m}$ festgelegt. Eine eindeutige Zuordnung dieses Widerstands als „Salzwasser beeinflusster Bereich“ ist nur möglich, wenn keine weiteren lithologischen Einheiten mit gleichen Widerstandswerten (z. B. Tone) im Untersuchungsgebiet erwartet werden können.

Während des Untersuchungsprogramms zeigte sich, dass zur Lösung der gestellten Aufgabe unter den gegebenen geologisch/hydrogeologischen Bedingungen im Wesentlichen das EM-Verfahren mit einem Sender/Empfänger Abstand von 100 m (100 m Separation) geeignet ist. Die Ergebnisse dieser Messkonfiguration werden nachfolgend zur Beurteilung der Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze verwendet, alle weiteren Konfigurationen und deren Ergebnisse werden in die Beurteilungen einbezogen aber nicht in ihrer Gänze besprochen.

Die Aufteilung von Profil 2 in mehrere Profile (2A, 2B, 2C) ist der Störung des EM-Messsignals auf dem ursprünglichen Profil 2A geschuldet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ERT- und EM-Messungen profilbezogen vorgestellt und diskutiert.

Profil 1

Profilverlaufsrichtung (magnetisch Nord): 177°

ERT-Elektrodenabstand: 10 m

EM-Separation: 50 m, 100 m

Gesamtlänge: 1 650 m

RMS-Fehler (ERT): 2,8 %

Das Untersuchungsprofil verläuft am Rande eines Waldweges. Die Ergebnisse der ERT- sowie der EM-Messungen mit einem Sender/Empfänger-Abstand von 50 m (Separation 50 m) sowie die Ergebnisse der EM mit einem Sender/Empfänger-Abstand von 100 m (Separation 100 m) sind in Abbildung 3 gemeinsam dargestellt. Als Anhaltspunkt für die lokalen geologischen Bedingungen sind die lithologischen Profile im Umfeld gelegener Bohrungen in die Darstellung der EM-Profile projiziert.

Die Widerstandsverteilungen der unterschiedlichen Verfahren bzw. Messgeometrien weisen große Ähnlichkeiten auf. Generell zeigt sich eine Zweiteilung des Profils. Im nördlichen Profilverteil bis ca. Profilmeter 770 zeigt sich eine hochohmige trockene, sandige Deckschicht (rote Farbe), welche im südlichen Profilverteil weitestgehend fehlt. Im Tiefenbereich bis ca. 44 m folgen im nördlichen Teil sandig/schluffige Ablage-

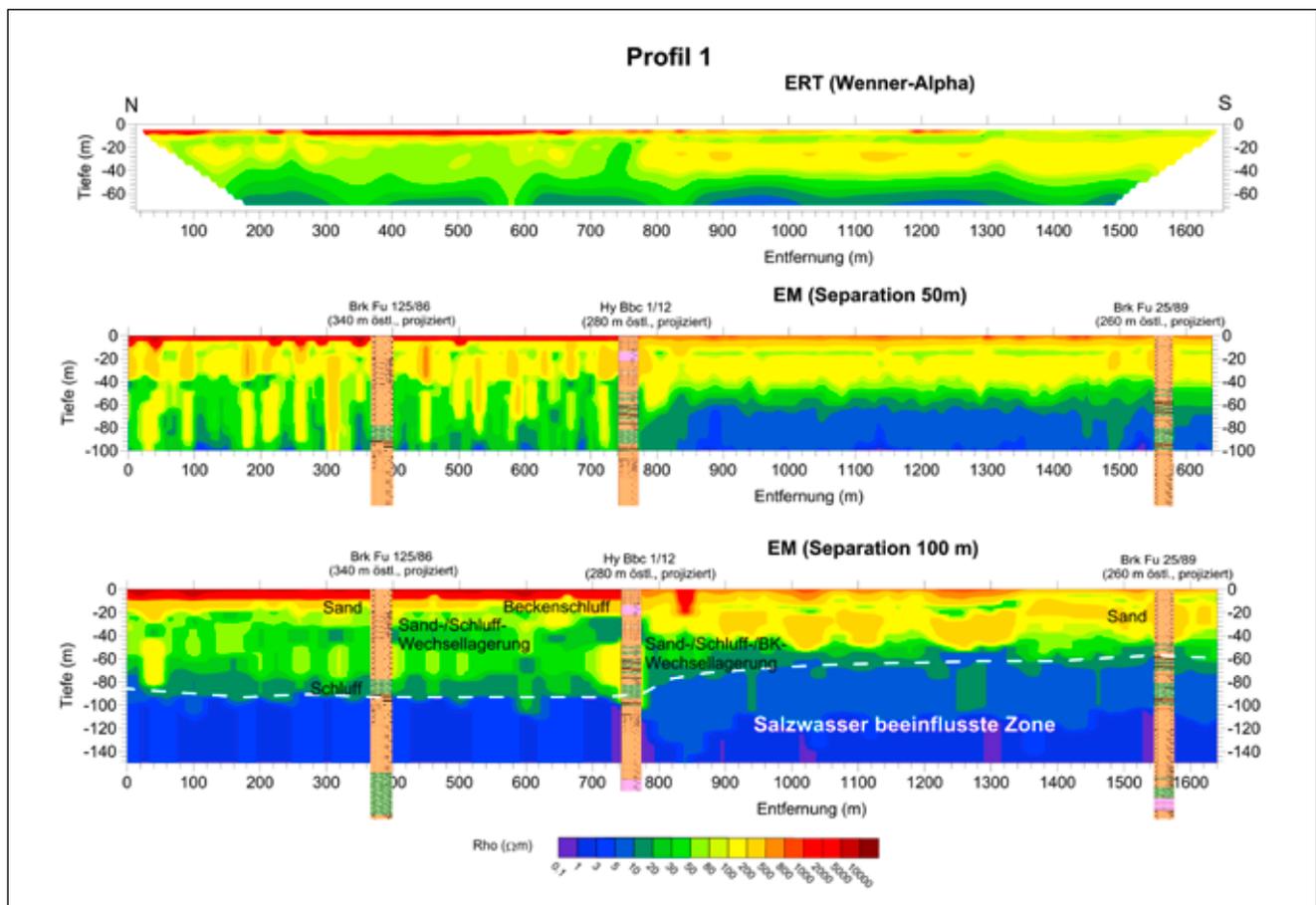


Abb. 3: Widerstandsverteilungen entlang Profil 1 resultierend aus ERT- und EM-Messungen. Deutlich sichtbar ist der Salzwasser beeinflusste Bereich. BK = Braunkohle

Fig. 3: Resistivity distribution along profile 1 resulting from ERT and EM measurements. Clearly visible is the zone influenced by saltwater. BK = brown coal

rungen (grünliche Farben), im südlichen Teil ab Profilmeter 770 bis Profildende dominieren dagegen sandige Ablagerungen (gelbliche Farben). Von 44 m Tiefe an herrschen über den gesamten Profilverlauf vorwiegend schluffige Ablagerungen (grünliche Farben) vor. Die projizierten Bohrungen zeigen vergleichbare Lithologien. Ab Profilmeter 880 deutet sich bei der ERT in ca. 60 m Tiefe ein Salzwasser beeinflusster Bereich an (blaue Farbe). Dieser ist bei der EM mit 50 m Separation deutlicher sichtbar, wird aber in seinem gesamten Verlauf erst bei der EM mit 100 m Separation erkennbar.

Zur Beurteilung der Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze bzw. des Salzwasser beeinflussten Bereichs eignet sich aufgrund der größeren Eindringtiefe die EM mit 100 m Separation. Sie zeigt einen deutlichen Anstieg des durch Salzwasser beeinflussten Bereichs von ca. 92 m unter Geländeoberkante (GOK) im nördlichen Teil bis ca. 64 m unter GOK im südlichen Bereich des Profils wobei die größten Gradienten im Bereich zwischen Profilmeter 750 bis 950 auftreten.

Profil 2 (A, B, C)

Profil 2A:

Profilverlaufsrichtung (magnetisch Nord): 180°

ERT-Elektrodenabstand: 10 m

EM-Separation Abstand: 50 m, 100 m

Gesamtlänge: 950 m

RMS-Fehler (ERT): 4,8 % bei 2A, 4,2 % bei 2B

Das Untersuchungsprofil 2A stellt das ursprüngliche Profil dar. Bei der Durchführung der EM-Messungen traten massive Störungen im zentralen Teil des Profils auf (s. Abb. 4), die auf einen anthropogenen Störkörper (metallische Rohrleitung, Elektrokabel) hinweisen. Aufgrund dessen wurden die Profile 2B und 2C (s. Abb. 1) angelegt und vermessen. In Abbildung 4 sind die einzelnen Teilergebnisse aus den verschiedenen Verfahren und Konfigurationen zusammenfassend dargestellt.

Neben dem Ergebnis der ERT von Profil 2A im oberen Teil der Graphik (Abb. 4) sind im zentralen Teil die Ergebnisse der EM mit 50 m Separation von Profil 2A und mit 100 m Separation von Profil 2C zusammengeführt. Im unteren Teil der Graphik sind die Rohdaten der EM-Messung (In-Phase-Werte für die eingesetzten Frequenzen) mit 50 m Separation von Profil 2A dargestellt; deutlich wird hier der zentrale gestörte Bereich. Die Ergebnisse der Widerstandsverteilung im Untergrund, die durch die einzelnen Verfahren geliefert werden, sind vergleichbar und korrelieren gut mit dem Schichtaufbau der beiden Bohrungen im unmittelbaren Umfeld (Brk Fu 125/86 und Hy Bbc 1/12). Bezüglich der Frage der Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze bzw. des Salzwasser beeinflussten Bereichs lässt sich feststellen, dass die gemessenen Widerstandswerte < 10 Ωm einen Salzwasser beeinflussten Bereich klar er-

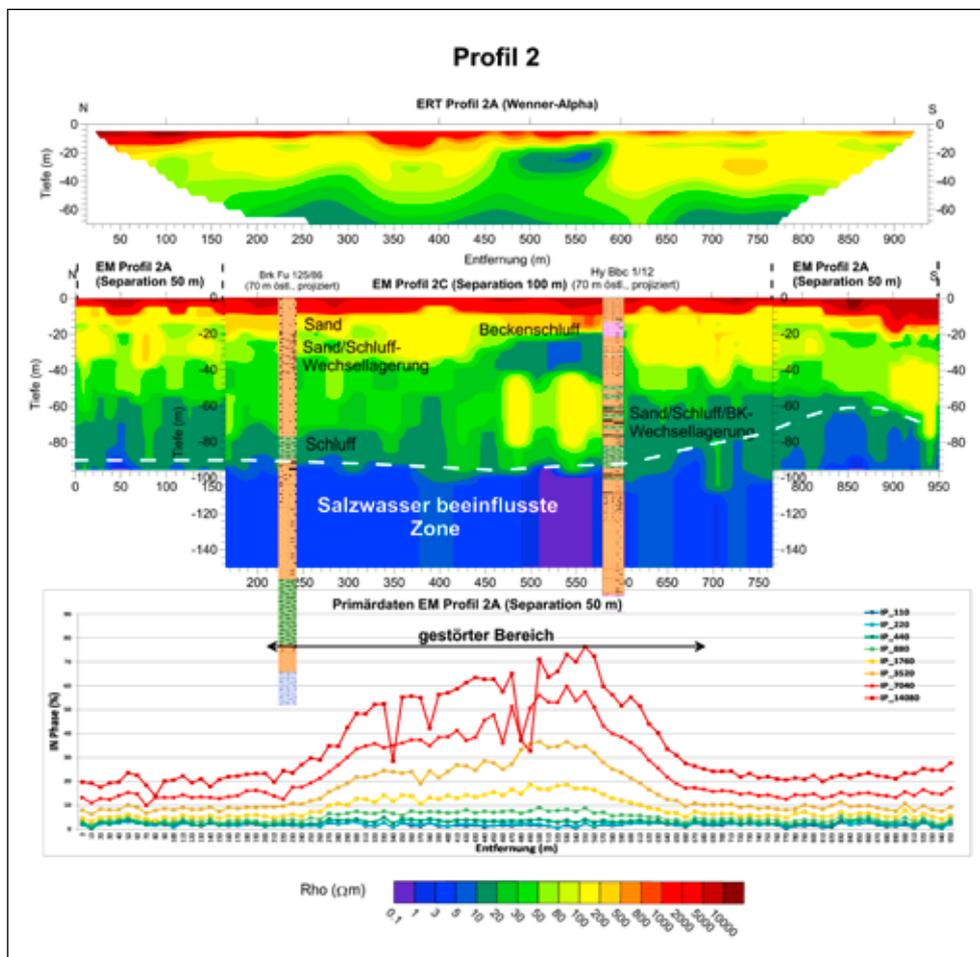


Abb. 4: Widerstandsverteilungen entlang Profil 2 resultierend aus ERT- und EM-Messungen. Der zentrale Teil der EM-Messungen ist stark gestört und musste durch ein parallel verlaufendes Profil (Profil 2C) ersetzt werden. BK = Braunkohle

Fig. 4: Resistivity distribution along profile 2 resulting from ERT and EM measurements. The central part of the EM measurements is intensively disturbed and had to be replaced by a profile running parallel (Profile 2C). BK = brown coal

kennen lassen. Diese Zone liegt bei ca. 92 m unter GOK im nördlichen Bereich und steigt Richtung Süden auf ca. 64 m unter GOK an.

Profil 3

Profilverlaufsrichtung (magnetisch Nord): 177°
 Elektrodenabstand: 10 m
 EM-Separation: 50 m, 100 m
 Gesamtlänge: 1 700 m
 RMS-Fehler (ERT): 5,1 %

Das Untersuchungsprofil liegt deutlich weiter westlich als Profil 1 und Profil 2, verläuft aber ebenfalls annähernd Nord/Süd (s. Abb. 1). Das nachfolgende Foto (Abb. 5) gibt einen Eindruck der lokalen Situation.

Das Ergebnis der ERT (s. Abb. 6 oben) zeigt unter einer fast durchgängig vorhandenen hochohmigen trockenen, sandigen Deckschicht (rote Farbe) im nördlichen Profilteil bis ca. Profilmeter 850 vorwiegend sandige Ablagerungen (gelbliche Farben) bis in eine Tiefe von ca. 44 m, die nach Süden hin deutlich schluffiger/bindiger werden (grünliche Farben). Diese Tendenz zeigen auch die EM-Ergebnisse (50 m und 100 m Separation). Der Schichtaufbau zweier nahe gelegener Bohrungen (Brk Mü 1/72 und Brk Mü 2/74;

Abb. 6) lässt sich gut mit den Widerstandsverteilungen der geophysikalischen Verfahren korrelieren. Bezüglich der Frage der Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze bzw. des durch Salzwasser beeinflussten Bereichs lässt sich feststellen, dass auch hier ein Anstieg dieser Zone von ca. 96 m unter GOK im nördlichen Bereich auf ca. 76 m unter GOK im südlichen Bereich beobachtet werden kann. Das lokale Auftreten von Bereichen mit Widerständen $< 10 \Omega\text{m}$ in geringeren Tiefenniveaus, z. B. bei Profilmeter 180 sowie zwischen Profilmeter 480 und 640, legen die Vermutung auf weitere Salzwasser beeinflusste Bereiche in geringeren Tiefen nahe.

Die Ergebnisse der elektromagnetischen Untersuchungen der Einzelprofile sind in Abbildung 7 zur besseren Visualisierung der Gesamtsituation zusammen dargestellt. Der generelle Anstieg der Süß-/Salzwassergrenze nach Süden wird deutlich.

Evaluierung der Ergebnisse des EM-Verfahrens

Die Auswertung und Interpretation der EM-Daten basiert auf einer 1D-Inversion der Messdaten (In-Phase und Out-Phase von Hx/Hz für die jeweilige Frequenz). Aufgrund



Abb. 5: EM-Messung mit 100 m Separation auf Profil 3 (EM-Sender im Vordergrund)

Fig. 5: EM measurements with 100 m separation on profile 3 (EM transmitter in the foreground)

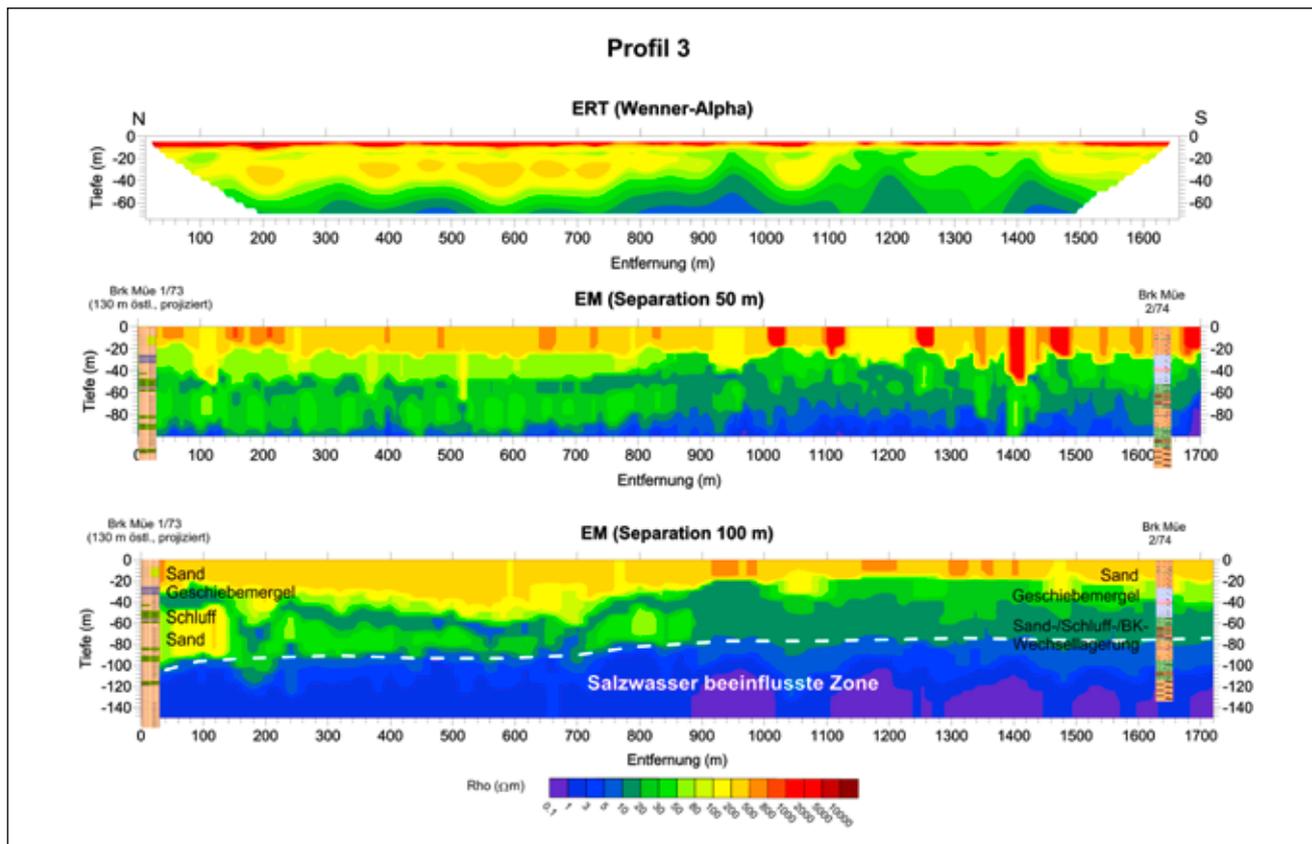


Abb. 6: Widerstandsverteilungen entlang Profil 3 resultierend aus ERT- und EM-Messungen. Neben einer deutlich sichtbaren Salzwasser beeinflussten Zone zwischen 76–96 m Tiefe deuten lokale Bereiche mit Widerstandswerten $< 10 \Omega m$ auf weitere Salzwasser beeinflusste Bereiche in Aquiferen mit geringerer Tiefenlage hin. BK = Braunkohle, Inv. = Inversion

Fig. 6: Resistivity distribution along profile 3 resulting from ERT and EM measurements. Beside a clearly visible saltwater influenced zone from 76–96 m depth local areas with resistivity values $< 10 \Omega m$ indicate additional saltwater influenced zones in aquifers of lower depth. BK = brown coal, Inv. = inversion

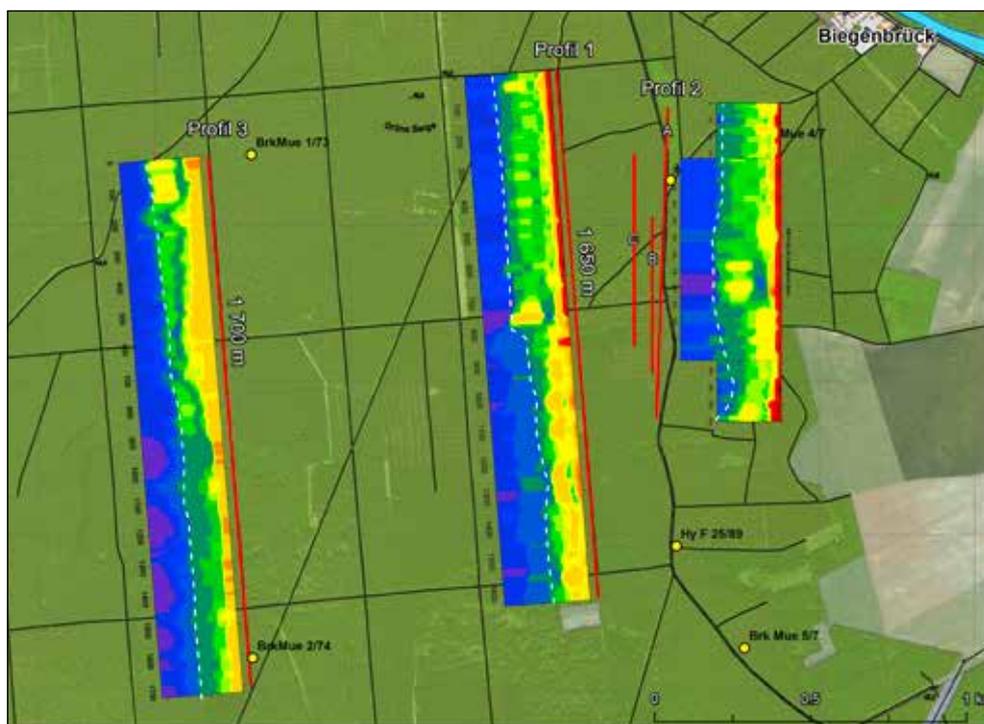


Abb. 7: Zusammenfassende Darstellung der Widerstandsverteilung der Untersuchungsprofile sowie Verlauf der durch Salzwasser beeinflussten Zone basierend auf EM-Messungen mit 100 m Sender/Empfänger Separation

Fig. 7: Combined resistivity distribution of the investigation profiles and course of the zone influenced by saltwater based on EM measurements with a transmitter/receiver separation of 100 m

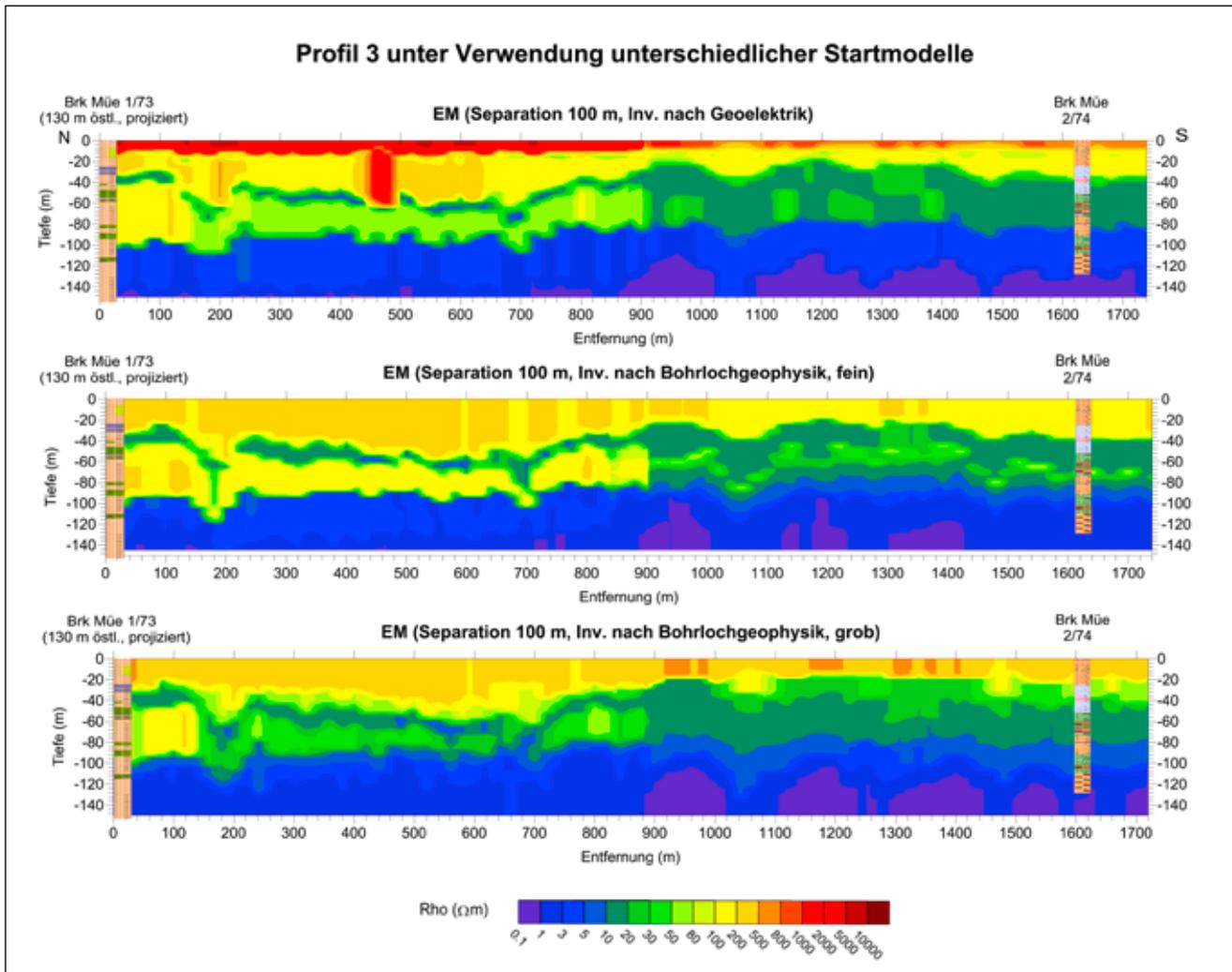


Abb. 8: Inversionsergebnisse der EM-Daten von Profil 3 unter Verwendung unterschiedlicher Startmodelle (oben: Startmodell aus ERT abgeleitet, Mitte: Startmodell aus Bohrlochgeophysik, fein aufgelöst abgeleitet, unten: Startmodell aus Bohrlochgeophysik, grob aufgelöst abgeleitet). Inv. = Inversion

Fig. 8: Inversion results of EM data from profile 3 with different starting models (upper: starting model derived from ERT, middle: starting model derived from geophysical borehole logs, high resolution, lower: starting model derived from geophysical borehole logs, low resolution). Inv. = inversion

des Äquivalenzprinzips hängt das Inversionsergebnis stark vom Startmodell der Inversionsrechnung ab. Startmodelle werden nach Informationen der lokalen Geologie, Schichtenverzeichnissen bzw. falls vorhanden von Widerstandslogs aus Bohrlochmessungen abgeleitet. Insbesondere letztere stehen aber selten bzw. oft nur in großen Abständen zur Verfügung. Um realitätsnahe Modelle zu erzeugen, werden deshalb am Lehrstuhl Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft zusätzlich ERT-Messungen auf den gleichen Profillinien durchgeführt. Diese liefern ähnlich den Widerstandslogs in Bohrungen Widerstands-Tiefenverteilungen, aus denen Startmodelle abgeleitet werden können, mit dem großen Vorteil, dass diese Daten im Gegensatz zu den Punktinformationen von Bohrlochmessungen linienhaft vorliegen.

In Abbildung 8 sind Inversionsergebnisse unter Verwendung unterschiedlicher Startmodelle dargestellt. Als Start-

modell für die obere Darstellung wurden Ergebnisse einer ERT-Messung verwendet. Für die mittlere und untere Darstellung wurden Ergebnisse aus einer geophysikalischen Bohrlochmessung in einer feinen bzw. groben Schichtung entnommen. Obwohl die EM-Daten unter Anwendung unterschiedlicher Startmodelle invertiert wurden, beobachtet man eine praktisch gleiche Struktur der Widerstandsverläufe und der Süß-/Salzwassergrenze. Es lässt sich somit feststellen, dass durch den Einsatz der ERT-Messungen auch in Bereichen ohne Bohrlochinformationen hochwertige Startmodelle erzeugt und realitätsnahe Endergebnisse erzielt werden können. Der Einsatz des ERT-Messverfahrens erweist sich als besonders hilfreich auf langen Profilen, da bei großen Entfernungen Änderungen der geologischen Strukturen zu erwarten sind und geophysikalisch vermessene Bohrungen nur punktuelle Informationen liefern.

Zusammenfassung

Die dargestellten Untersuchungen wurden durchgeführt mit dem Ziel der Detektion der Süß-/Salzwassergrenze. Die Süß-/Salzwassergrenze bzw. die Salzwasser beeinflusste Zone (per Definition: Zone mit einem elektrischen Widerstand $< 10 \Omega\text{m}$) konnte im Untersuchungsgebiet mit der verwendeten Methodenkombination aus geoelektrischer Tomographie (ERT) und Frequenzbereichselektromagnetik (EM) gut detektiert werden.

Als wesentliches Erkundungsverfahren fungierte die EM-Methode, das ERT-Verfahren wurde im Wesentlichen zur Gewinnung von Startmodellen für die Inversion der elektromagnetischen Daten eingesetzt. Vergleiche mit Widerstandsmodellen, die aus anderen Startmodellen (Bohrlochmessungen) erzeugt wurden, ergeben sehr ähnliche Ergebnisse und können als Beleg für die Eignung der geoelektrischen Messungen zur Erzeugung von Startmodellen gewertet werden.

Die Süß-/Salzwassergrenze bzw. die Salzwasser beeinflusste Zone liegt im nördlichen Bereich der untersuchten Profile bei 92–96 m unter GOK (ca. 48–56 m unter NHN) und steigt nach Süden bis 64–76 m unter GOK (ca. 20–32 m unter NHN) an.

Es kann ferner festgestellt werden, dass sich markante Bereiche des lithologischen Profils ohne Salzwassereinfluss ebenfalls durch das EM-Verfahren gut detektieren lassen.

Starke Störungen der EM-Messungen traten im Bereich von leitfähigen Versorgungsleitungen auf. In diesen Bereichen können die EM-Messdaten nicht verwendet werden.

Summary

The aim of the investigation was the detection of the freshwater/saltwater boundary. The freshwater/saltwater boundary, respectively the zone influenced by saltwater (per definition: zone with an electrical resistivity $< 10 \Omega\text{m}$) could be detected in the investigation area with a combination of geoelectric (ERT) and electromagnetic (EM) methods.

The EM method served as the main method of investigation. The ERT method was used for the production of starting models necessary for the inversion of electromagnetic data. Comparisons with resistivity models received from starting models generated with other methods (borehole logs) show similar results and proof the suitability of ERT measurements for the production of starting models.

The freshwater/saltwater boundary respectively the saltwater influenced zone is located at 92–96 m below surface (ca. 48–56 m below sea level) in the northern part of the investigated profiles and rise up to 64–76 m below surface (ca. 20–32 m below sea level) in the south.

It can be stated further that prominent parts of the lithological profile without any influence of saltwater can also be detected with the EM method.

Strong disturbance of EM measurements appeared close to conductive supply lines. EM data of these areas could not be used.

Literatur

POSTENDORFER, G., RÖSLER, R. & R. SCHMÖLLER (1985): Niederfrequenzmethoden. – In: Millitzer, H. & F. Weber (Hrsg): Angewandte Geophysik. – Band 2, Geoelektrik, Geothermik, Radiometrie, Aerogeophysik, 360 S., Wien, New York (Springer-Verlag), Berlin (Akademie-Verlag)

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. Rainer Herd
M. Sc. Geophys. Wlad Schafrik
Lehrstuhl Rohstoff- und Ressourcenwirtschaft
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Platz der Deutschen Einheit 1
03046 Cottbus
herd@b-tu.de
schafrik@b-tu.de

Buchbesprechung

KELLETAT, D. (2013):

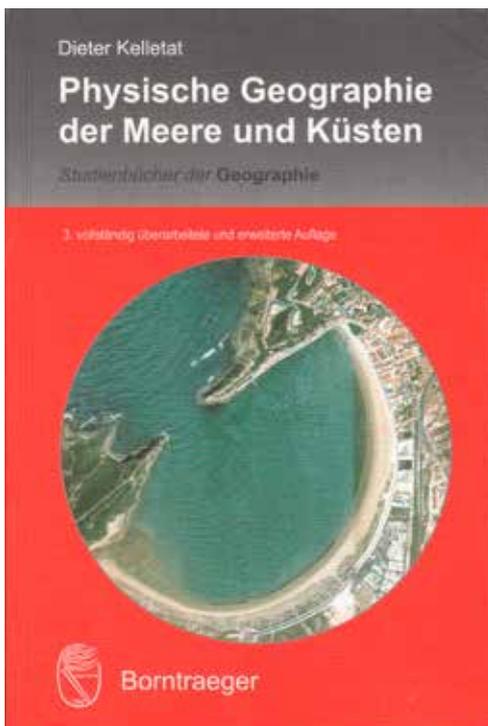
Physische Geographie der Meere und Küsten – Studienbücher der Geographie

3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 290 S., 234 Abb., 22 Tab.

Berlin Stuttgart – Borntraeger

ISBN 978-3-443-07150-9

Preis: 29,80 €



Im Borntraeger Verlag ist schon vor einiger Zeit eine neue Auflage der „Physischen Geographie der Meere und Küsten“ erschienen. Der Autor bemühte sich insbesondere, aktuelle Entwicklungen und Erkenntnisse in das Buch einzuarbeiten und auch die Themen neu zu gewichten. Allerdings enthält das Buch nach Meinung des Verfassers dieser Besprechung einige Unwuchten.

Es beginnt bereits mit dem Titel. Da auch der Autor im Vorwort darauf hinweist, dass sich ganz bewusst auf die Küsten konzentriert wurde und die offenen Meere nur am Rande gestreift werden, wirkt der Titel des Buches, der Meere und Küsten einschließt, eher überambitioniert. Wer wirklich an den Meeren, insbesondere an den küstenfernen Gebieten interessiert ist, wird in diesem Buch keine ausreichenden Informationen vorfinden. So ist das Kapitel 2, welches sich mit dem Meeresräumen befasst, auch nur als überblicksmäßige Einführung in den Naturraum offenes Meer zu verstehen. Insbesondere die hydrologischen Parameter der Weltmeere werden hier nur recht kurz behandelt. Etwas mehr

Platz hingegen wurde der Gliederung und Topographie des Meeresbodens eingeräumt.

Anders hingegen in den Kapiteln 3 und 4, in denen es um die Küsten und ihre Veränderlichkeit geht. Hier sind sowohl die Prozesse, die zur Gestaltung der Küsten beitragen, als auch die daraus resultierenden Küstenformen recht ausführlich dargestellt. Sowohl die aufbauenden als auch die Abtragungsküsten werden im Kapitel 3 gut und klar gegliedert behandelt. Das Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Paläoküsten. Diese und auch die nachfolgenden Kapitel, die sich mit dem Thema Mensch und Küste auseinandersetzen, werden dem Anspruch des Buches gerecht.

Es muss allerdings noch auf ein bedeutendes Manko des Buches hingewiesen werden: seine Illustration. Da der Verfasser dieser Besprechung als Hochschullehrer tätig und an guten Abbildungen für Lehrveranstaltungen stets interessiert ist, stört die mangelnde Abbildungsqualität in diesem Buch ganz erheblich den Gesamteindruck. Ausgeklammert von dieser Kritik werden ausdrücklich die vom Autor bzw. von Fachkollegen desselben stammenden Fotos von Küstenabschnitten. Diese sind qualitativ ansprechend und man kann klar erkennen, worauf es dem Autor ankommt.

Aber vor allem auf den Zeichnungen tauchen sehr häufig Moiré-Effekte auf. Sie wirken damit wie schnell und oberflächlich aus den älteren Auflagen eingescannt und wieder eingefügt. Eine Neuzeichnung, eventuell mit einer zeitgemäßen Farbgestaltung hätte die Qualität der Abbildungen deutlich verbessert. Weiterhin gibt es sehr viele aus Google Earth übernommene Screenshots. Diese mögen am Bildschirm beeindruckend wirken; im Kleinformat und als Ausdruck hingegen kann man oft nicht erkennen, auf welche Formen oder Prozesse es dem Autor wirklich ankommt. Bearbeitete Fotos mit erläuternden Pfeilen und Beschriftungen oder Zeichnungen sind hier meist sachdienlicher als die nur knapp beschrifteten Screenshots.

Fazit: Das Buch zeigt viel Licht - vor allem im Kapitel zu den Küsten – aber auch einiges an Schatten – vor allem bei der Abbildungsqualität.

Olaf Juschus

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 39–51	8 Abb., 11 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	-----------------

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen zum Salzwassermonitoring in Brandenburg – raumzeitliche Charakterisierung der Süß-/Salzwassergrenze

Well-logging analysis for the monitoring of salt water in Brandenburg – spatiotemporal characterisation of the salt water level

MARTIN LEHMER & UWE KABOTH

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Land Brandenburg befinden sich im tieferen Untergrund jungpaläozoische und mesozoische Gesteinseinheiten, die hochmineralisierte Wässer (bis max. 200 g/l) führen (KABOTH et al. 2008). Diese werden durch tertiäre Sedimentschichten wie den unteroligozänen Rupelton und/oder Tonmergelsteine überlagert, sodass durch diese Grundwassergeringleiter eine Trennung des liegenden Salzwasser- vom hangenden Süßwasserstockwerk erfolgt. Jedoch ist der Rupelton in bestimmten Gebieten teilweise bzw. vollständig erodiert, sodass lokal versalzene Tiefenwässer in Süßwasserhorizonte aufsteigen können. Diese geogenen Grundwasserversalzungen, die möglicherweise durch den globalen Klimawandel begünstigt werden, können in Wassergewinnungsanlagen zu Problemen führen, im Extremfall bedeuten sie das Aus von Brunnen oder einer gesamten Brunnengalerie (BAUMANN et al. 2004). Daher ist es erforderlich, rechtzeitig ein vorausschauendes Salzwassermonitoring einzurichten. Zudem können diese natürlichen Prozesse durch anthropogene Beeinflussung noch verstärkt werden.

Wenn sich die hydrostatischen Druckverhältnisse im Untergrund nicht verändern und/oder durch die Grundwasserneubildung sich eine Verdünnung der Porenwassermineralisation zeigen würde, ergeben sich keine besonderen Probleme bei der Grundwassernutzung. Erst durch eine zusätzliche hydraulische Entlastung und/oder abnehmende Grundwasserneubildungsraten findet üblicherweise ein zunehmender Aufstieg von Salzwässern statt (RECHLIN 2008). Jedoch ist der Aufstieg auch über „natürliche“ Aufstiegswege möglich, wie z. B. geologische Störungszonen (u. a. Guben-Fürstener Störungszone), eiszeitliche Rinnen oder über tiefere Bohrungen (vor allem aus der Erdöl-/Erdgaserkundung).

Bohrlochgeophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen stellen eine Monitoringmethode dar, die es ermöglicht, in allen durch das jeweilige Bauwerk aufgeschlossenen Grundwasserleitern die Porenwassermineralisation und die Lage der Süß-/Salzwassergrenze zu bestimmen. Beobachtungen der Mineralisationsveränderungen über die Zeit geben Aufschluss, ob die

Gefährdung für das Grundwasser zunimmt. Dabei können durch Wiederholungsmessungen sowohl horizontale als auch vertikale Verschiebungen der Grundwassermineralisation in der jeweiligen definierten Teufe beobachtet werden. Durch das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) wurden gezielt Grundwassermessstellen ausgewählt, die repräsentative Standorte darstellen. Mit der Untersuchung der Grundwassermessstellen wurde die Firma Bohrlochmessung – Storkow GmbH beauftragt. In die Auswahl der Messstellen gingen folgende Parameter ein:

- durch eine/mehrere Wasserprobenahme(n) festgestellte erhöhte Mineralisation,
- nichtleitender Messstellenrohrstrang (Kunststoff: PVC, HDPE etc.),
- relativ tiefe Grundwassermessstelle, um möglichst mehrere Grundwasserleiter zu charakterisieren,
- ohne oder geringe Anteile an magnetisch wirksamen Tonmaterial (wie z. B. Mikolot 300M, Quillon HD, Wetronit 51/10) im Ringraum der Grundwassermessstelle.

2 Untersuchungsgebiet

In den bisherigen drei Untersuchungskampagnen, die in den Jahren 2012, 2013 und 2015 im Auftrag des LBGR durchgeführt wurden, erfolgte ein Salzwassermonitoring in insgesamt 18 Grundwassermessstellen in Brandenburg und im Berliner Randbereich (siehe Abb. 1). Fünf Grundwassermessstellen wurden während der Untersuchungskampagnen ersetzt. Von den 18 Messstellen befinden sich drei im Randbereich von Berlin (zwei im Ortsteil Schmöckwitz, eine im Ortsteil Wannsee), die im Rahmen dieser Publikation nicht weiter betrachtet werden.

3 Messverfahren und Methodik der Mineralisationsbestimmung

Zur Berechnung der Porenwassermineralisation wurde als Messverfahren das Induktions-Log (IL) angewandt. Mit diesem Messverfahren wird der spezifische elektrische Ge-

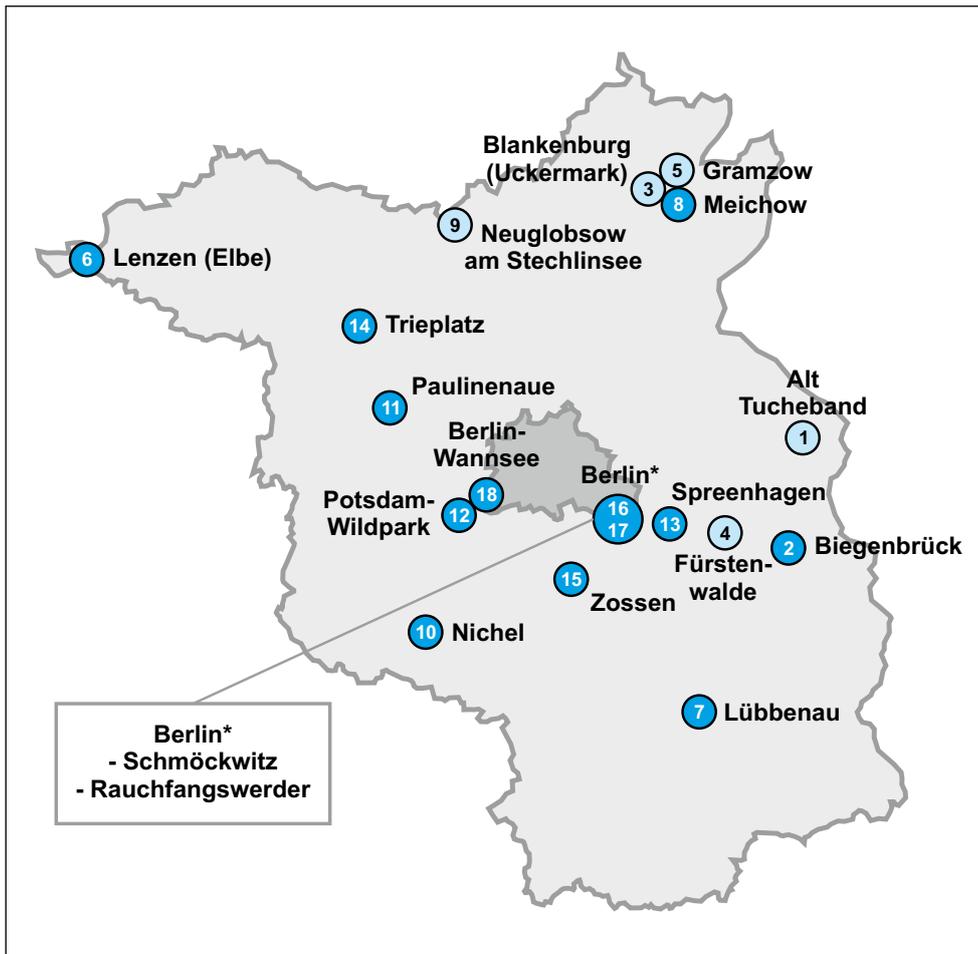


Abb. 1:
Lage der untersuchten Grundwassermessstellen in Brandenburg und am Stadtrand von Berlin (dunkelblau – im Rahmen des derzeitigen Salzwassermonitorings untersuchte Grundwassermessstellen, hellblau – ehemals verwendete Grundwassermessstellen)

Fig. 1:
Location of the groundwater observation points at Brandenburg and at the suburb of Berlin (dark blue – analysed groundwater observation points within the scope of the current monitoring of salt water; light blue – former used groundwater observation points)

birgswiderstand registriert. Zudem erfolgte die Messung der elektrischen Leitfähigkeit (SAL – auch als „Salinitäts-Log“ bezeichnet) und der Temperatur (TEMP) der Bohrlochspülung in der offenen Bohrung bzw. der des Wassers in der Grundwassermessstelle, die als Korrekturgrößen bei der Berechnung der Grundwassermineralisation dienen.

Das induktive Widerstands-Log reagiert, wie in der Abbildung 2 dargestellt, sowohl auf die vorhandene lithologische Zusammensetzung als auch auf den Mineralisationsgrad der Porenfüllung. Bei geringer Porenwassermineralisation lassen sich die durch die Bohrung aufgeschlossenen Lockersedimente mittels IL und weiteren Messverfahren, vor allem Gamma-Ray-Log (GR) und Gamma-Gamma-Dichte-Log (GG.D) eindeutig gliedern. Dabei weisen rollige (sandig-kiesige) Gebirgsabschnitte hohe Widerstände auf, bindige (schluffig-tonige) und organische Lockergesteine weisen dagegen geringe Widerstände auf. Bei zunehmender bzw. hoher Porenwassermineralisation sinkt der registrierte Widerstand deutlich ab, sodass lediglich geringe Widerstandsveränderungen bei einem lithologischen Wechsel auftreten.

3.1 Methodik der Mineralisationsbestimmung

Die Methodik der Bestimmung der Grundwassermineralisation beruht auf der Tatsache, dass der elektrische Widerstand eines vollgesättigten, tonfreien Sandes oder Sandsteins nur

von dessen Porosität und dem Gesamtgehalt an gelösten Salzen im Porenwasser abhängt. Die Vorgehensweise bei der Umrechnung der registrierten induktiven Widerstandsmessung in Porenwassermineralisationen ist in HOTZAN & VOSS (2013) ausführlich erläutert, sodass auf eine methodische Betrachtung an dieser Stelle verzichtet wird.

Für die Berechnung der Porosität ist mindestens eine Gamma-Gamma-Dichte-Messung (GG.D) notwendig, die in der Messstellenbohrung erfolgen muss. Alternativ kann die Porosität auch nach Neutron-Neutron-Log (NN) berechnet werden. Wenn keine GG.D- oder NN-Messung verfügbar ist, dann kann für quartäre und tertiäre Grundwasserleiter häufig mit befriedigender Genauigkeit auf Erfahrungs- bzw. Mittelwerte der Porosität zurückgegriffen werden (FRICKE & SCHÖN 1999).

Der aus der Porosität abgeleitete Formationsfaktor ist nach ARCHIE (1942) die Basis in der Berechnung der Porenwassermineralisation. Die verwendeten Formationsfaktoren sind neben der lithologischen Ausbildung (z. B. Gesteinsgefüge, Verfestigungsgrad) auch abhängig von der stratigraphischen Einordnung des Gesteins. So rangieren die verwendeten Formationsfaktoren zwischen 2,8 und max. 5,0.

Da nicht unerhebliche Abweichungen von den realen Formationsfaktoren bei Verwendung der empirischen Werte bei Grundwassermessstellen auftreten können, wird empfohlen

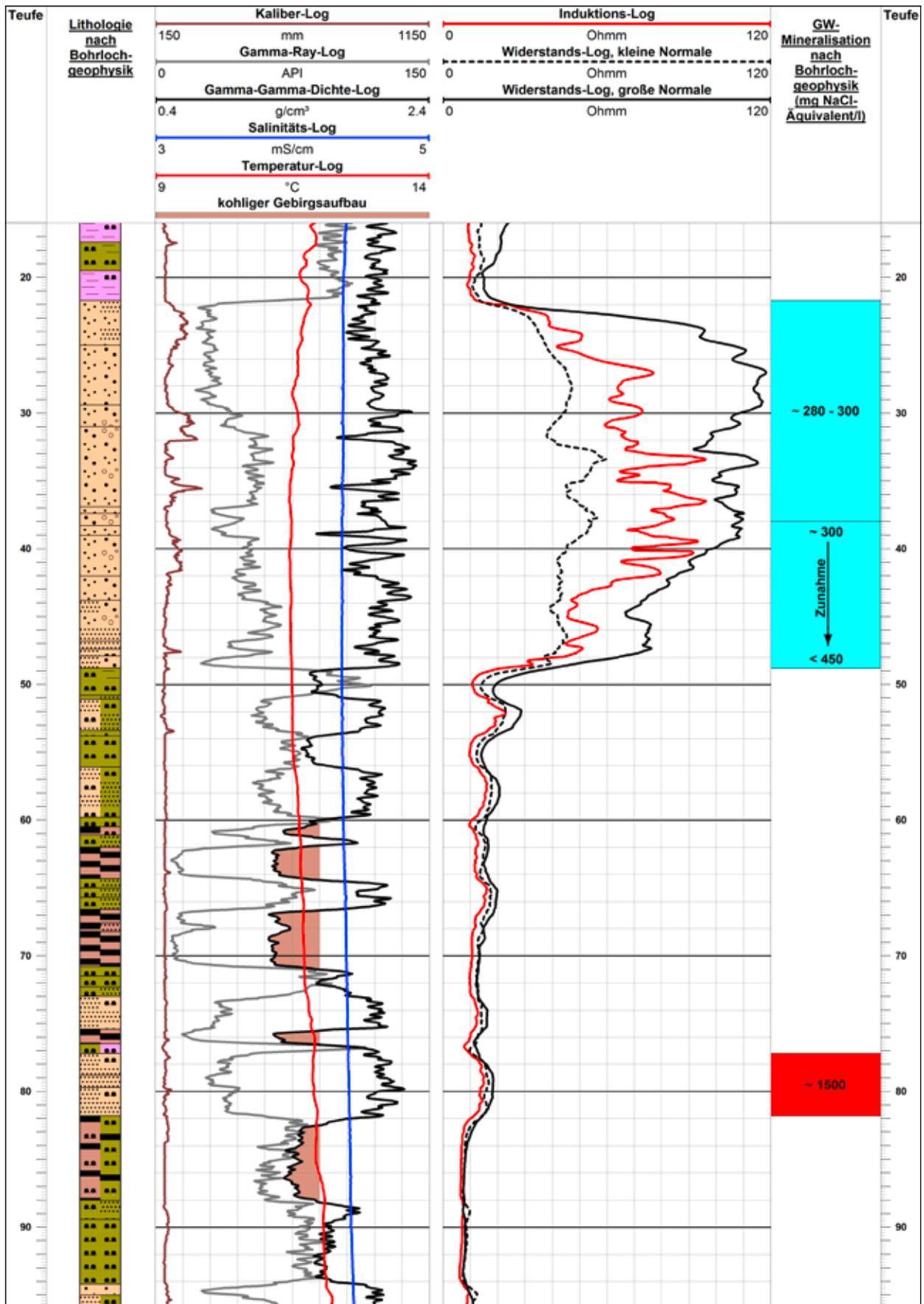


Abb. 2: Aufschlussmessung mit „Hydro-Standardprogramm“ im offenen Bohrloch
 Fig. 2: Standard open hole well-logging

nach geophysikalischen Untersuchungsergebnissen in den Aufschluss- oder Messstellenbohrungen zu recherchieren. Abweichungen ergeben sich, wenn der verwendete Formationsfaktor nicht die im Gebirge befindliche Korngröße und/oder den Schluff-/Ton Gehalt bzw. organische Beimengungen nur unzureichend abbildet.

Die nach der Division durch den Formationsfaktor bestimmten, wahren Gebirgswiderstände können in Porenwassermineralisationswerte überführt werden, wobei eine Temperaturabhängigkeit besteht. Die Gleichung wurde bereits durch ARCHIE (1942) anhand petrophysikalischer Sättigungsversuche an Sandsteinen aufgestellt und ist seitdem vielfach experimentell als hinreichend genaue Näherung bestätigt worden. Für die Überführung vom wahren Widerstand R_w (Ωm) in ein NaCl-Äquivalentgehalt (mg/l) kann zum Beispiel mit hoher Genauigkeit die Beziehung nach ROSSUM (1975) genutzt werden.

Eine genaue Bestimmung der Porenwassermineralisation ist nur für ausreichend mächtige Aquifere sicher möglich. Bei Aquifermächtigkeiten unterhalb eines bestimmten Wertes, der von der vertikalen Auflösung der eingesetzten Widerstandsverfahren abhängt, sind die gemessenen Widerstände durch den Einfluss der bindigen Schichten im Liegenden und Hangenden meist kleiner als die Werte, die bei ausreichender Aquifermächtigkeit erzielt worden wären (abhängig vom Kontrast des Mineralisationsgrades und des spezifischen elektrischen Widerstandes der angrenzenden Gesteine). Für das ausgewertete Messverfahren IL sollte die Mindestaquifermächtigkeit ca. 2 m betragen. In geringmächtigeren Aquiferen wurde nur dann die Grundwassermineralisation bestimmt, wenn diese nur verhältnismäßig gering durch die umgebenden bindigen Horizonte beeinflusst ist. In diesem Fall stellt der ermittelte Mineralisationswert eine konservative Obergrenze der tatsächlichen Porenwassermineralisation dar.

Die ausgegebene Porenwassermineralisation kann in Absprache mit dem Auftraggeber sowohl in NaCl-Äquivalenten, z. B. in (mg/l), oder als elektrische Leitfähigkeit, z. B. in (mS/cm), ausgegeben werden. In der Bohrlochgeophysik sind NaCl-Äquivalentgehalte ein gängiges Maß zur Charakterisierung der Mineralisation von Porenwässern, da in tieferen salinaren Aquiferen diese Ionen häufig den Hauptteil des Lösungsinhalts darstellen. Beim Vorhandensein anderer Ionen kann durch ihre abweichende Ionenbeweglichkeit der ermittelte NaCl-Äquivalentgehalt niedriger oder höher als der tatsächliche Gesamtsalzgehalt („Abdampfdruckstand“) sein.

Erhöhte Schluff- bzw. Tongehalte sowie organische Bestandteile verfälschen die Mineralisationsbestimmung dahingehend, dass die tatsächliche Porenwassermineralisation unter den ermittelten Werten liegt. Tonminerale und organische Beimengungen setzen unabhängig von der Grundwassermineralisation den elektrischen Widerstand des Gesteins herab. Der Fehler ist bei sehr gering mineralisierten Wässern am höchsten und bei hoher Porenwassermineralisation entsprechend kleiner.

Im letzten Bearbeitungsschritt bis hin zur Ermittlung der NaCl-Äquivalentgehalte muss noch der Temperatureinfluss auf die Ionenbeweglichkeit und damit auf den elektrischen Widerstand des Wassers berücksichtigt werden (z. B. nach WAGNER 1980 oder FRICKE & SCHÖN 1999). Die Temperatur in den Grundwasserleitern wird mit Hilfe des Temperatur-Logs bestimmt. Weitestgehend ungestörte Temperaturprofile können in Grundwassermessstellen mit hinreichender Standzeit aufgenommen werden. In der Regel finden in Aufschlussbohrungen jedoch die bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen direkt nach Abschluss der Bohrarbeiten statt, sodass die registrierte Temperatur im Bohrloch überwiegend durch die Spülungszirkulation überprägt ist und somit nur gestörte Temperaturprofile ermittelt werden können. In diesen Fällen sollte die Temperatur auf einen mittleren geothermischen Gradienten zurückgeführt werden (z. B. 10 °C im Bereich der Geländeoberkante und +3 °C/100 m).

Die Porenwassermineralisation wird in den grafischen Darstellungen jeweils farbcodiert. So sind geringe Grundwassermineralisationen bis 500 mg/l NaCl-Äquivalent blau dargestellt. Erhöhte Porenwassermineralisationen im Bereich von > 500 mg/l bis 1 000 mg/l NaCl-Äquivalent werden gelb unterlegt. Hohe Porenwassermineralisationen > 1 000 mg/l NaCl-Äquivalent sind dagegen rot gekennzeichnet.

Die Süß-/Salzwassergrenze wird üblicherweise dem Wert 1 000 mg/l NaCl-Äquivalent zugeordnet. Da jedoch nur eine Gesamtionenkonzentration berechnet werden kann und in Einzelfällen auch andere Ionen als Na^+ und Cl^- sich in Lösung befinden (wie z. B. Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} oder HCO_3^-), ist auch eine standortspezifische Festlegung der Süß-/Salzwassergrenze möglich. Bei der Beurteilung der Teufenlage dieser Grenze fließen die berechneten Porenwassermineralisationen als quantitative Größen sowie die horizontale und vertikale Veränderung der Mineralisation als dynamische Veränderung der zeitlichen Vergleichsmessungen (z. B. Aufschlussbohrung gegenüber zeitlich versetzter Messstellenkontrolle) mit ein, sodass die Grenzziehung bei signifikanten Mineralisationssprüngen möglich ist.

Nicht nur im Untergrund von Brandenburg dominieren im Salzwasserstockwerk NaCl-Schichtwässer (RECHLIN 2008), sodass hier eine Angabe in NaCl-Äquivalenten sinnvoll ist. Die weiteren $MgCl_2$ - und $CaCl_2$ -Schichtwässer treten erst im Zechstein (überwiegend unterhalb 2 000 m) bzw. im Rotliegend (überwiegend unterhalb 3 000 m) auf.

Süß-/Salzwassergrenzen könnten rein theoretisch auch mehrfach in einer Grundwassermessstelle angetroffen werden. Dies wäre zum Beispiel der Fall, wenn bei mehreren aufgeschlossenen Grundwasserleitern die Mineralisation in jedem einzelnen Grundwasserleiter vom Hangenden (gering mineralisiert) zum Liegenden (stark mineralisiert) zunimmt. Dieser Sonderfall ist bei einigen Grundwassermessstellen in Berlin nachweisbar, die außerhalb des Brandenburger Salzwassermonitorings untersucht wurden.

Die aus dem IL berechnete Porenwassermineralisation wurde anschließend im Bereich des Filters mit der Mineralisation des Messstellenwassers (bestimmt mittels elektrischem Leitfähigkeits-Log) verglichen, wobei sich jeweils eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse zeigte. Diese Gegenüberstellung ist jeweils nur im Filterbereich möglich, da nur hier das Wasser im Inneren der Grundwassermessstelle dem Porenwasser im anstehenden Gebirge entspricht.

Ebenso notwendig ist im Rahmen der Messkampagne die Grundwassermessstelle in Hinblick auf deren Aufbau, Zustand und Funktion zu untersuchen, um z. B. hydraulische Umläufigkeiten über den Ringraum der Grundwassermessstelle oder sogar über Rohrleckagen auszuschließen. Durch einen fehlerhaften Messstellenausbau wäre unter ungünstigen hydrostatischen Druckpotentialen ein Aufstieg und damit verbunden eine Anreicherung des Salzwassers in anderen (höher liegenden) Grundwasserleitern möglich.

3.2 Induktions-Log

Die eingesetzten fokussierten IL-Sonden sind für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit von Gesteinen und deren Porenwassermineralisation konzipiert worden (siehe Abb. 3 und 4). Die induktiven Widerstandsmessungen sind geeignet für sandige bis tonige Einheiten, wobei eine Porenwassermineralisationsberechnung ausschließlich in mineralisierten, sandführenden und schlufffreien Schichten möglich ist.

lich ist. Folgender Leitfähigkeits- bzw. Widerstandsbereich wird theoretisch erfasst: 0,01 mS/cm (1 000 Ω m) – 3 S/m (0,33 Ω m). Die Messgenauigkeit ist abhängig vom registrierten Leitfähigkeitsbereich, wobei im Bereich niedriger Leitfähigkeiten (und damit verbunden im hochohmigen Bereich) die Messgenauigkeit abnimmt.

Aufgrund der starren Baulänge von 1,8 m und des Außendurchmessers von 42 mm der IL-Sonden sollten die Grund-



Abb. 3: Messfahrzeug mit in eine Grundwassermessstelle einfahrendem Induktions-Log

Fig. 3: Logging vehicle with induction log running in a groundwater observation point

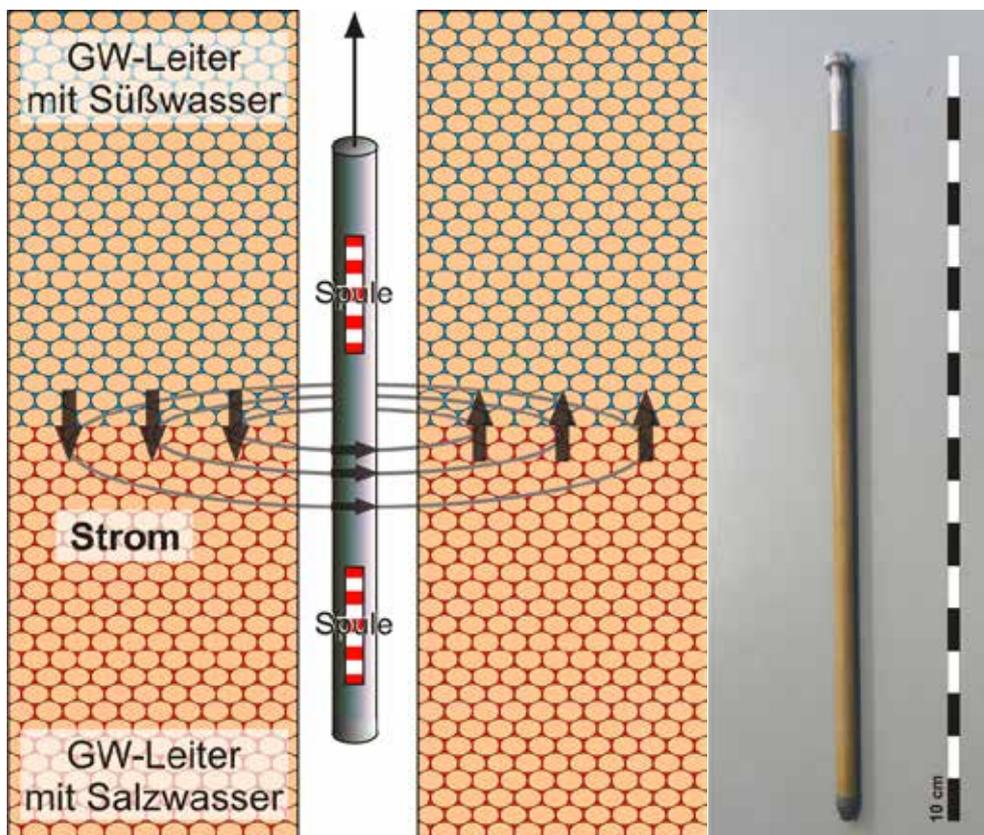


Abb. 4: Messprinzip der induktiven Widerstandsmessung und Foto einer IL-Sonde; GW = Grundwasser

Fig. 4: Logging principle of the inductive resistivity log and photo of induction log tool

wassermessstellen einen freien Innendurchmesser von mindestens 65 mm aufweisen. Aus Erfahrung zeigt sich jedoch, dass neu zu errichtende Grundwassermessstellen in DN 110 ausgebaut werden sollten, um Befahrungsschwierigkeiten entgegenzuwirken. Dies war insbesondere für die Probenahme relevant, da die Produktion der weit verbreiteten Unterwasserpumpe MP1 vorübergehend eingestellt wurde und somit auf größere Pumpen zurückgegriffen werden musste.

Im Gegensatz zum Elektro-Log, welches lediglich im offenen (unverrohrten) Bohrloch eingesetzt werden kann, ist der Einsatz dieses Messverfahrens auch in nichtleitenden verrohrten Grundwassermessstellen und Brunnen möglich. Darüber hinaus liefert es Ergebnisse sowohl im wassererfüllten Bereich als auch oberhalb des wassererfüllten Bauwerks.

Die Messsonden weisen eine vertikale Auflösung von 0,3 m auf. Der registrierte spezifische Widerstand ist ein summarischer Messwert, welcher je nach Dimensionierung des Bohrloches in erster Linie von der Gebirgszusammensetzung und anteilig von der Ringraumfüllung der Messstelle beeinflusst wird. Aus diesem Grund ist eine Messstellenkontrolle hinsichtlich der Zusammensetzung des Ringraumes als auch die Kontrolle der lithologischen Verhältnisse im anstehenden Gebirge sinnvoll. Abhängig von dem gemessenen spezifischen Gebirgs-widerstand betragen die Anteile des registrierten Messsignals in einem Radius von maximal 1 m um die IL-Sonde etwa 60–90 %. Der Hauptteil des Messsignals wird demnach in einem Zylinder mit einem Durchmesser von 2 m um die Messsonde generiert (W & R INSTRUMENTS 2000). Die Signalanteile aus weiter entfernten Gebirgsabschnitten sind deutlich geringer. Die Eindringtiefe ist jedoch abhängig von der auftretenden Leitfähigkeit. Je höher leitfähig das Gebirge ist, desto geringer ist auch die Eindringtiefe des Messverfahrens.

Nicht fokussierte Induktion-Log-Sonden sind oft vom Ringraum beeinflusst, sodass diese Messsonden für die Porenwassermineralisationsberechnung nicht geeignet sind. Das Vorhandensein von „normalen“ nichtmagnetischen Tonsperren (wie z. B. Friedländer Blauton, Quellon WP) reicht bei diesen Sonden bereits aus, den vermeintlichen Gebirgs-widerstand zu senken und damit eine zu hohe Porenwassermineralisation vorzutauschen.

4 Fallbeispiele

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden verschiedene zeitliche Veränderungen der Porenwassermineralisation betrachtet. Hierbei werden sowohl eine Erhöhung sowie eine Verringerung der Grundwassermineralisation als auch eine unveränderte Grundwassermineralisation vorgestellt.

4.1 Erhöhung der Porenwassermineralisation

Der obere Grundwasserleiter, der durch die Grundwassermessstelle in Lenzen aufgeschlossen ist, besteht überwiegend aus schluffigen Feinsanden sowie Feinkiesen und reicht bis in eine Teufe von ca. 35 m (siehe Abb. 5). Die im Jahre 2012 durchgeführte IL-Messung wies oberhalb von 18 m eine nahezu konstante, relativ geringe Porenwassermineralisation bis 440 mg/l NaCl-Äquivalent auf. Unterhalb dieser Teufe war ein sukzessiver Anstieg der Grundwassermineralisation zu verzeichnen, sodass in einer Teufe von 34 m eine Mineralisation von < 3,9 g/l NaCl-Äquivalent nachgewiesen wurde. Die Süß-/Salzwassergrenze befand sich 2012 im Bereich von ca. 20 m Teufe.

Durch Wiederholungsmessungen im darauffolgenden Jahr 2013 zeigte sich oberhalb von ca. 21 m eine Verringerung der registrierten Widerstände. In diesem Teufenabschnitt erhöhte sich die Porenwassermineralisation im oberen Grundwasserleiter um durchschnittlich 40 mg/l NaCl-Äquivalent. Diese Erhöhung der Porenwassermineralisation würde ebenso Auswirkungen auf die Lage der Süß-/Salzwassergrenze haben. Rein rechnerisch entspräche diese Erhöhung einem Anstieg der Süß-/Salzwassergrenze von etwa 10 cm, jedoch liegt diese Veränderung im Bereich der Nachweisgrenze des Messverfahrens. Unterhalb von ca. 21 m Teufe sind die beiden IL-Messungen nahezu deckungsgleich, sodass davon ausgegangen werden kann, dass in diesem Teufenabschnitt keine Veränderungen innerhalb des Untersuchungszeitraumes aufgetreten sind. Auch in den weiteren aufgeschlossenen Grundwasserleitern ist eine identische Porenwassermineralisation zu verzeichnen, die nicht in Abbildung 5 dargestellt sind.

4.2 Verringerung der Porenwassermineralisation

Die Grundwassermessstelle in Biegenbrück wurde nach der ersten Untersuchungskampagne im Jahre 2012 zum Salzwassermonitoring in Brandenburg neu errichtet. Durch die Messstelle wurden mehrere Grundwasserleiter durchteuft, wobei in den oberen beiden Grundwasserleitern Veränderungen zwischen den Messkampagnen festgestellt wurden (siehe Abb. 6). Oberhalb von 13,8 m sowie zwischen 21,7 m und 48,8 m Teufe stehen im angrenzenden Gebirge hauptsächlich Mittel- bis Grobsande an.

Oberhalb von 31 m war 2013 eine relativ geringe Porenwassermineralisation zu verzeichnen, wobei diese im Maximum 250 mg/l NaCl-Äquivalent betrug. Unterhalb von 31 m bis in eine Teufe von 48,8 m nahm die Porenwassermineralisation stetig zu. An der Basis des zweiten Grundwasserleiters wurde eine Porenwassermineralisation von max. 450 mg/l NaCl-Äquivalent nachgewiesen.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Widerstandsmessungen weist die IL-Messung von 2015 innerhalb eines Zeitraums von zwei Jahren höhere Widerstände auf. Die bereits im Jahre 2013 nachgewiesene geringe Porenwassermineralisation nahm bis 2015 um bis zu 110 mg/l NaCl-Äquivalent ab, sodass in diesem Teufenbereich in beiden Grundwasserleitern eine Aussüßung des Porenwassers stattfand.

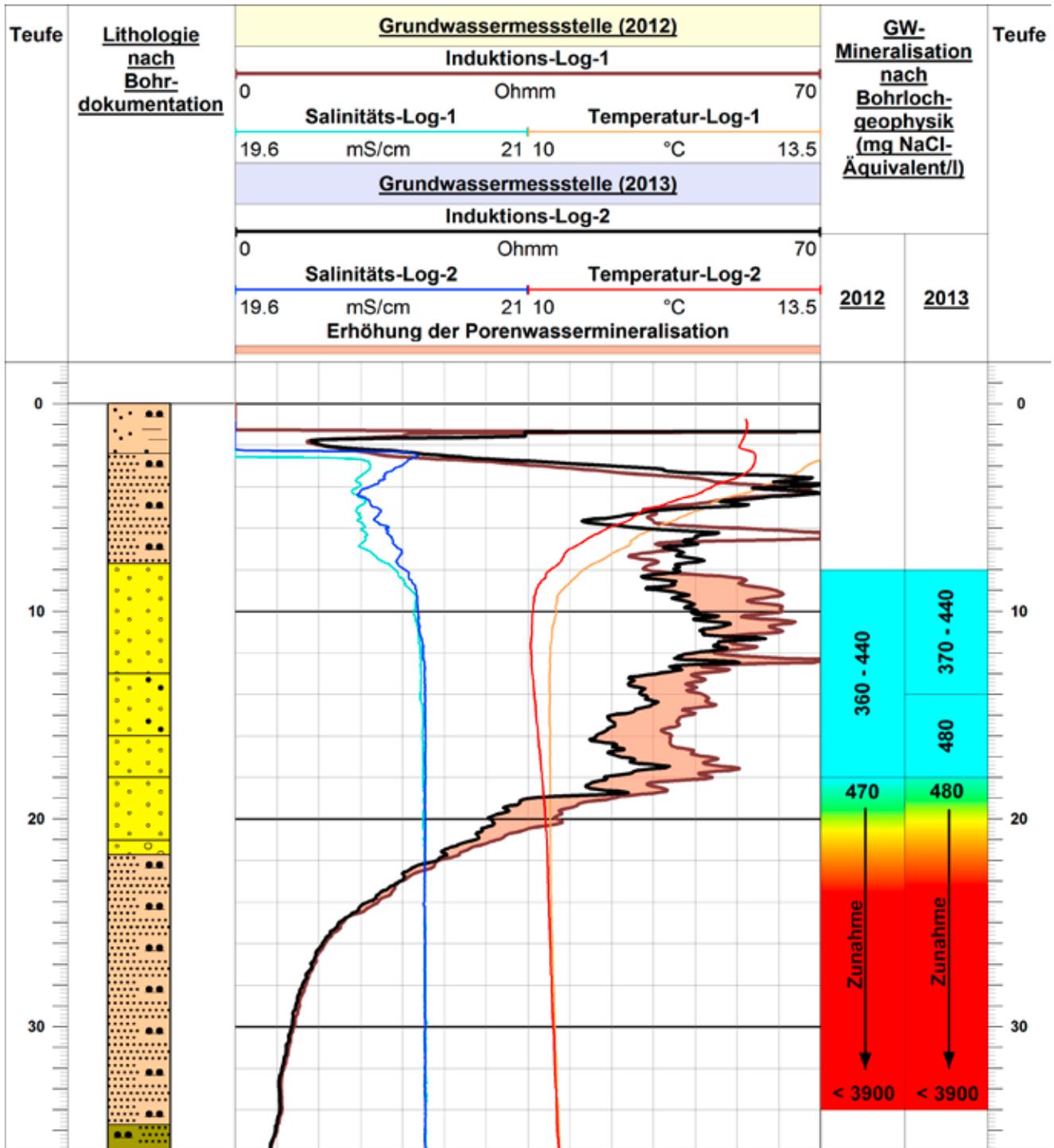


Abb. 5: Erhöhung der Porenwassermineralisation im oberen Grundwasserleiter in der Grundwassermessstelle in Lenzen (Elbe)

Fig. 5: Increase of pore water mineralisation in the upper aquifer in the groundwater observation point at Lenzen (Elbe)

4.3 Unveränderte Porenwassermineralisation

In Abbildung 7 sind die geophysikalischen Untersuchungen dargestellt, die in der Grundwassermessstelle in Spreenhagen durchgeführt wurden. Mehrere sandig-kiesig ausgebildete Grundwasserleiter sind durch diese Messstelle

durchteuft worden. Beim Vergleich der IL-Messungen aus den Jahren 2012 und 2013 zeigt sich, dass in allen Grundwasserstockwerken keine Veränderungen der Porenwassermineralisation über die beiden Jahre aufgetreten sind. Die Abbildung zeigt einen Detailausschnitt unterhalb von 86 m Teufe.

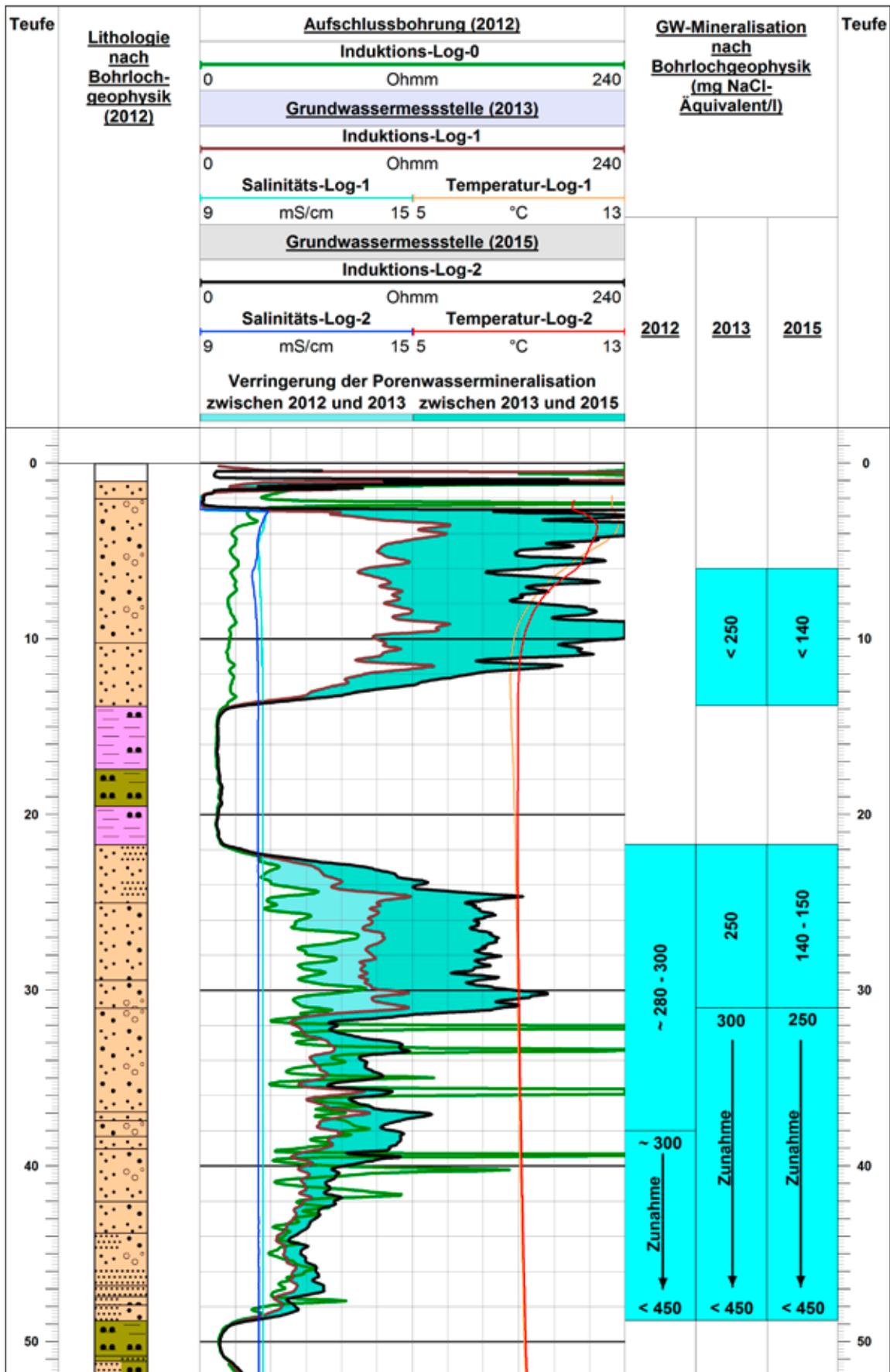


Abb. 6: Verringerung der Grundwassermineralisation in der Grundwassermessstelle in Biegenbrück
 Fig. 6: Decrease of pore water mineralisation in the groundwater observation point at Biegenbrück

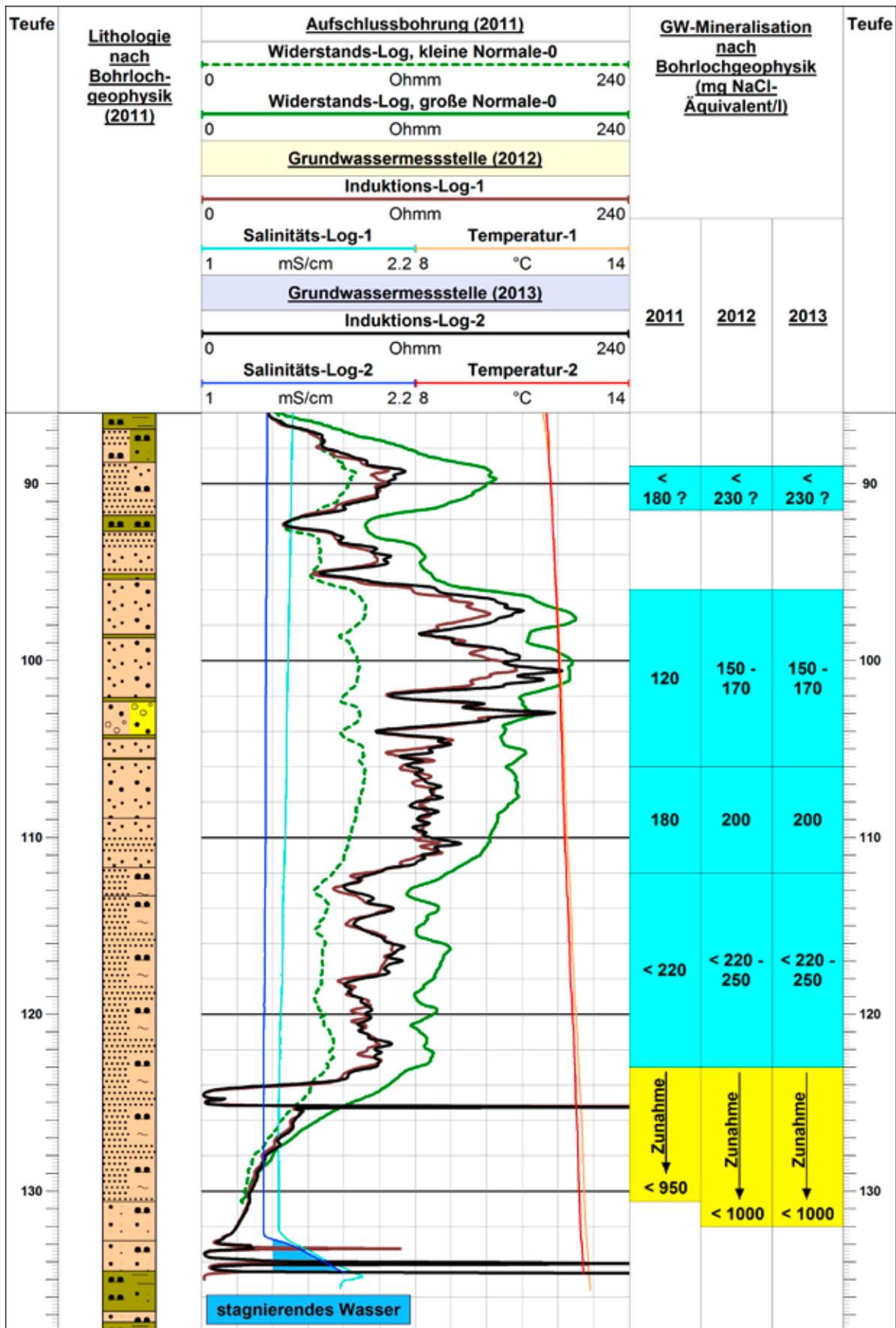


Abb. 7: Unveränderte Porenwassermineralisation in der Grundwassermessstelle in Spreenhagen
 Fig. 7: Unchanged pore water mineralisation at the groundwater observation point at Spreenhagen

Oberhalb von 123 m ist eine geringe Porenwassermineralisation von max. 250 mg/l NaCl-Äquivalent zu verzeichnen. Unterhalb von 123 m bis in eine Teufe von 132 m ist ein deutlicher Mineralisationsanstieg zu beobachten, wobei die Süß-/Salzwassergrenze in diesem Teufenbereich noch nicht erreicht wurde. Eine Berechnung der Grundwassermineralisation zwischen 132 m und 135 m ist aufgrund von vermutlich metallischem Material im Ringraum des Kunststoff-Filterrohres nicht möglich. Hierbei verursachen selbst Metallschrauben an einem Abstandshalter aus Kunststoff oder abgerissene metallische Tiefenlote eine Störung der IL-Messung über ein Teufenintervall von mindestens 1–1,5 m.

4.4 Oberflächennahe Versalzung

Abbildung 8 zeigt eine relativ flache Grundwassermessstelle in Paulinenaue. Diese Messstelle weist einen Filter im Bereich von 18,8–20,8 m auf. Das anstehende Gebirge beinhaltet Sande, z. T. auch Kiese, mit einem relativ großen Kornspektrum von Fein- bis Grobsanden. Die lithologische Ansprache wird jedoch erschwert, da die damalige Aufschlussbohrung höchstwahrscheinlich wegen Havariegefahr nur im verrohrten Zustand (durch das Bohrgestänge) untersucht werden konnte. Aufgrund der Stahlverrohrung mussten für die Formationsfaktoren empirische Werte verwendet werden. Im Allgemeinen können geringe Schwankungen des Widerstandes auch auf die unterschiedliche lithologische Ausbildung des anstehenden Gebirges und damit auf unterschiedliche Formationsfaktoren zurückzuführen sein. Als Ergebnis zeigt sich, dass oberhalb von 14,5 m Teufe Änderungen der Porenwassermineralisation auftreten, die anscheinend an Horizonte unterschiedlicher Durchlässigkeiten gebunden sind. Die Veränderungen sind wahrscheinlich nicht an die im Aufschlusspunkt aufsteigenden Wässer gebunden, sondern durch horizontale Fließbewegungen und durch Grundwasserneubildung verursacht. Der obere (oberhalb von 15,3 m) und untere Grundwasserleiter (unterhalb von 16,6 m) weisen ähnlich hohe Porenwassermineralisationswerte auf, sodass nicht auszuschließen ist, dass die bindige Gebirgseinheit zwischen 15,3 m und 16,6 m nur lokal auftritt und somit beide Grundwasserleiter verbunden sind.

Oberhalb von 8 m Teufe zeigten sich 2012 und 2013 die höchsten Mineralisationswerte, wobei nun eine Differenzierung auftritt. Die im Teufenbereich von 5–8 m erkennbare Abnahme der Mineralisation im Jahre 2013 im Vergleich zur Untersuchungskampagne 2012 ist möglicherweise auf klimatischen Verhältnisse (veränderte Niederschlagsraten) zurückzuführen. Die restlichen Teufenabschnitte wiesen von 2012 bis 2013 keine Veränderungen auf. Im Vergleich zu den Untersuchungen von 2015 zeigen sich zwischen 5–8 m keine weiteren Mineralisationsänderungen; wohl aber oberhalb von 5 m. Hier ist 2015 eine deutliche Verringerung der Porenwassermineralisation von ca. 2 600 mg/l NaCl-Äquivalent auf 700 mg/l NaCl-Äquivalent nachweisbar.

Im oberen unbedeckten Grundwasserleiter zeigten sich im Bereich von 8–14,5 m keine Änderungen der Grundwassermineralisation zwischen 2012 und 2013. Von 2013 bis 2015 sind jedoch deutliche Veränderungen erkennbar. Im Bereich von 8–11 m nahm die Porenwassermineralisation von 1 750–1 850 mg/l NaCl-Äquivalent auf 2 100 mg/l NaCl-Äquivalent zu und im Bereich von 11–14,5 m dagegen leicht um 50–100 mg/l NaCl-Äquivalent ab.

Insgesamt sind durch diese Messstelle bei den bisherigen drei Untersuchungskampagnen seit 2012 unterschiedliche Mineralisationsverhältnisse sowohl zunehmend als auch abnehmend oberhalb von 14,5 m Teufe zu beobachten, sodass vermutet wird, dass in zukünftigen Messkampagnen weitere Veränderungen auftreten werden. Die Süß-/Salzwassergrenze lag 2012 und 2013 im Bereich des Wasserspiegels (ca. 1 m unter Geländeoberkante) und hat sich im Jahre 2015 um ca. 4 m nach unten verlagert.

5 Bewertung der Methodik

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse zeigt sich, dass die verwendete Methodik (bohrlochgeophysikalische Messungen des IL in Verbindung mit einer elektrischen Leitfähigkeits- und Temperaturmessung) prinzipiell gut geeignet ist, um die Porenwassermineralisation zu bestimmen und diese auch in zeitlichen Intervallen zu wiederholen. Voraussetzung für diese Untersuchungen ist das Vorhandensein einer Messstelle bzw. eines Brunnens mit Kunststoffausbau. Ein einfaches Kunststoffrohr (auch ohne Filter) würde hierfür ebenfalls genügen.

Die aus dem IL ermittelten Porenwassermineralisationen bei vorliegender Gamma-Gamma-Dichtemessung aus der Aufschlussbohrung weisen die höchste Genauigkeit auf. Die Genauigkeit sinkt, wenn keine Dichtemessung zu Grunde liegt und empirische Formationsfaktoren verwendet werden müssen. Deshalb sollten vorliegende bohrlochgeophysikalische Ergebnisse aus der jeweiligen Aufschlussbohrung bei der Auswertung herangezogen werden.

Darüber hinaus bewirken schon geringe bindige oder organische Beimengungen im anstehenden Gebirge (wie z. B. Kohle, Schluff oder Ton) eine Verringerung der Widerstände, so dass eine scheinbar höhere Porenwassermineralisation als die tatsächliche berechnet wird. Daher wurden Porenwassermineralisationen bei schwach schluffigen und schluffigen Sandeinheiten mit einem „<“ versehen. Um diese Ungenauigkeiten zu umgehen, sollten – wenn vorhanden – bohrlochgeophysikalische Ergebnisse aus Aufschlussbohrungen zur Bestimmung der Lithologie herangezogen werden.

Vertikale Änderungen der Porenwassermineralisation sind erst ab ca. 50 cm anhand der IL-Messungen erkennbar. Zeitliche Mineralisationsänderungen in einer Schicht, die über ein definiertes Zeitintervall stattfanden, wurden hervorgehoben, wenn diese mindestens 50 mg/l NaCl-Äquivalent ausmachten. Geringere Mineralisationsänderungen als 50 mg/l NaCl-Äquivalent liegen im Bereich der Mess- und Interpretationsgenauigkeit.

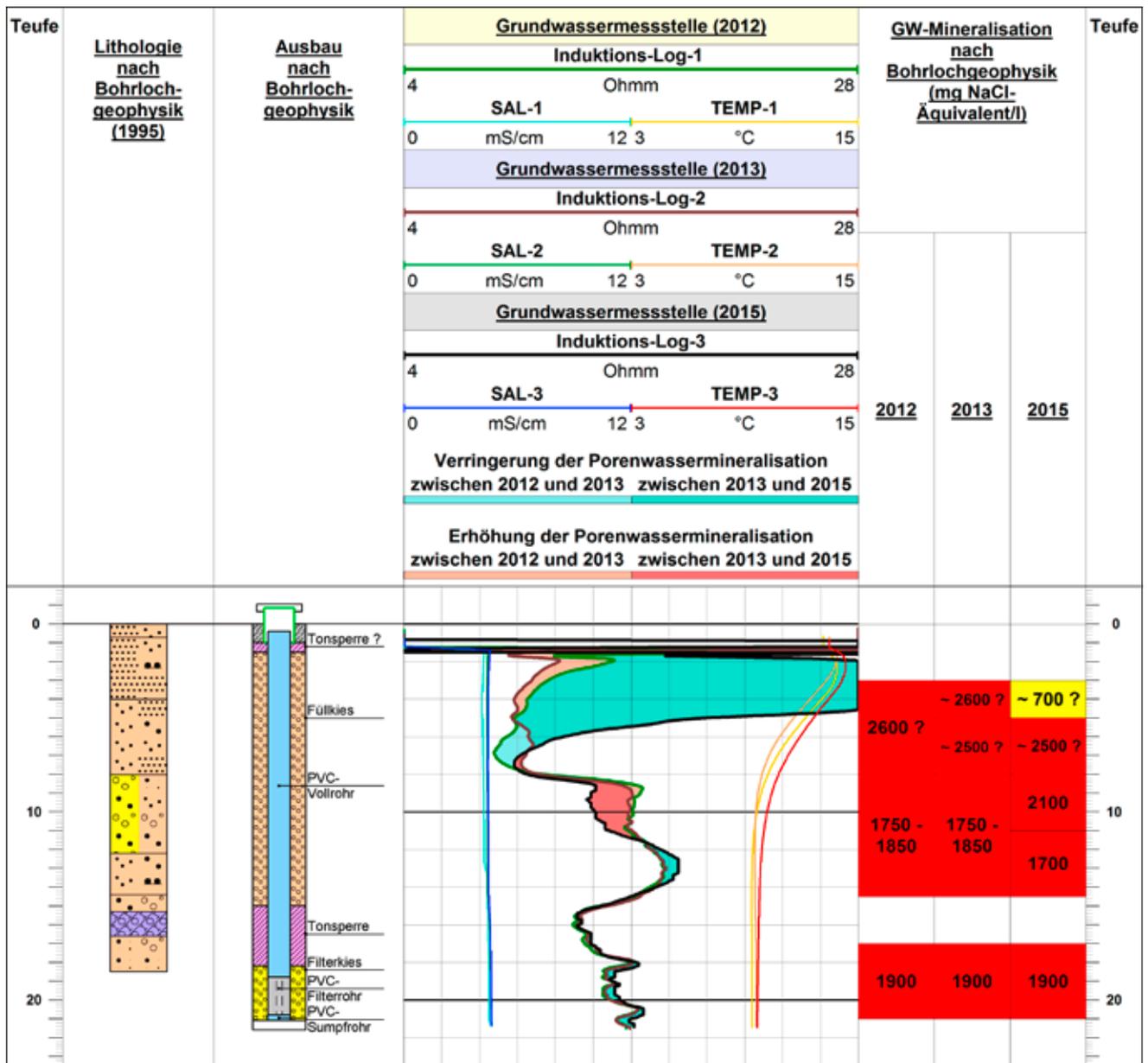


Abb. 8: Veränderung der Porenwassermineralisation im oberflächennahen Bereich in Paulinenaue

Fig. 8: Variation of pore water mineralisation at the near-surface zone at Paulinenaue

Störend auf das IL wirken sich folgende Parameter aus:

- Stahlrohre im Ringraum bzw. stahlverrohrte Messstellenabschnitte,
- magnetisch wirksame Tonsperren (wie Mikolit 300M oder QuellonHD),
- metallische Zentralisatoren, metallische Kabelbinder, metallische Schraubverbindungen an Kunststoff-Bauteilen,
- weitere metallische Beimengungen im Ringraum (wie z. B. Bohrspäne etc.).

Beim Bau zukünftiger Grundwassermessstellen mit dem Ziel der Porenwassermineralisationsbeobachtung sollten die oben genannten negativen Einflussfaktoren vermieden

werden. Zudem wirken auch Wasserprobenahmen, die im Vorfeld der geophysikalischen Untersuchungen stattfanden, störend auf die elektrische Leitfähigkeits- und Temperaturmessung. Daher sollten diese Maßnahmen erst im Anschluss an die Bohrlochgeophysik erfolgen.

Grundsätzlich sollte in jeder Grundwassermessstelle, die zur Salzwasserbeobachtung genutzt wird, die bohrlochgeophysikalische Überprüfung des Aufbaus, des Zustandes und der Funktionsweise der Messstelle erfolgen, um durch Störeinflüsse eine Fehlinterpretation der Messergebnisse zu verhindern. Im Folgenden sind die häufigsten Mängel an Grundwassermessstellen und Brunnen kurz zusammengefasst (aus BAUMANN 2008):

- nicht vorhandene, falsch positionierte, unvollständige oder mit Nachfall vermischte Ringraumabdichtungen,
- undichte Rohrverbindungen verursachen einen Kurzschluss mehrerer Grundwasserleiter und die in der Grundwassermessstelle gewonnenen Wasserproben stellen Mischproben dar,
- falsche lithologische Schichtenverzeichnisse und daraus resultierender falscher Ausbau,
- Überschüttung von Filterstrecken mit Ton und damit „Verstopfung“ der Filteröffnungen.

Die Ergebnisse in den einzelnen Grundwassermessstellen bezüglich der Porenwassermineralisation und der Lage der Süß-/Salzwassergrenze(n) spiegeln selbstverständlich in erster Linie lokale Grundwasserverhältnisse wieder. Deshalb sollten die Daten mit einem geochemischen Modell, wie z. B. dem am LBGR entwickelten hydrogeochemisch-genetischen Modell (RECHLIN 1997, 2008), abgeglichen werden, um der Frage nach der Ursache der Porenwassermineralisationsunterschiede auf den Grund zu gehen. Zudem könnten sich vermutlich mögliche auftretende klimatische Veränderungen mit einer zeitlichen Verzögerung in den bohrlochgeophysikalischen Messungen widerspiegeln.

Langjährige Messungen in ähnlichen Gebieten zeigten, dass die in der Messstelle oberhalb der Filterstrecke registrierten elektrischen Leitfähigkeiten von denen im Gebirge meist erheblich abweichen, sodass diese nur selten repräsentative Ergebnisse über den Anstieg des Salzwassers im Gebirge liefern. Eine Bestimmung der Süß-/Salzwassergrenze mit Hilfe von Wasserproben liefert ebenfalls wenig Nutzen. Dazu müsste die zu untersuchende Grundwassermessstelle über eine sehr kurze Filterstrecke verfügen und die Probenahme müsste exakt zu dem Zeitpunkt realisiert werden, an dem sich die Süß-/Salzwassergrenze genau im Bereich des Filters befände (siehe u. a. BAUMANN 2008).

Des Weiteren sollte in allen Grundwassermessstellen eine bohrlochgeophysikalische Überprüfung des Aufbaus, des Zustandes und der Funktion der Messstellen erfolgen, um Fehlinterpretationen ausschließen zu können.

Bei den zukünftigen Untersuchungen ist weiterhin zu empfehlen, dass die zeitgleich erfolgten Wasserprobenahmen durch den Auftraggeber im Anschluss an die Messkampagne durchgeführt werden, um potentielle Anomalien in der elektrischen Leitfähigkeits- und Temperaturmessung zu vermeiden. Dies ist bereits bei der derzeitigen Untersuchungskampagne berücksichtigt worden.

Zusammenfassung

Eine Berechnung der Porenwassermineralisation an ausgewählten Grundwassermessstellen erfolgte in drei Untersuchungskampagnen für alle anstehenden wasserführenden Grundwasserleiter mittels IL als zeitliche Wiederholungsmessungen sowie der Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur des Wassers. Mehrere der unter-

suchten Grundwassermessstellen in Brandenburg und Berlin wiesen eine hohe Porenwassermineralisation in einem bzw. mehreren durchteuften Grundwasserleitern auf. Mit Hilfe der aufgeführten Fallbeispiele wurden die Veränderungen der Mineralisationsverhältnisse über ein zeitlich definiertes Intervall beleuchtet, wobei sowohl Erhöhungen als auch Verringerungen der Porenwassermineralisation zu verzeichnen waren. Zum Teil war auch eine Konstanz der registrierten Grundwassermineralisationen über Jahre festzustellen. Im Allgemeinen zeigt sich, dass die Veränderungen der Süß-/Salzwassergrenze regional sehr unterschiedlich ausfielen.

Der zeitliche Abstand zwischen den Untersuchungskampagnen hängt im Allgemeinen von den bereits vorliegenden Daten bzw. eines möglichen Bedrohungsszenarios (z. B. sich abzeichnender Anstieg der Süß-/Salzwassergrenze) ab. Dabei sollte beachtet werden, in welcher Jahreszeit die bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen in Hinblick auf z. B. Niederschlagsmenge und Grundwasserneubildung (annähernd gleiche Wasserspiegel) stattfinden. Die ermittelten Porenwassermineralisationen (angegeben in mg/l NaCl-Äquivalent) sollten mit den Auswertungen der zusätzlich gewonnenen Wasserproben hinsichtlich ihrer Ionenverteilung gegenübergestellt werden sowie in regionale hydrogeologische Modelle eingebunden werden. Ebenso können die Porenwassermineralisationen und deren mögliche vertikale sowie horizontale Änderung für jeden Grundwasserleiter in das Genesemodell integriert werden.

Summary

An evaluation of the pore water mineralisation was carried out for all water-bearing aquifers in several logging campaigns using induction logs as well as fluid conductivity logs and temperature logs in time lapse mode in each groundwater observation point. Several investigated groundwater observation points in Brandenburg and Berlin show high pore water mineralisation in one or more intersected aquifers. The presented case studies show changes in the pore water mineralisation over the investigated time period recording increasing as well as decreasing of pore water mineralisation. Moreover, some groundwater observation points record a constant pore water mineralisation over the investigated time period. As illustrated, the changes of the salt water level vary regionally.

The time interval between the logging campaigns depends on already available data or a possible threat scenario (e. g. an expected increase of salt water level). Considering the amount of rainfall and the groundwater recharge (approximately the same groundwater levels) it should be noted in which season the geophysical logging campaigns are performed. The determined pore water mineralisation (in mg/l sodium chloride equivalents) should be compared with additionally taken water samples regarding to the ion distribution and integrated into regional hydrogeological models. Furthermore, the pore water mineralisation and their possible vertical and horizontal change can be integrated into the genesis model for each aquifer.

Literatur

ARCHIE, G. E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. – Petroleum Transactions of AIME **146**, 1, S. 54–62

BAUMANN, K., BURDE, B. & C. LIEBAU (2004): Monitoringmethoden für Wasserwerksstandorte mit Salzwassergefährdung. – bbr Leitungsbau | Brunnenbau | Geothermie **11**, S. 30–37

BAUMANN, K. (2008): Zustandsanalyse von Brunnen, Grundwassermessstellen und Erdwärmesonden mittels innovativer Bohrlochmessverfahren. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 81–98

FRICKE, S. & J. SCHÖN (1999): Praktische Bohrlochgeophysik. – 254 S., Stuttgart (Enke)

HOTZAN, G. & TH. VOSS (2013): Komplexe hydrogeologisch-chemisch-genetische Kartierung zur Einschätzung der Salzwassergefährdung pleistozäner und tertiärer Grundwasserleiter im Raum Storkow–Frankfurt (Oder)–Eisenhüttenstadt. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **20**, 1/2, S. 63–82

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

RECHLIN, B. (1997): Zur Anwendung des Hydrogechemischen Genesemodells der Wässer in den GWLK des Landes Brandenburg. – 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

ROSSUM, J. R. (1975): Checking the accuracy of water analysis through the use of conductivity. – J. Americ. Water Works Assoc. **67**, S. 204–205

WAGNER, R. (1980): Temperaturkorrekturfaktoren für die elektrische Leitfähigkeit von natürlichen Wässern. – Z. Wasser Abwasser Forsch. **13**, 2, S. 62–65

W & R INSTRUMENTS (2000): Focused Induction conductivity probe HI – 385F Serial No. 102. Technical Information and Interpretation Charts. – 8 S., Brno (unveröff.)

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Geol. Martin Lehmer
Bohrlochmessung – Storkow GmbH
Schützenstraße 33
15859 Storkow (Mark)
Lehmer@blm-storkow.de

Dipl.-Geol. Uwe Kaboth
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Dezernat Hydrogeologie
Inselstraße 26
03046 Cottbus
uwe.kaboth@lbgr.brandenburg.de

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 53–67	10 Abb., 5 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	-----------------

Modellbasierte geohydraulische Systemanalyse zur Salinar- und Huminstoffproblematik im Wasserwerk Potsdam-Leipziger Straße als Grundlage von Bewirtschaftungsempfehlungen

Model-based geohydraulic system analysis to localize influx of saline deep water and humic substances at the waterworks Potsdam-Leipziger Straße as basis of recommendations for management

DIETMAR SCHÄFER, KARSTEN ZÜHLKE & SILVIA DINSE

1 Aufgabenstellung

Die Landeshauptstadt Potsdam verzeichnet ein stetiges Bevölkerungswachstum. Das Landesamt für Bauen und Verkehr des Landes Brandenburg prognostiziert den Anstieg der Bevölkerung bis mindestens 2030. Hieraus leitet sich ein tendenziell steigender Wasserbedarf ab, dessen Deckung durch die Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP) sicherzustellen ist. Der EWP stehen hierzu fünf Wasserwerke (WW) zur Verfügung, die ausschließlich Grundwasser (GW) fördern.

Die Rohwasserförderung der Wasserwerke Potsdam-Wildpark und -Leipziger Straße ist besonders stark beeinflusst durch geogen salinare Tiefenwässer, die ausgehend von der Basis quartärer Erosionsrinnen an die Oberfläche aufsteigen und dabei auch in die Absenkungstrichter der Wasserwerksbrunnen gelangen und somit von diesen gefördert werden. Die dabei im Rohwasser der Brunnen beobachteten Chlorid-Konzentrationen führten in der Vergangenheit bereits zur Drosselung der Grundwasserförderung und vorübergehenden Stilllegung von Brunnen.

Ein weiteres Problem stellen die an verschiedenen Wasserwerksstandorten etwa seit Mitte der 2000er Jahre deutlich angestiegenen Werte des gelösten organischen (DOC) und des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) im Brunnenrohwasser dar, die häufig für hohe Huminstoffbelastungen stehen. Deren Ursachen können vielfältig sein und die Klärung bedarf intensiver und aufwendiger Untersuchungen. Während am Wasserwerk Potsdam-Rehbrücke die Förderung von Uferfiltrat aus der durch hohe DOC/TOC-Werte charakterisierten Nuthe als Hauptursache angesehen wird, wird am Wasserwerk Potsdam-Leipziger Straße die Herkunft der Huminstoffe im Zusammenhang mit dem Tiefenwasserzutritt gesehen.

Aus der Forderung zur Sicherstellung des steigenden Wasserbedarfs u. a. unter Beachtung der beschriebenen Beschaffenheitsrestriktionen, der sehr beschränkten Möglichkeit zur Erschließung neuer Standorte sowie eines steigenden Urbanisierungsdrucks auf bestehende Einzugsgebiete leitet

sich die Forderung nach einer effektiven Bewirtschaftung der vorhandenen Ressourcen unter Beachtung der gegebenen und auch zeitlich veränderlichen Randbedingungen ab. Für das Wasserwerk Potsdam-Leipziger Straße mit einer genehmigten jährlichen Fördermenge Q_{365} von 7 000 m³/d bedeutet dies vor allem die Entwicklung und fortschreitende Anpassung von Bewirtschaftungsstrategien zur Minimierung der vom Tiefenwasser ausgehenden geogen salinaren und geogen organischen Belastungen des Rohwassers. Dabei ist zu beachten, dass sich das Ausbreitungsverhalten der beiden Stoffgruppen in relevanten Konzentrationen aufgrund unterschiedlicher Dichtebezüge und Genese deutlich unterscheiden kann.

Bei der Bearbeitung dieser Fragestellungen konnte auf die langjährige Standorterfahrung bezüglich der im Einzugsgebiet des Wasserwerks auftretenden Grundwasserströmungsverhältnisse sowohl bei EWP als auch bei der Grundwasser Consulting Ingenieurgesellschaft (GCI) GmbH als dem mit diesen Untersuchungen beauftragten Unternehmen zurückgegriffen werden. Insbesondere zur Entwicklung von Bewirtschaftungsstrategien zur Minimierung der geogen bedingten Salzlast im Rohwasser waren in den Jahren 2003 bis 2006 die Grundwasserüberwachungsdaten ausgewertet worden. Darauf basierend wurde ein dichtegekoppeltes Grundwassertransportmodell aufgebaut und instationär kalibriert. Mit diesem Modell wurden mit besonderem Bezug zur Salinarproblematik Bewirtschaftungsempfehlungen erarbeitet, deren Umsetzung in den Folgejahren zu einer spürbaren Minderung der geogen salinaren Belastung im Rohwasser und im engeren Einzugsgebiet des Wasserwerks geführt haben (SCHÄFER et al. 2005). Unabhängig davon ist ca. seit dem Jahr 2003 ein zunächst moderater und ab ca. 2007 starker Anstieg der Huminstoffgehalte im Rohwasser der nördlichen Brunnen der Fassung Dauerwald und in dessen nordwestlichem Anstrom beobachtet worden. Da die bis 2012 erhobenen DOC-Werte teilweise hinsichtlich ihrer Plausibilität in Frage gestellt werden mussten, sind u. a. die TOC-Analysen als Indikator für die Huminstoffe ausgewertet worden. Die Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der TOC-Konzentrationen in den Brunnen der Fassung Dauerwald.

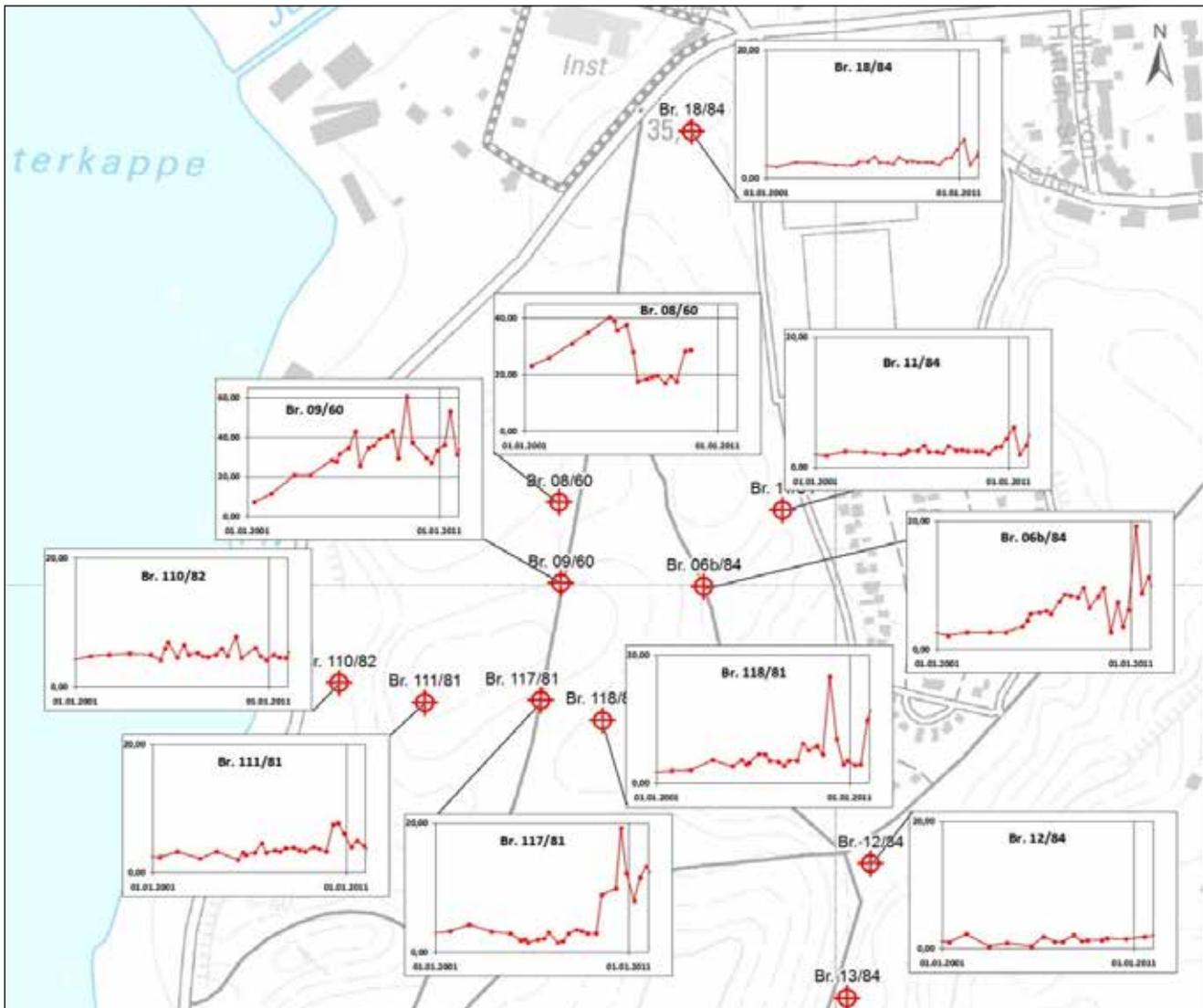


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der TOC-Konzentrationen an Brunnen (Br.) der Fassung Dauerwald des Wasserwerks Potsdam-Leipziger Straße

Fig. 1: TOC at wells of the gallery Dauerwald of waterworks Potsdam-Leipziger Straße

Parallel zum DOC/TOC-Anstieg waren auch ansteigende Partikelgehalte und Trübungen zu beobachten. Diese führten zu Einschränkungen bei der Bewirtschaftung der Brunnen der Fassung Dauerwald. Die brunnenbezogenen Untersuchungsergebnisse des Technologiezentrums Wasser (TZW) des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) Karlsruhe, Aussenstelle Dresden zeigten, dass die Trübung durch kolloidal vorliegende Eisenverbindungen erzeugt werden, für deren Entstehung die Verfügbarkeit von Huminstoffen und Eisen die Grundlage bildet (BORNMANN & WRICKE 2010). Das TZW konnte Brunnen herausstellen, die exponiert zur Trübungsproblematik des Gesamtrohwassers beitragen. Dezierte Aussagen zu den Ursachen und der Herkunft der an den Brunnen in unterschiedlichen Konzentrationen auftretenden Huminstoffe waren dem TZW mit diesen Untersuchungen jedoch nicht möglich. Hierzu war eine tiefgehende Analyse der Grundwasserströmungsverhältnisse im engeren

Einzugsgebiet der betroffenen Wasserfassung Dauerwald in ihrer zeitlichen Veränderlichkeit und damit verbunden auch der Entwicklung der Beschaffenheitsverhältnisse erforderlich. Diese modellgestützte Analyse stellte die zentrale Aufgabe der in diesem Artikel beschriebenen Arbeiten dar. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag dabei auf den Huminstoffen, die als limitierender Faktor bei der Trübungsbildung angesehen werden. Sie wurden anhand der TOC-Werte quantifiziert. Darüber hinaus waren die geogen salinaren Verhältnisse, die anhand des Referenzparameters Chlorid quantifiziert wurden, mit zu betrachten. Die Bearbeitung des Projektes umfasste folgende Leistungen:

- Überarbeitung und Erweiterung des bestehenden Hydrogeologischen Strukturmodells,
- Auswertung der Daten des Grundwassermonitorings inklusive Analyse der Grundwasserströmungs- und Be-

schaffenheitsverhältnisse sowie Ersteinschätzung zu Ursachen der Huminstoffbeeinflussung,

- Aufbau eines großräumigen Grundwasserströmungsmodells und eines kleinräumigen dichtgekoppelt rechennden Transportmodells,
- Kalibrierung der Grundwassermodelle,
- Durchführung einer modellbasierten geohydraulischen Systemanalyse zur Ermittlung der Zutrittswege der Huminstoffe zu den Brunnen,
- Durchführung von modellgestützten Bewirtschaftungsuntersuchungen bezüglich Brunnenförderungen zur Minimierung der Huminstoffbelastung und
- Empfehlungen zur Weiterentwicklung des Grundwassermonitorings.

2 Hydrogeologische Modellvorstellungen

Die Brunnen des Wasserwerks liegen in 50 m bis 500 m Entfernung östlich von der im Untersuchungsgebiet seenförmig verbreiteten Havel. Das unterirdische Einzugsgebiet erstreckt sich aus der Havel-Niederung heraus in Richtung SSE in den Bereich der Potsdamer Heide, einem morphologisch bewegten Gebietsabschnitt mit Geländehöhen bis zu 114 m NHN. Die Brunnen sind im quartären Hauptgrundwasserleiter (HGWL) verfiltert, der aus den im Untersuchungsgebiet großräumig verbreiteten Schmelzwassersanden der Saale-1-Vorschüttphase gebildet wird. In den quartären wasserleitenden Horizonten wird das Einzugsgebiet nach Osten durch das hydraulisch konkurrierende Wasserwerk Potsdam-Rehrücke in seiner Ausdehnung begrenzt. Nach Süden erfolgt eine solche Begrenzung durch das unterirdische Einzugsgebiet des Großen Seddiner Sees, in dem auch die Grundwasserentnahme der Wasserwerke Wildenbruch-Bergstraße und Bergheide stattfinden.

Der durch kohlige Schluffe und Sande sowie durch Flözhorizonte (Braunkohle) der Briesker/Mallißer Schichten (timMAu) gebildete Liegendstauer des Hauptgrundwasserleiters trennt diesen hydraulisch weitgehend von den beiden liegenden tertiären Grundwasserleitern (GWL) [Mölliner Schichten C (timMOC, oberer Quarzsandhorizont) sowie Cottbuser Schichten (tolCOo)] ab. Die Basis dieser Schichten bildet der Rupelton (tolR), der das Süßwasserstockwerk vom darunter lagernden Salzwasserstockwerk trennt.

Die geohydraulischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet werden von der SW–NE verlaufenden Beelitz-Dreilinden-Tegeler Rinne geprägt. In zwei unter der Havel und der Nuth verlaufenden Teilrinnen und einer verbindenden Nebenrinne sind die quartären Ablagerungen tief in tertiäre und auch mesozoische Schichten eingeschnitten. Die Mächtigkeit des Rupeltons ist hier auf wenige Meter reduziert, z. T. ist er auch vollständig ausgeräumt. Die Füllung der Rinnen mit quartärem Material ist bezüglich dessen Durchlässigkeit sehr heterogen ausgebildet. Die dort vorhandenen Wasserwegsamkeiten gestatten eine lokal sehr unterschiedlich ausgeprägte hydraulische Kommunikation zwischen den prä-

tertiären, den tertiären und den quartären Schichten. So sind im Umfeld der Ausräumungszonen des Rupeltons Versalzungerscheinungen bis in den süßwassererfüllten Grundwasserleiter festzustellen. Davon betroffen ist eine Reihe von Brunnen des Wasserwerkes Potsdam-Leipziger Straße. Das in den tertiären Grundwasserleitern aus SSE zuströmende Grundwasser entlastet teilweise hydraulisch in die Havelrinne und steigt dort auf. Gerät es dabei in den Absenkungsbereich der Brunnen, so tritt es über den Rinnenrand in den Modellgrundwasserleiter (MGWL) II ein und wird ebenfalls von den Brunnen gefasst. Die Abbildung 2 zeigt anhand eines schematischen hydrogeologischen Schnittes die Zustromverhältnisse zu den Brunnen.

Trotz der Nähe der Brunnen zur Havel fördern diese bei den in den letzten beiden Jahrzehnten moderaten Fördermengen nur zu einem sehr geringen Anteil Uferfiltrat. Die Ursache liegt in den grundwassergeringleitenden holozänen Bildungen (Mudde, Anmoor, Torf) unterschiedlicher Mächtigkeit an der Gewässersohle der Havel, woraus nur eine geringe hydraulische Kommunikation des Gewässers mit dem Hauptgrundwasserleiter resultiert.

Das in der Untersuchungskampagne 2003–2006 aufgebaute hydrogeologische Modell wurde mit den Informationen zum Schichtenaufbau abgeglichen, die bei den Bohrungen der seinerzeit empfohlenen und zwischenzeitlich gebauten Grundwassermessstellen gewonnen wurden. Daraus ergab sich lediglich die Notwendigkeit zu wenigen und kleinräumigen Anpassungen des hydrogeologischen Modells.

3 Auswertung des Grundwassermonitorings

Grundlage der Auswertungen des Grundwassermonitorings waren die archivierten und im Zuge der Datenaufbereitung ergänzten Beschaffenheitsdaten in der vom Auftraggeber geführten und übergebenen wasserwirtschaftlichen Datenbank zum Wasserwerk Potsdam-Leipziger Straße. Bei der Auswertung wurden zunächst die klassischen Methoden zur Analyse der Grundwasserströmungsverhältnisse in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität angewendet. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Erkennen kausaler Zusammenhänge zwischen der zeitlichen Entwicklung der wesentlichen Einflussgrößen und jener der Grundwasserstände und -gradienten gelegt. Neben der Brunnenförderung und dem Havelwasserstand war hier die Grundwasserneubildung in ihrer zeitlichen und flächenhaften Veränderlichkeit zu berücksichtigen.

Die Wasserbeschaffenheit wurde entsprechend der vorgegebenen Aufgabenstellung gezielt mit Blick auf die Salinar-, Huminstoff- und Trübungsproblematik ausgewertet. Zusätzlich wurden an Grundwassermessstellen erkannte Auffälligkeiten der Grundwasserbeschaffenheit geprüft. Der Datenbestand war u. a. infolge der zwischenzeitlich umgesetzten Anpassungsempfehlungen zum Grundwassermonitoring wesentlich umfangreicher und aussagefähiger als der 2003–2006 zur Verfügung stehende Datensatz.

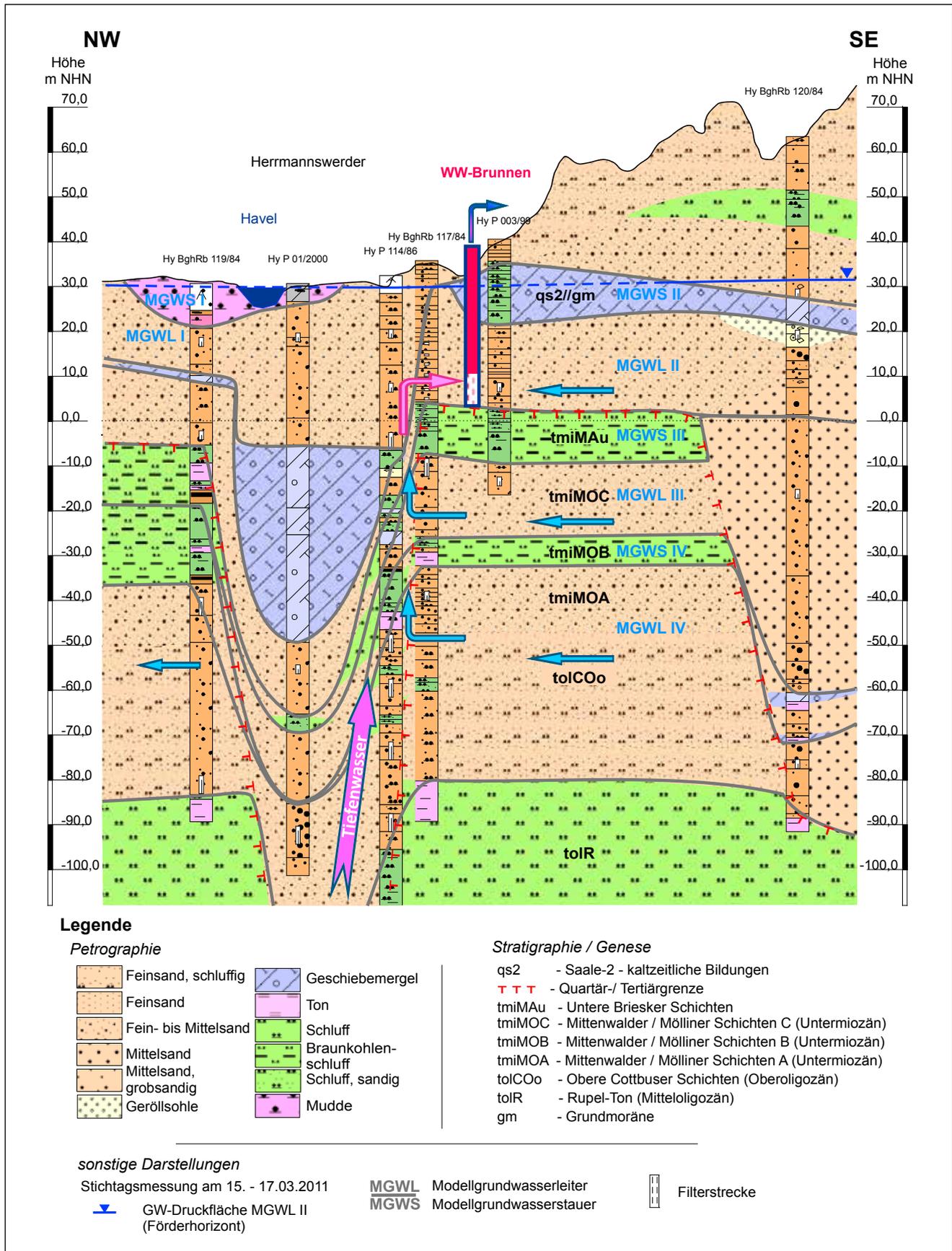


Abb. 2: Schematischer geologischer Schnitt mit den Zustrompfaden des Grundwassers (GW) zu den Brunnen des Wasserwerks (WW) Potsdam-Leipziger Straße

Fig. 2: Geological section with flowpaths to the wells of waterworks Potsdam-Leipziger Straße

Zur Feststellung, Beschreibung und Interpretation der geogen salinaren Beeinflussung konnte am Standort die 2010 vom Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) herausgegebene Software GEBAH (RECHLIN et al. 2010) erstmalig eingesetzt werden. Mit GEBAH können salinar geprägte Wässer von nicht salinar geprägten Wässern unterschieden sowie die Intensität der Beeinflussung beurteilt werden. Die Auswertung basiert auf Anionen- und Kationenuntersuchungen und ist dabei konzentrationsunabhängig. Geogen salinare Einträge sind somit bereits erkennbar, bevor diese anhand erhöhter Salzkonzentrationen messbar werden (siehe Beitrag BROSE in diesem Band). Die Auswertungen wurden sowohl einzugsgebietsweit als auch kleinräumig bezogen auf die Anstrombereiche der Brunnen und deren Rohwasser durchgeführt. Dabei ist eine möglichst umfängliche Analyse der zeitlichen Entwicklung der relevanten Stoffkonzentrationen im Förderwasser der Brunnen und in Grundwassermessstellen eine wesentliche Grundlage für die Bewertung der Brunnenbewirtschaftung bezüglich ihrer Wirkung auf die Beschaffenheitsentwicklung.

Es kann eingeschätzt werden, dass die salinare Belastung gegenwärtig weiterhin der Beachtung bei der Bewirtschaftung der Brunnen bedarf, aber unter den realisierten Fördermengen keinen limitierenden Faktor darstellt.

Diesbezüglich schärfer zu bewerten sind die seit ca. 2005 zu beobachtenden Anstiege der Trübung und der Huminstoffgehalte vor allem an den nördlichen Brunnen des Fassungs Dauerwald. Die in einigen Brunnen erreichte Partikelführung zwang den Betreiber zur dauerhaften Außerbetriebnahme dieser Brunnen. Hieraus ergeben sich Restriktionen bei der Bewirtschaftung, welche die Einhaltung wasserwirtschaftlicher Erfordernisse als auch die sich aus der Salinarproblematik ableitenden Bewirtschaftungsempfehlungen erschweren. Zur Entwicklung einer Abwehrstrategie war zunächst die Frage der Herkunft der Huminstoffe zu klären. Eine hierzu vorgenommene Auswertung zur räumlichen Verbreitung deutlich erhöhter DOC/TOC-Konzentrationen zeigt ein hohes Maß an Übereinstimmung mit dem Verbreitungsmuster der an Messstellen und Brunnen festgestellten hohen geogen salinaren Belastungen. Dies betrifft zunächst die laterale Ausbildung des sich ausgehend von den nördlichen Brunnen der Fassung Dauerwald nach NNW in Richtung Havel-Rinne erstreckenden Anstromsektors. Weiterhin ist festzustellen, dass in den auf der Basis des MGWL II (vgl. Abb. 2) verfilterten und salinar beeinflussten Messstellen die DOC/TOC-Gehalte deutlich erhöht sind und über denen der flacher ausgebauten Filterstrecken liegen. Insofern erscheint die Zersetzung organischen Materials im Boden oder der Zustrom eines besonders DOC-haltigen Uferfiltrats als Huminstoffquelle unwahrscheinlich, zumal die in der Havel ermittelten DOC- und TOC-Konzentrationen deutlich unter den extrem hohen Werten in Messstellen und Brunnen liegen.

Weiter vertieft wurden diese Auswertungen durch die Einbeziehung des Parameters „spektraler Absorptionskoeffizient bei 254 nm“ (SAK 254 nm). Aus dem als Aromatizität bezeichneten Verhältnis zwischen diesem Parameter und

der DOC-Konzentration können Hinweise zur Herkunft der Huminstoffe gewonnen werden. Letztlich liefern auch diese Auswertungen Hinweise auf einen engen Zusammenhang zwischen dem geogen salinaren Tiefenwasserzutritt und dem verstärkten Zustrom von Huminstoffen.

Die weiteren Untersuchungen orientierten sich an der These, dass die Huminstoffe entweder mit dem geogen salinaren Tiefenwasser aus der Tiefe der Havel-Rinne aufsteigen und den von dem Brunnenbetrieb initiierten Strömungsrichtungen folgend in den Hauptgrundwasserleiter eintreten oder aber beim Eintritt des Salzwassers in diesen durch Kontakt mit dessen kohlehaltigem Liegendstauer gebildet werden.

Die Auswertung der verfügbaren Monitoringdaten gestattet es insbesondere aufgrund einer nur geringen Messstellendichte am Rinnenrand nicht, die zweifellos dort nicht gleichmäßig ausgebildeten Zustrompfade der Huminstoffe klar zu identifizieren. Es wurden deshalb Modelluntersuchungen konzipiert, mit deren Hilfe die Brunneneinzugsgebiete in ihrer historischen Entwicklung zeitlich und räumlich hochauflösend berechnet werden können. Durch Zuordnung derart ausgewiesener Einzugsgebiete zu exponierten Ereignissen und Entwicklungen von Konzentrationen wurde eine Präzisierung des durch die Monitoringdaten gezeichneten Anstrombildes für Huminstoffe bzw. TOC/DOC angestrebt.

4 Aufbau und Kalibrierung der numerischen Grundwassermodelle

Die Grundwassermodellierung wurde in zwei unterschiedlichen Maßstabebenen durchgeführt. Zunächst wurde ein großräumiges Grundwasserströmungsmodell aufgebaut, dessen Ausdehnung sich am unterirdischen Einzugsgebiet des Wasserwerks Potsdam-Leipziger Straße orientiert. In seiner vertikalen Ausdehnung erstreckt es sich bis zur Oberkante des Rupeltons. Das Modell wurde instationär über einen mehrjährigen Zeitraum kalibriert. Anwendungsziele für dieses Modell waren zunächst die Durchführung von verschiedenen wasserhaushaltlichen Untersuchungen und von großräumigen Gefährdungsabschätzungen. Ein weiteres wesentliches Anwendungsgebiet besteht darin, Werte für die Quantifizierung der äußeren Randbedingungen des Detailmodells bereitzustellen, mit dem die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt wurden. Dieses Detailmodell wurde aus dem Regionalmodell im Bereich des von den Brunnen beherrschbaren Einzugsgebietes „herausgeschnitten“. Beide Modelle können über die Grundwasserdrukhöhen an den äußeren Randknoten des Detailmodells simultan oder sequentiell gekoppelt betrieben werden. Das Regionalmodell beinhaltet eine Fläche von 71 km², wohingegen das Detailmodell einen Flächeninhalt von nur 8 km² besitzt. Es zeichnet sich gegenüber dem Regionalmodell durch eine deutlich höhere Diskretisierungsdichte sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen aus. In einigen Bereichen des Detailmodells wurde auch der geologische Inhalt detaillierter abgebildet, als dies im Regionalmodell möglich war. Beide Modelle werden unter Verwendung der Simulationssoftware FEFLOW® (DIERSCH 2014) betrieben.

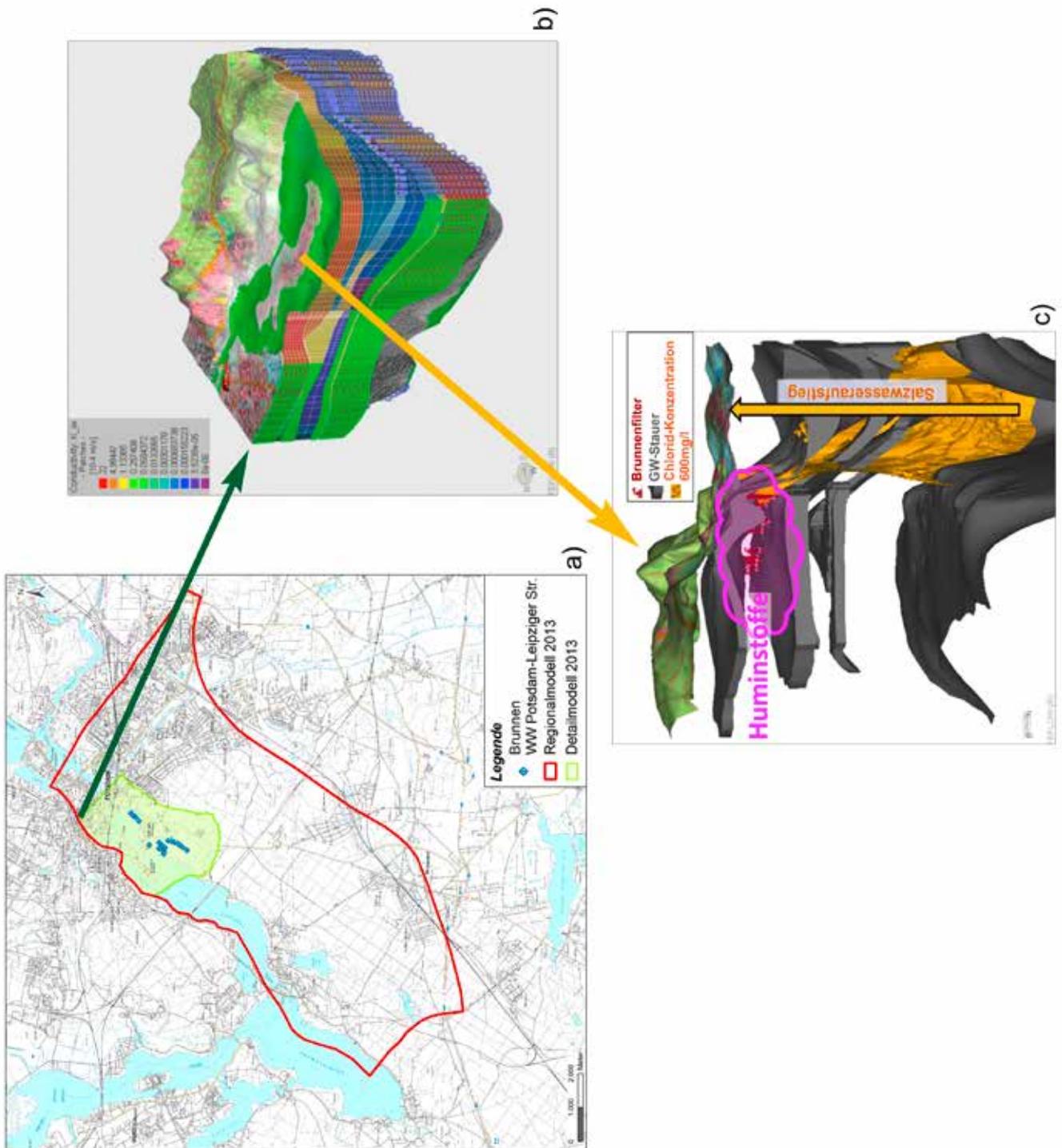


Abb. 3: Ableitung des Detailmodells (b) aus dem Regionalmodell (a) sowie Darstellung des modellierten Salzwasseraufstiegs zu den Brunnen des Wasserwerks (WW) Potsdam-Leipziger Straße (c)

Fig. 3: Delineation of the detailed model (b) from the regional model (a) and simulated saltwater upconing to the wells of waterworks Potsdam-Leipziger Straße

Die Abbildung 3 zeigt schematisch die Ableitung des Detailmodells aus dem Regionalmodell, sowie eine mit dem Detailmodell modellierte Aufstiegssituation der geogen salinaren Tiefenwässer zu den Brunnen des Wasserwerks.

Die sehr hohe räumliche Diskretisierungsdichte des Detailmodells ist Voraussetzung für die mit diesem Modell dichtgekoppelt durchzuführenden Simulationen. Die im Bereich des Übertritts des Tiefenwassers in den Hauptgrundwasserleiter ermittelten Chlorid-Konzentrationen von bis zu 8 g/l lassen eine Dichtebeeinflussung der Grundwasserströmung erwarten, deren Vernachlässigung die Aussagefähigkeit der mit diesem Modell durchzuführenden geohydraulischen Systemanalyse stark eingeschränkt hätte. Das Hauptziel dieser Analyse besteht in der Ermittlung der Migrationswege der Huminstoffe, deren Konzentrationen jedoch nicht dichterelevant sind. Da diese Strömungsbereiche potenziell auch durch hohe Salinitäten charakterisiert sind, ist jedoch mit einer indirekten Beeinflussung der Huminstoffmigration durch salinar beeinflusste Dichteströmungen zu rechnen.

Aus diesem Grund wurde das Detailmodell als Stofftransportmodell ausgelegt, in dem gleichzeitig der Transport des Chlorids als Referenzstoff für die Salinität und des TOC als Referenzparameter für die Huminstoffe be-

rechnet wurde. Das Modell wurde über den Zeitraum 1920–2011 bezüglich der Chlorid-Konzentrationen im Rohwasser der verschiedenen Wasserfassungen und auch von Einzelbrunnen sowie bezüglich des Gangs der Grundwasserdruckhöhen an Grundwassermessstellen instationär kalibriert. Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch die im Zuge der Kalibrierung erreichte Übereinstimmung der im Rohmischwasser analysierten und berechneten Chlorid-Konzentrationen.

5 Geohydraulische Systemanalyse

5.1 Zielstellung und grundlegender Lösungsansatz

Die Hauptzielstellung für die modellgestützt durchzuführende geohydraulische Systemanalyse bestand in der Klärung des Zusammenhangs zwischen der Brunnenbewirtschaftung und der Huminstoffbelastung im Rohwasser der Brunnen der Fassung Dauerwald. Im Ergebnis der Monitoringauswertung war anzunehmen, dass die Huminstoffe ausgehend von den Übertrittsbereichen des Tiefenwassers am Rinnenrand auf die Brunnen zuströmen. Ungeklärt blieb dort die Frage, ob diese Stoffe ebenfalls aus der Tiefe zutreten oder aber im Übertrittsbereich erst gebildet werden. Deutlich wurde jedoch, dass die Intensität des Huminstoffeintritts in den bewirtschafteten Hauptgrundwas-

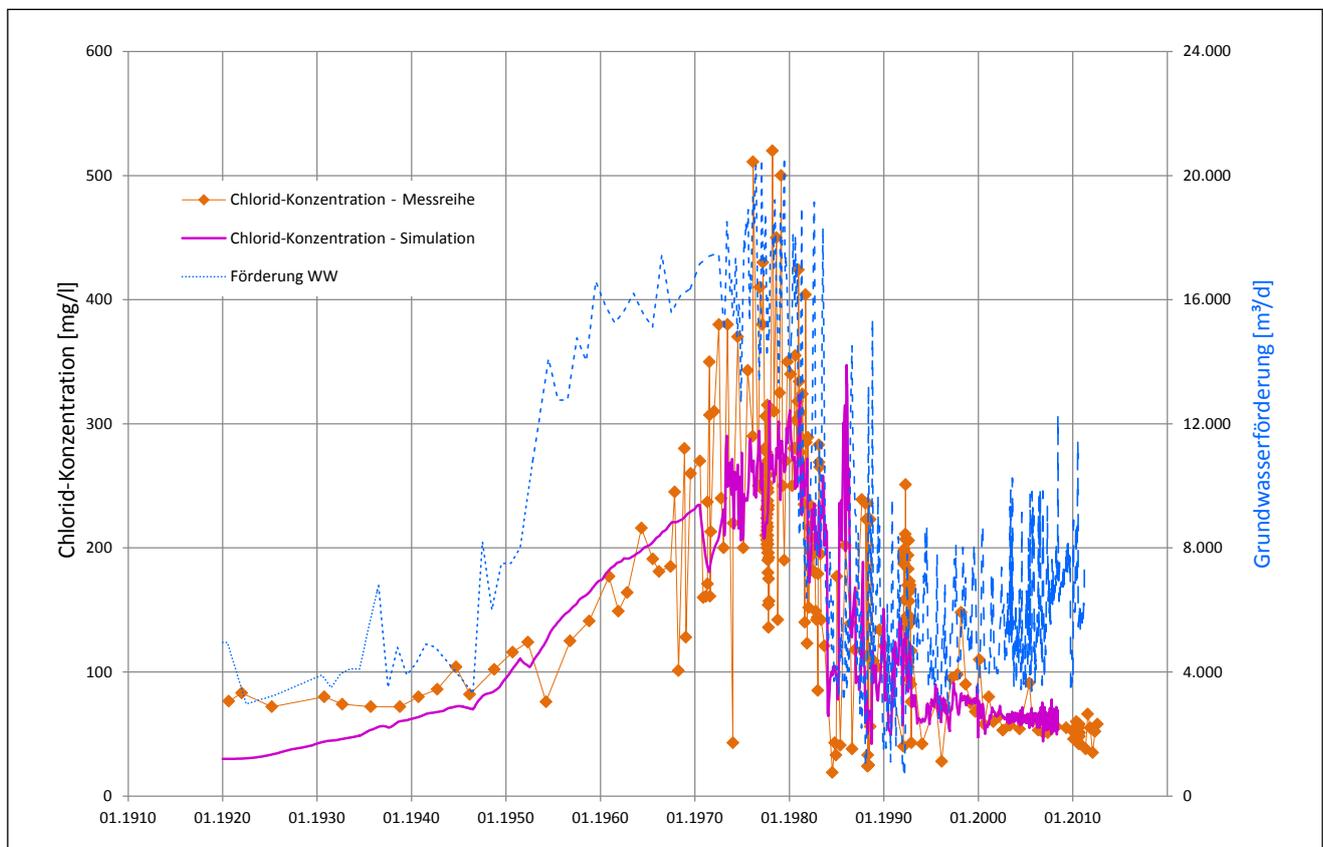


Abb. 4: Gemessene und als Kalibrierungsergebnis simulierte Chlorid-Konzentrationen im Rohwasser des Wasserwerks Potsdam-Leipziger Straße

Fig. 4: Observed and simulated chloride concentration of raw water at the waterworks Potsdam-Leipziger Straße

serleiter entlang des Rinnenrandes sehr unterschiedlich zu erwarten ist, ohne dass anhand der Messwerte eine klare Ortung besonders intensiver Quellbereiche möglich war. Durch die geohydraulische Systemanalyse sollten diese Hotspots am Rinnenrand möglichst detektiert werden. Sind diese Quellbereiche einmal erkannt, können die davon ausgehenden Migrationswege zu den Brunnen auch unter Berücksichtigung des variablen Förderregimes mit dem Grundwassermodell nachvollzogen werden. Hieraus ergibt sich ein Systemverständnis, von dem ableitend Förderstrategien entwickelt werden können, die eine Minimierung der Huminstoffbelastung im Rohwasser der Fassung erwarten lassen. Die Überprüfung der Wirksamkeit dieser Förderstrategien ist dann ebenfalls mit dem Grundwassermodell möglich.

Zur Ermittlung der besonders intensiven Zutrittsbereiche der Huminstoffe in den Grundwasserleiter wurde die Strategie verfolgt, die instationären Einzugsgebiete einzelner Brunnen für Zeitpunkte zu ermitteln, an denen in deren Förderstrom markante Konzentrationsspitzen von TOC festgestellt wurden. Instationär berechnete Einzugsgebiete umfassen alle Bereiche eines Strömungsraums, in denen sich jene Wasserpartikel in der von der Simulation erfassten Vergangenheit befinden haben können, die zu einem bestimmten Zeitpunkt vom Brunnen gefördert wurden. Somit war für

die Situationen mit Spitzenkonzentrationen anzunehmen, dass sich der zu suchende Quellbereich im Einzugsgebiet des jeweiligen Brunnens befunden haben sollte. Dabei wird die Historie der unterschiedlichen Brunnenförderungen bzw. deren Wirkung auf die Grundwasserströmung in der Detailliertheit berücksichtigt, in der diese im Modell über die Förderganglinien abgebildet ist. Dies trifft auch für weitere Randbedingungen wie Grundwasserneubildung und Havel-Wasserstände zu, die in ihrer Bedeutung hier jedoch zurücktreten.

Wenn man nun diese Untersuchungen für verschiedene Konzentrationsspitzen zu unterschiedlichen Zeiten an einem Brunnen und auch an verschiedenen Brunnen durchführt, so ergibt sich eine Reihe von Einzugsgebieten, in denen jeweils der Hotspot des Huminstoffzutritts in den Grundwasserleiter zu erwarten ist. Überlagert man nun diese Einzugsgebiete, so ergeben sich potenziell ein oder mehrere Bereiche mit besonders hoher Überlagerungsdichte. Dies sind Bereiche, in denen sich viele Einzugsgebiete überschneiden. Diesen Arealen können dann die höchsten Wahrscheinlichkeiten eines besonders intensiven Huminstoffzutritts zugeordnet werden. Die Abbildung 5 zeigt im Förderstrom ausgewählter Brunnen analysierte Konzentrationganglinien TOC mit Konzentrationsspitzen, für die instationäre Einzugsgebiete berechnet wurden.

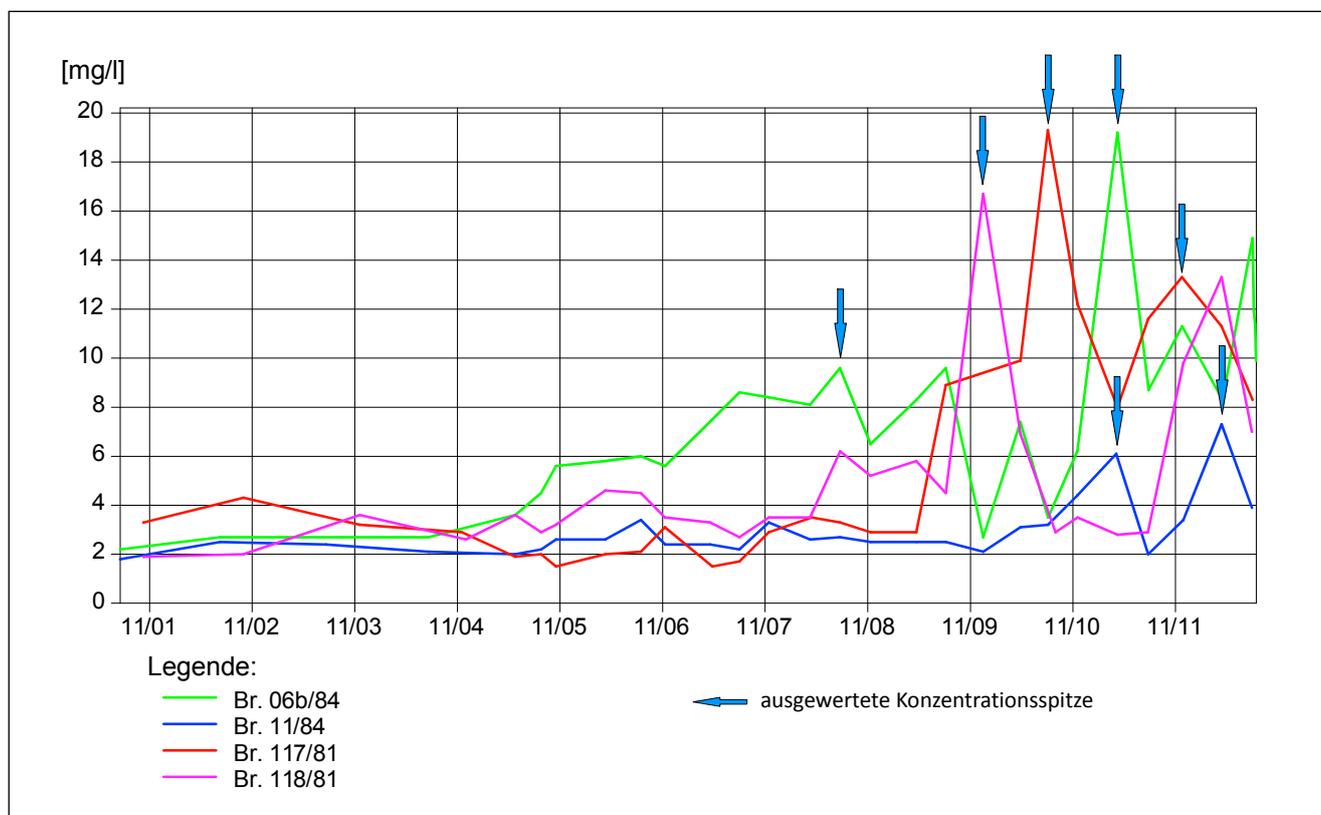


Abb. 5: Konzentrationsspitzen TOC im Brunnenförderwasser ausgewählter Brunnen (Br.) des Wasserwerks Potsdam-Leipziger Straße, für die instationäre Einzugsgebiete berechnet wurden

Fig. 5: TOC peaks at wells of waterworks Potsdam-Leipziger Straße for which instationary varying catchments were calculated

Ergänzend zu dem beschriebenen methodischen Ansatz wurde auch die Veränderlichkeit der Einzugsgebiete in Abhängigkeit der Brunnenförderung in einer mittleren bis längerfristigen Zeitskala analysiert. Auf diese Weise konnte ein Verständnis dafür entwickelt werden, welche eher längerfristigen Änderungen des Förderregimes zu welchen Tendenzen bei der Verlagerung der Brunneneinzugsgebiete führen. Insbesondere an benachbarten Brunnen gegenläufig beobachtete Trends können hier sehr aussagefähig sein. Damit wurden wesentliche Grundlagen für die zukünftige Bewirtschaftungsplanung erarbeitet.

Für die Berechnung instationärer Einzugsgebiete existieren unterschiedliche Modellierungsmethoden, von denen die drei nachfolgend erläuterten zum Einsatz kamen:

- Berechnung instationärer Anstrombahnlinien zu den Brunnen,
- Wanderpunktverfahren zur Berechnung instationärer, d. h. zeitlich veränderlicher Einzugsgebiete und
- Ableitung instationärer Einzugsgebiete aus der Berechnung von Entnahmewahrscheinlichkeiten.

5.2 Berechnung instationärer Anstrombahnlinien zu den Brunnen

Bei dem klassischen Bahnlinienverfahren werden zum Auswertungszeitpunkt am auszuwertenden Brunnen Wanderpunkte markiert, deren Bewegung in dem zuvor instationär berechneten und gespeicherten Strömungsfeld entgegen der natürlichen Strömungsrichtung verfolgt wird. Die dabei entstehende Spur eines jeden gestarteten Wanderpunktes wird als instationäre Bahnlinie bezeichnet. Das Verfahren ist vergleichsweise wenig aufwendig und liefert bezüglich der Ausweisung von Einzugsgebieten für bestimmte Fördersituationen gut interpretierbare Ergebnisse, die auch Angaben zur zeitlichen Lage der verfolgten Wanderpunkte in der Vergangenheit beinhalten können. Allerdings erwies sich das Verfahren unter den Bedingungen der vorherrschenden hochdynamischen Strömungsverhältnisse als wenig geeignet zur Entwicklung eines generellen Systemverständnisses in der mittel- und längerfristigen Zeitskala. Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch Anstrombahnlinien, die für ausgewählte Brunnen zur Rückverfolgung des im August 2010 geförderten Wassers berechnet wurden. Die Farbge-

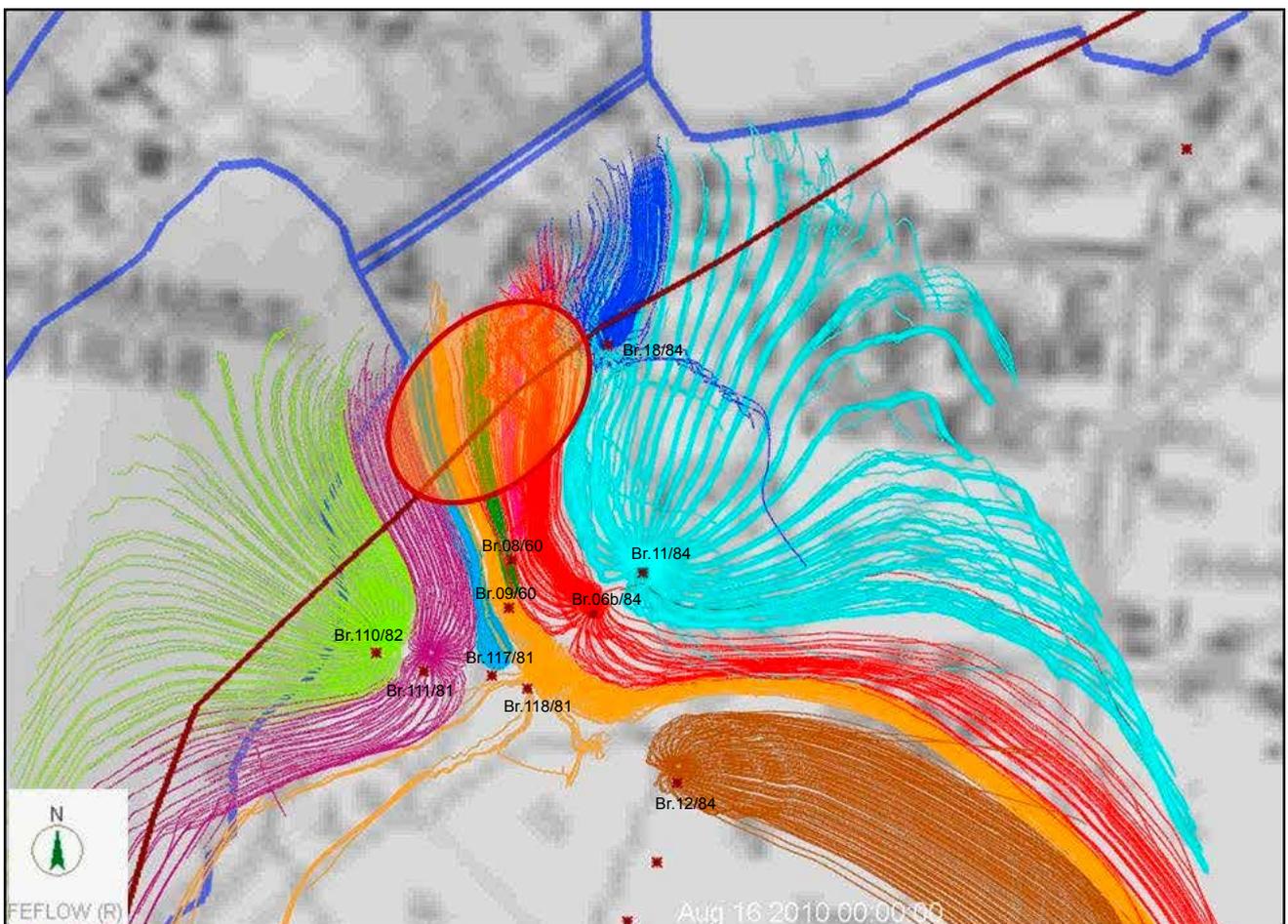


Abb. 6: Anstrombahnlinien zu Brunnen (Br.) des Wasserwerks Potsdam-Leipziger Straße zur Rückverfolgung des dort im August 2010 geförderten Wassers

Fig. 6: Backtracking of pumped water in August 2010 with pathlines to the wells of waterworks Potsdam-Leipziger Straße

bung der Bahnlinien erfolgte brunnen-spezifisch. In der Abbildung eingezeichnet ist in schematisierter Weise der relevante Rinnenrand und der im Ergebnis der Systemanalyse abschließend ermittelte wahrscheinliche Zutrittsbereich der Huminstoffe.

5.3 Wanderpunktverfahren zur Berechnung instationärer Einzugsgebiete

In einem zweiten angewendeten Verfahren wird ebenfalls der Strömungsweg von Wanderpunkten im zeitlich variablen Strömungsraum berechnet und ausgewertet. Hierzu werden im Verlauf der klassischen instationären Berechnung des Strömungsfeldes in den auszuwertenden Teilgebieten des Modells in regelmäßigen zeitlichen Abständen räumlich verteilt Wanderpunkte gestartet. Deren Lagepunkte können nach jedem Zeitschritt der Modellrechnung in einer Datenbank gespeichert werden. Damit besteht auch nach Abschluss der Modellrechnung jederzeit die Möglichkeit, die Datenbank hochflexibel bezüglich vielfältig denkbarer Fragestellungen auszuwerten, wovon

die Ausweisung von instationären Einzugsgebieten nur eine ist. Durch aggregierende Datenbankabfragen lassen sich Trends und kausale Zusammenhänge erkennen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die zeitliche Auflösung der Auswertung nicht durch die zeitliche Auflösung der Ergebnisspeicherung, sondern nur durch die Zeitschrittlängen während der Simulation begrenzt ist. Der Nachteil des Verfahrens besteht in den überdurchschnittlichen rechentechnischen Anforderungen und in den in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung derzeit noch langen Rechenzeiten. Die GCI GmbH als Entwicklerin dieses sehr aussagekräftigen Verfahrens arbeitet kontinuierlich an dessen Weiterentwicklung, primär mit der Zielstellung der Performancesteigerung. Die Abbildung 7 zeigt die GIS-basierte Auswertung einer so gefüllten Datenbank. Die schwarzen Punkte stellen dabei Startpositionen von Wanderpunkten dar, die im Verlauf der Gesamtberechnung den Brunnen 117/81 erreicht haben. Die grauen Punkte dagegen markieren Startpositionen von Wanderpunkten, die diesen Brunnen im August 2010 erreicht haben. Die schwarze Linie als Umhüllende der grauen Punkte beschreibt dann das instationäre Einzugsgebiet des Brunnen

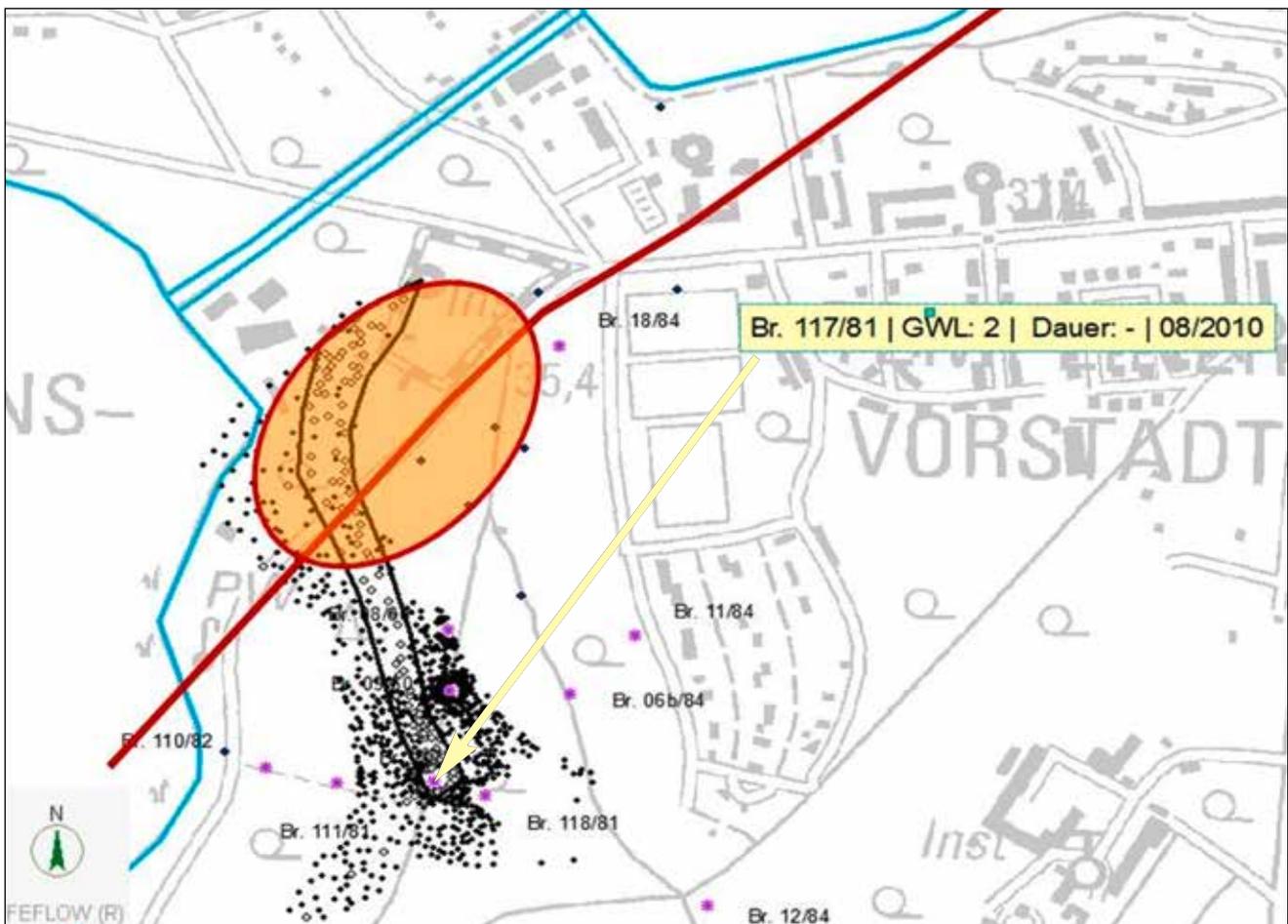


Abb. 7: Instationäre Einzugsgebiete für den Brunnen (Br.) 117/81 im Grundwasserleiter (GWL) 2 kumulativ für den gesamten Berechnungszeitraum und für die Fördersituation August 2010

Fig. 7: Instationary catchment of well 117/81, August 2010 and cumulative for the simulation period

117/81 im August 2010. Informationen zur zeitlichen Lage oder zu Fließzeiten sind hier nicht dargestellt, aber ebenfalls aus der Datenbank abrufbar.

5.4 Berechnung von Entnahmewahrscheinlichkeiten

Die Software FEFLOW® bietet als eine weitere Methode zur Ermittlung instationärer Einzugsgebiete im Rahmen der Modellierung des Grundwasseralters die Berechnung der sogenannten Exit Probability an. Dabei wird für jede Modellzeit für jeden Punkt im Modellraum die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass ein in der Vergangenheit sich dort befindener Wasserpartikel das Modell zur aktuellen Modellzeit über eine zuvor definierte Randbedingung verlässt. Diese Wahrscheinlichkeiten werden nachfolgend als Entnahmewahrscheinlichkeiten bezeichnet. Für die entnehmende Randbedingung, hier ein betroffener Brunnen, ist das instationäre Einzugsgebiet durch diejenige Fläche definiert, die innerhalb der 50 %-Wahrscheinlichkeitsisolinie liegt. Dieses Verfahren gehört zur Familie der Altersmodellierungen, die prinzipiell Transportmodellierungen sind.

Somit muss für jeden auszuwertenden Brunnen eine eigenständige Transportmodellierung durchgeführt werden. Hierdurch ist ein gegenüber dem Bahnlinienverfahren deutlich erhöhter rechentechnischer Aufwand zu veranschlagen. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der klassischen Bahnlinienauswertung wird vor allem in der guten Übersichtlichkeit und in der Regel leichten Interpretierbarkeit der Ergebnisse gesehen. Dies betrifft sowohl die bezüglich der Zeit kleinskalige Auswertung im Sinne der Ausweisung eines zeitpunktbezogenen Einzugsgebietes als auch die mittel- und längerskalige Auswertung zur Ermittlung von Trends und generellen Zusammenhängen im Strömungsraum. Die Abbildung 8 zeigt die unter Anwendung der beschriebenen Methodik für die Brunnen 117/81, 06B/84 und 11/84 für die Strömungssituation August 2010 berechneten instationären Einzugsgebiete.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die drei Verfahren auch für die verschiedenen Zeitpunkte von Konzentrationsspitzen weitgehend übereinstimmende Ergebnisse liefern. Danach ist ein besonders intensiver und die Huminstoffkonzentrationen im Förderwasser der Brunnen

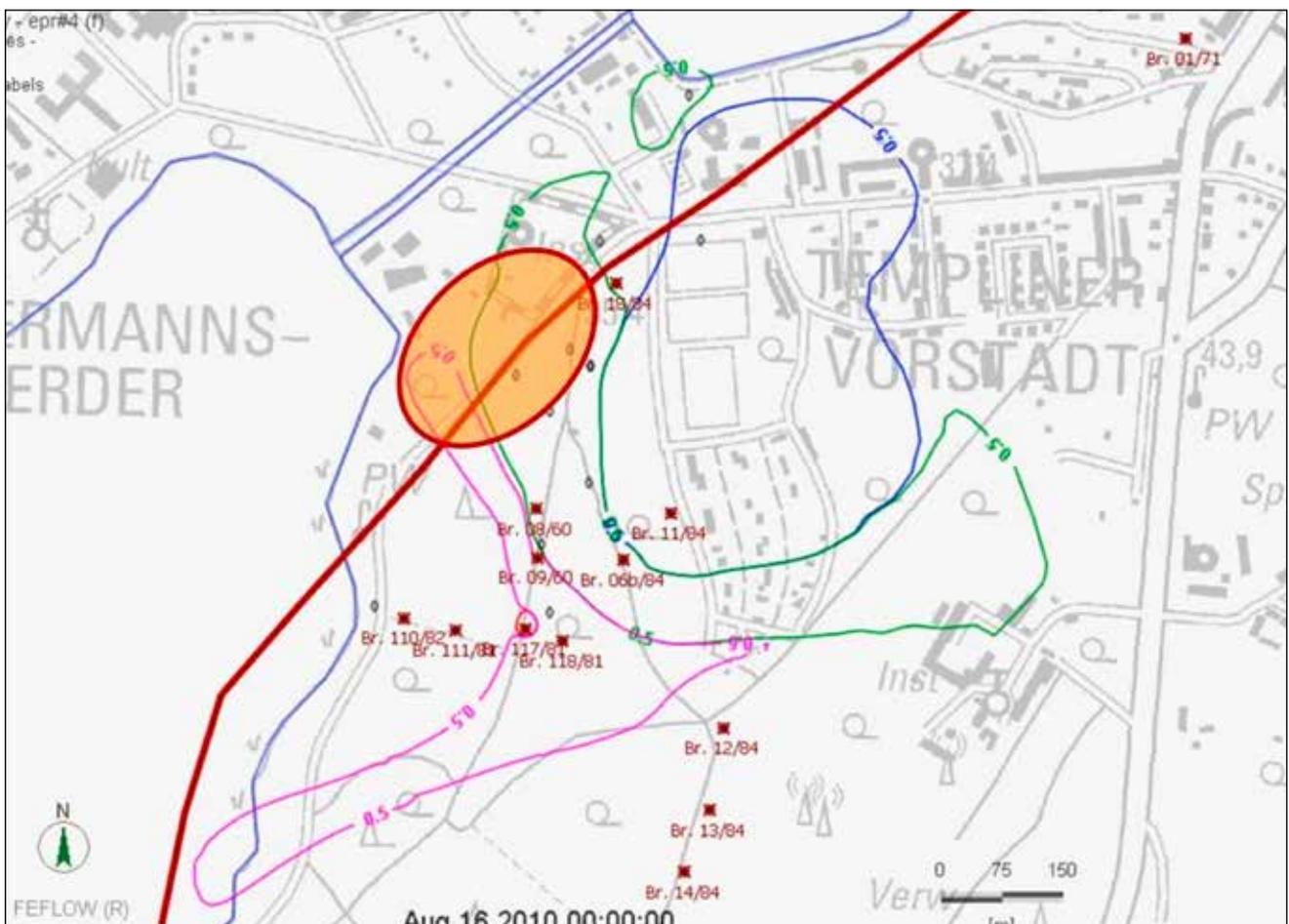


Abb. 8: Linien 50 %iger Entnahmewahrscheinlichkeiten als Grenzen instationärer Einzugsgebiete der Brunnen (Br.) 117/81, 118/81, 06B/84 und 11/84 für die Fördersituation August 2010

Fig. 8: Isolines of 50% exit probability at the wells 117/81, 118/81, 06B/84 and 11/84 in August 2010, used as borderline for the instationary catchment

bestimmender Zutrittsbereich in dem Gebiet zu vermuten, dass in den Abbildungen 6–8 durch eine Ellipse gekennzeichnet ist.

Bei der Bewertung der Übereinstimmung der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren ist zu beachten, dass diese grundsätzlich zu erwarten waren, weil diese Methoden lediglich verschiedene Sichten auf dasselbe Modellierungsergebnis bezüglich der räumlichen und zeitlichen Entwicklungen der Grundwasserfließgeschwindigkeiten nach Betrag und Richtung darstellen. Durch die vergleichende Betrachtung der drei Ansätze konnten jedoch bei der Auswertung methodische Fehler ausgeschlossen und die den verschiedenen Methoden zuzuordnenden Unschärfen erkannt werden. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen gestatten zukünftig eine sich an der jeweiligen Aufgabenstellung orientierende Auswahl einer dort besonders geeigneten Auswertungsmethodik.

Zum Abschluss der geohydraulischen Systemanalyse wurden Modelluntersuchungen durchgeführt, welche die Plausibilität der bisherigen Untersuchungsergebnisse bewerten sollten. Zunächst wurde hierzu eine hypothetische Transportmodellierung durchgeführt. Dabei wurde in dem ausgewiesenen Zutrittsbereich der Eintrag von TOC in ei-

ner normierten Konzentration und davon ausgehend die Migration dieses Stoffes zu den Brunnen simuliert. Die Dynamik der an den Brunnen berechneten normierten TOC-Konzentrationen und jene der analysierten Konzentrationen (ebenfalls normiert) wurden anschließend verglichen. Ein Vergleich der absoluten Konzentrationen war nicht möglich, da die Quellkonzentrationen oder -frachten im Zutrittsbereich als potenzielle Eintragsrandbedingungen der Transportmodellierung nicht bekannt sind. An der Mehrzahl der Brunnen konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Verläufen der analysierten und simulierten Konzentrationen nachgewiesen werden. Die Abbildung 9 zeigt beispielhaft eine solche Gegenüberstellung für die Konzentrationen des Brunnens 06b/84.

In einer weiteren Plausibilitätsbewertung wurde eine inverse Transportmodellierung durchgeführt. Bei dieser von der GCI entwickelten Methodik wird der gesamte Strömungs- und Transportprozess zeitlich invertiert. Die Berechnung erfolgt in die Vergangenheit hinein. Die Förderganglinien der Brunnen werden dabei zeitlich gespiegelt als Infiltrationsganglinien an den Brunnen angesetzt. Diesen Infiltrationsströmen werden die im Förderstrom der Brunnen analysierten Konzentrationen ebenfalls zeitlich gespiegelt als

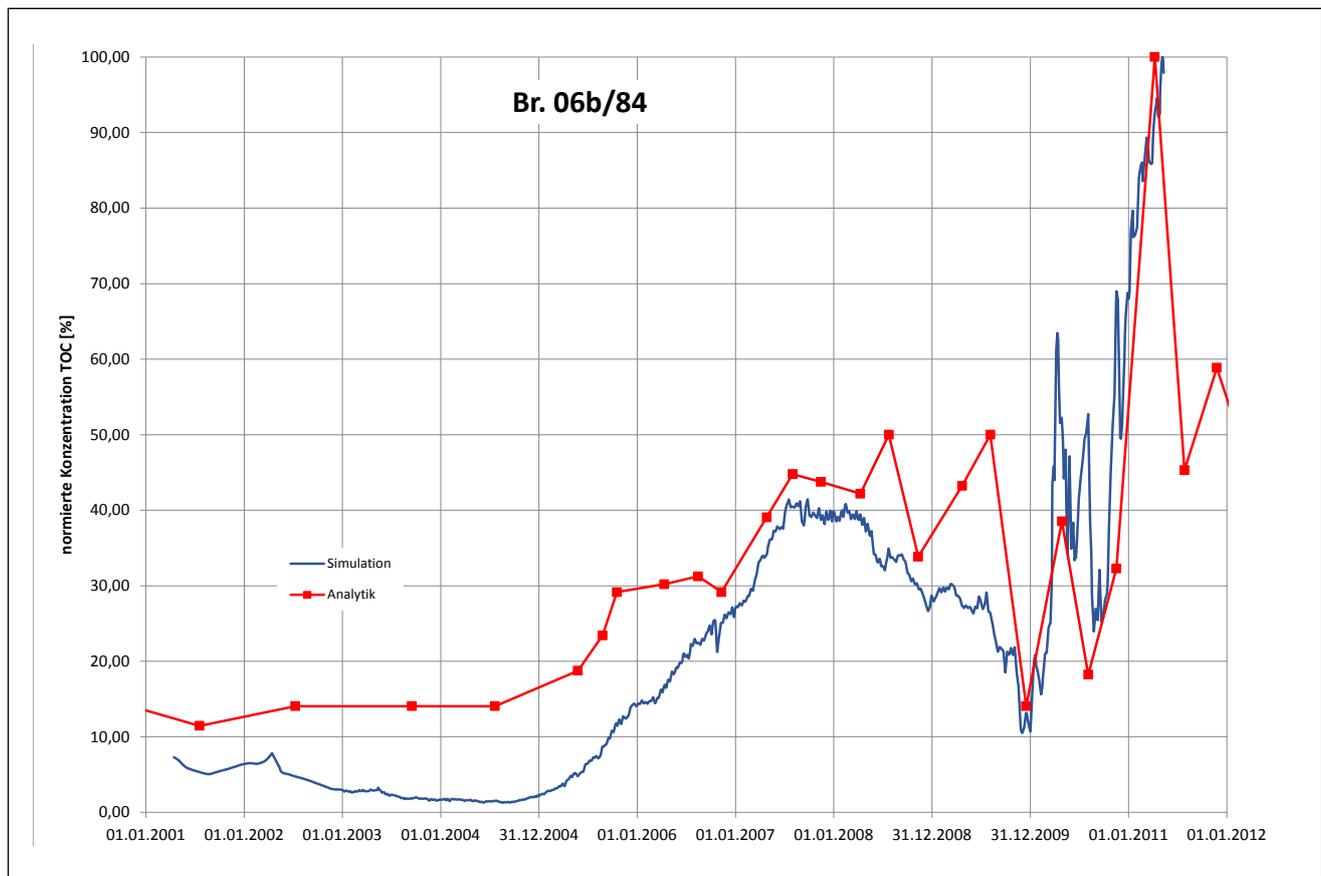


Abb. 9: Durch hypothetische Transportmodellierungen simulierte und gemessene Konzentrationsganglinien im Förderwasser des Brunnens (Br.) 06b/84 (normiert)

Fig. 9: Normed observed and simulated concentration at well 06b/84 in hypothetic transport simulations

Randbedingungen zugeordnet, so dass bei der Simulation die mit diesen Konzentrationen verbundenen Frachten in den Modellraum eingetragen werden. Die Abdrift der eingetragenen Stoffe kann dahingehend analysiert werden, dass die zeitabhängig berechneten formalen Konzentrationsverteilungen als Lagewahrscheinlichkeiten der von den Brunnen tatsächlich geförderten Stoffe zu beliebigen Zeitpunkten in der Vergangenheit interpretiert werden können. Das Verfahren wurde erstmals in SCHÄFER (2004) beschrieben und von der GCI seitdem mehrfach erfolgreich bei der Rückverfolgung von Grundwasserschadstoffen im Brunnenförderstrom eingesetzt. Das Verfahren hat gegenüber den zuvor beschriebenen den Vorteil, dass hier die tatsächlich im Brunnenförderstrom analysierten Konzentrationsganglinien in ihrer Dynamik Eingang in die Bewertung der Modellergebnisse finden. Die berechneten Lagewahrscheinlichkeiten können nur relativ zueinander und nicht in ihrer absoluten Höhe interpretiert werden. Die Abbildung 10 zeigt das Ergebnis dieser inversen Transportmodellierung anhand berechneter Lagewahrscheinlichkeiten der geförderten TOC exemplarisch zum Zeitpunkt Mai 1998. Die gelben Töne stehen dabei für Bereiche hoher Lagewahrscheinlichkeiten. Diese nehmen dem Farbverlauf folgend über grün nach

blau ab. Weiter außen liegende Bereiche weisen vernachlässigbare Lagewahrscheinlichkeiten auf. Damit werden die höchsten Wahrscheinlichkeiten für den Bereich dokumentiert, der im Zuge der oben beschriebenen Systemanalyse als der wahrscheinliche Zutrittsbereich ausgewiesen wurde. Durch beide zur Plausibilitätsprüfung herangezogene Verfahren konnte somit die Plausibilität der im Rahmen der geohydraulischen Systemanalyse ermittelten Ergebnisse bestätigt werden.

6 Umsetzung der Ergebnisse der Systemanalyse

Basierend auf den Ergebnissen wurden mit dem Grundwassermodell umfangreiche Bewirtschaftungsuntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden gemeinsam mit EWP typische, auch den Jahresgang der Förderung berücksichtigende Betriebsregime entwickelt, wobei auch die technologischen Randbedingungen der Zuleitung und Aufbereitung der Brunnenrohwsässer zu berücksichtigen waren. Für diese möglichen Betriebsvarianten wurde mit dem Modell die Entwicklung der TOC-Konzentrationen in den Brunnen berechnet und variantenübergreifend bewertet. Das letztlich zur Umset-

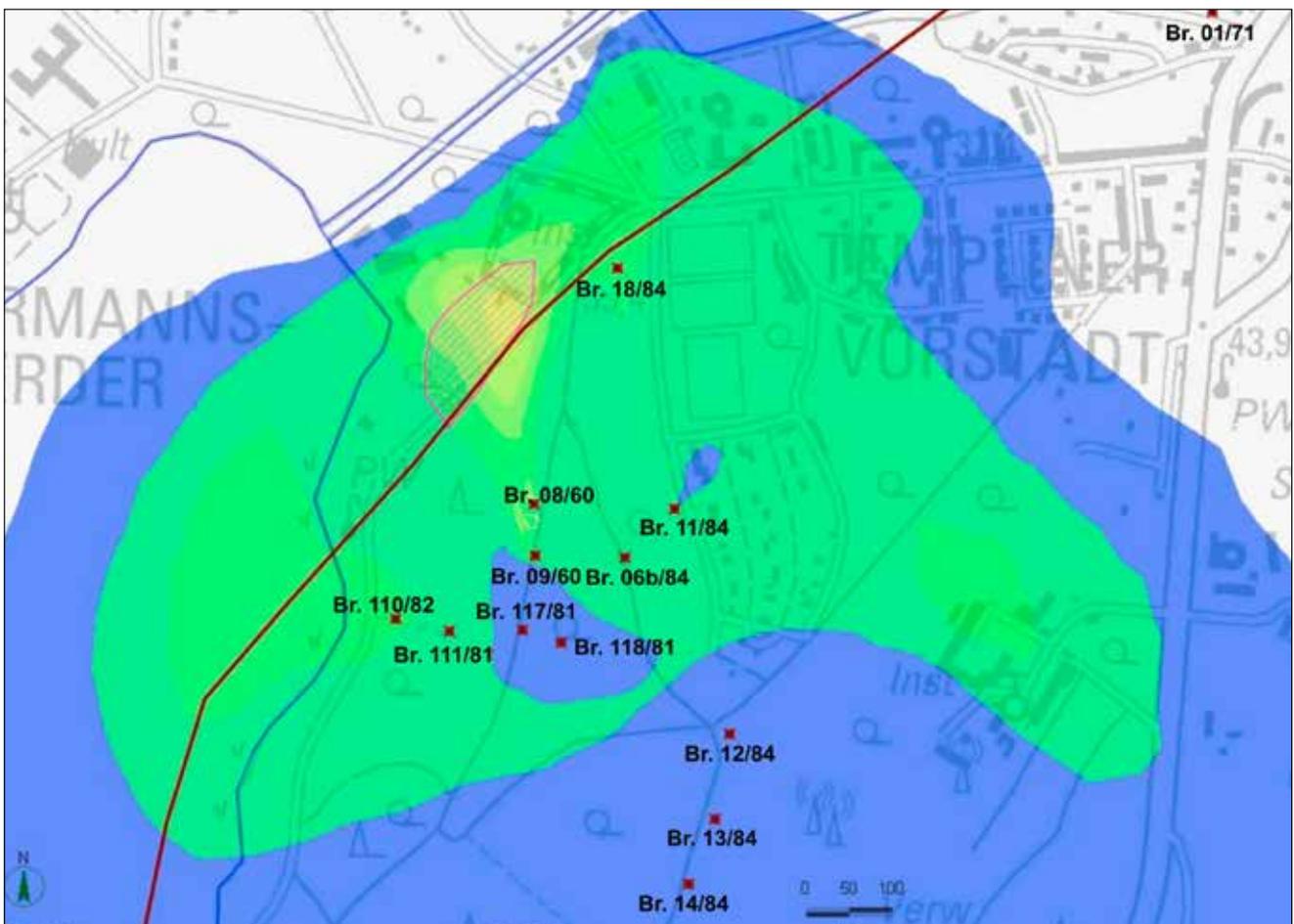


Abb. 10: Berechnete Lagewahrscheinlichkeiten der geförderten TOC im Mai 1998

Fig. 10: Simulated location probability of pumped TOC in May 1998

zung empfohlene Förderregime ist durch eine Separierung von hoch- und minderbeeinträchtigten Brunnenwässern gekennzeichnet. Dem entsprechend ist auch eine separate Aufbereitung der so klassifizierten Wässer vorgesehen. Für die Brunnen mit minderbelastet zu erwartenden Rohwässern konnte dabei im Vergleich zur Ausgangssituation ein deutlicher Rückgang der Huminstoffgehalte prognostiziert werden.

Die EWP hat die Förderempfehlungen mittlerweile umgesetzt und die mit Huminstoffen stark beeinflussten Brunnen bereits über eine eigene Rohwasserleitung erschlossen. Zusätzlich ist die separate Aufbereitung dieser Wässer mit weitergehenden Aufbereitungstechnologien in Vorbereitung. Hierzu werden u. a. in Zusammenarbeit mit dem TZW des DVGW Karlsruhe, Außenstelle Dresden, Aufbereitungsversuche durchgeführt, die im 2. Quartal 2017 abgeschlossen wurden.

Des Weiteren wurden Empfehlungen zur Anpassung des Grundwassermonitorings an die beschriebenen Untersuchungsergebnisse gegeben, die umgesetzt sind. Hierzu gehören sowohl der Bau neuer Grundwassermessstellen als auch die Anpassung des Beprobungs- bzw. Analyseprogramms.

Zusammenfassung

Mit dem Wasserwerk Potsdam-Leipziger Straße leistet die Energie und Wasser Potsdam GmbH einen wesentlichen Beitrag zur Wasserversorgung der Landeshauptstadt Potsdam. Bei der Bewirtschaftung des an der Havel gelegenen Wasserwerks ist der Zutritt von geogen salinarem Tiefenwasser besonders zu berücksichtigen. Das Tiefenwasser steigt aus einer unter der Havel verlaufenden pleistozänen Erosionsrinne auf und tritt in einem von der Brunnenbewirtschaftung abhängigen Umfang den Brunnen des Wasserwerks zu. Es beeinflusst die Rohwasserbeschaffenheit negativ durch seine hohe Salinität in Form von Natriumchlorid und begleitende Huminstoffgehalte, die stellenweise eine starke Trübung des Wassers hervorrufen.

Die sich aus einer detaillierten problembezogenen Analyse der Daten des Grundwassermonitorings ableitenden Tendenzen zur Herkunft der Huminstoffe wurden durch zeitlich und räumlich hochauflösende Berechnungen mit einem dichtegekoppelten Grundwassertransportmodell überprüft und präzisiert. Durch die Anwendung verschiedener Modellierungsmethoden konnte weitgehend übereinstimmend ein Areal am Rand der pleistozänen Rinne ausgewiesen werden, in dem neben dem hochsalinaren Tiefenwasser auch besonders intensiv Huminstoffe in den bewirtschafteten Grundwasserleiter eintreten. Durch die Modellierungen konnte ein tiefgreifendes Prozessverständnis bezüglich der Beeinflussung der Grundwasserströmungsverhältnisse durch die Brunnenbewirtschaftung gewonnen werden. Auf dessen Grundlage wurden Bewirtschaftungsregime empfohlen, deren bereits begonnene Umsetzung eine deutlich bessere Beherrschbarkeit der Salinar- und Huminstoffproblematik erwarten lassen als zuvor.

Summary

Energie und Wasser Potsdam GmbH supplies a substantial part of the regional capital Potsdam with water from the waterworks Potsdam-Leipziger-Straße. Management of the waterworks, which are located near the river Havel, needs to take influx of deep geogenic saline water into account. Deep water rises from a Pleistocene channel below the Havel. Quantity of saline deep water influx to the aquifer and with it negative impact on the wells depend on the amount and distribution of pumping. Deep water influx decreases raw water quality due to its high salinity and accompanying humic substances, which can muddy the groundwater considerably.

In the beginning of the study groundwater monitoring data were analyzed. Resulting trends and hypotheses regarding the source of humic substances were tested and rendered more precisely in instationary density-coupled simulations with a 3D groundwater model. Several modelling methods were used to identify influx zones of deep water to the managed aquifer. An area on the edge of the Pleistocene channel, where saline water and humic substances enter the aquifer, was finally identified in agreement with the results of the different methods. Modelling helped to gain profound knowledge and to explain how pumping affects groundwater flow in the system. A new pumping distribution was derived from the recent insights. The new management strategy regarding the wells at the waterworks has already been implemented. The recent situation looks very promising and shows that the influx of saline water and humic substances can be managed better with these new measures.

Literatur:

- BORRNMANN, K. & B. WRICKE (2010): Ergebnisbericht über den Zeitraum 07/2010 bis 12/2010 im Wasserwerk Potsdam Leipziger Str. durchgeführten Versuche zur Stabilisierung des Filterbetriebs. – 21 S., DVGW-Technologiezentrum Wasser Karlsruhe, Außenstelle Dresden im Auftrag der EWP Dresden (unveröff.)
- DIRSCH, H.-J., G. (2014): Feflow – Finite Element Modeling of Flow, Mass and heat Transport in Porous and Fractured Media. – 996 S., Berlin-Heidelberg (Springer)
- 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
- SCHÄFER, D. (2004): Durchführung von Modellrechnungen zur Optimierung des Grundwassermonitorings bezüglich einer LCKW-Kontamination in Berlin-Spandau. – Tagungsbericht zur 6. Fachtagung „Graphik-gestützte Grundwassermodellierung“ Köln 2004, S. 33–46, Berlin, Magdeburg(WASY GmbH / IWU e.V.)

SCHÄFER, D., DINSE-HÖFIG, A., BREMER A., HECHT, A. & A. SELICKO (2005): Hydrogeologisches Gutachten - Bewirtschaftungsuntersuchungen zur Beherrschung der Salzproblematik im Rohwasser des Wasserwerks Potsdam Leipziger Str. – 77 S., GCI GmbH im Auftrag der EWP, Königs Wusterhausen (unveröff.)

Anschrift der Autoren:

Dr.-Ing. Dietmar Schäfer
Dipl. Geogr./ Hydrol. Silvia Dinse
GCI GmbH
Bahnhofstr. 19
15711 Königs Wusterhausen
dietmar.schaefer@gci-kw.de
silvia.dinse@gci-kw.de

Dipl.-Hydr. Karsten Zühlke
Energie und Wasser Potsdam GmbH
Steinstr. 101
14480 Potsdam
karsten.zuehlke@ewp-potsdam.de

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 salinärer 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 Lagepunkt-konzept 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 salinärer 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 (Hauptinhaltsstoffe) des Grundwassers (GW) im Lockergestein des norddeutschen Tieflandes (siehe BROSE & HERMSDORF in diesem Band) werden in GEBAH die Berechnungssalze $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 , CaCl_2 , $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, 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 grundwasser-genetischen 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 VALJAŠKO-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 Analysefehler 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 VALJAŠKO-Lagepunkt LP (VALJAŠKO 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 VALJAŠKO-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 $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. 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 VALJAŠKO 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 salinärer Tiefenwässer und eine Aktivierung von latenten Salzwasseraufstiegsbahnen besonders gefährdet.

Durch die indirekte Erfassung der schwerlöslichen Salze, insbesondere des in pleistozän geprägten Sedimenten dominanten $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ergibt sich für das Süßwasserstockwerk allerdings eine nur eingeschränkte direkte

Vergleichbarkeit der Lagepunkte der geochemischen Typen im VALJAŠKO-Diagramm. Weiterhin werden die grundwassergenetisch wichtigen Kalium-Salze nicht dargestellt. Aus diesem Grund wurde als Ergebnis langjähriger hydrogeochemisch-genetischer Bewertungen das Lagepunkt-konzept nach VALJAŠKO 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 Ausfällen von Kaliumchlorid (KCl) im Sylvian-Stadium unterliegen. Es wird durch andere genetische Indikatoren präzisiert, aber auch ohne Einbeziehung dieser Koeffizienten ist eine erste orientierende Beurteilung zum Einfluss salinärer Wässer in den untersuchten GWL und Oberflächengewässern möglich, wenn nur das Basisverhältnis des GGV zu Grunde gelegt wird. Es wird beschrieben mit dem Koeffizienten: $\text{KCl} (\%) / \text{NaCl} (\%)$. Im Programm GEBAH wird das komplexe GGV verwendet:

$$\sum \text{K-Salze} (\%) / (\text{NaCl} + \text{NaBr} + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{FeCl}_2) (\%)$$

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 salinärer 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 salinärer 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)

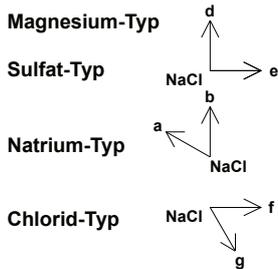


Bereich salinärer Wässer ohne prägende Anteile des Halit-Salinars



Nichtsalinare Wässer mit geogener und/oder anthropogener Prägung

LP-Koordinaten [○] nach VALJAŠKO (1961)



(Klassifikation LP wie GGV)

GGV-Klassifikation [×] nach RECHLIN (2008)

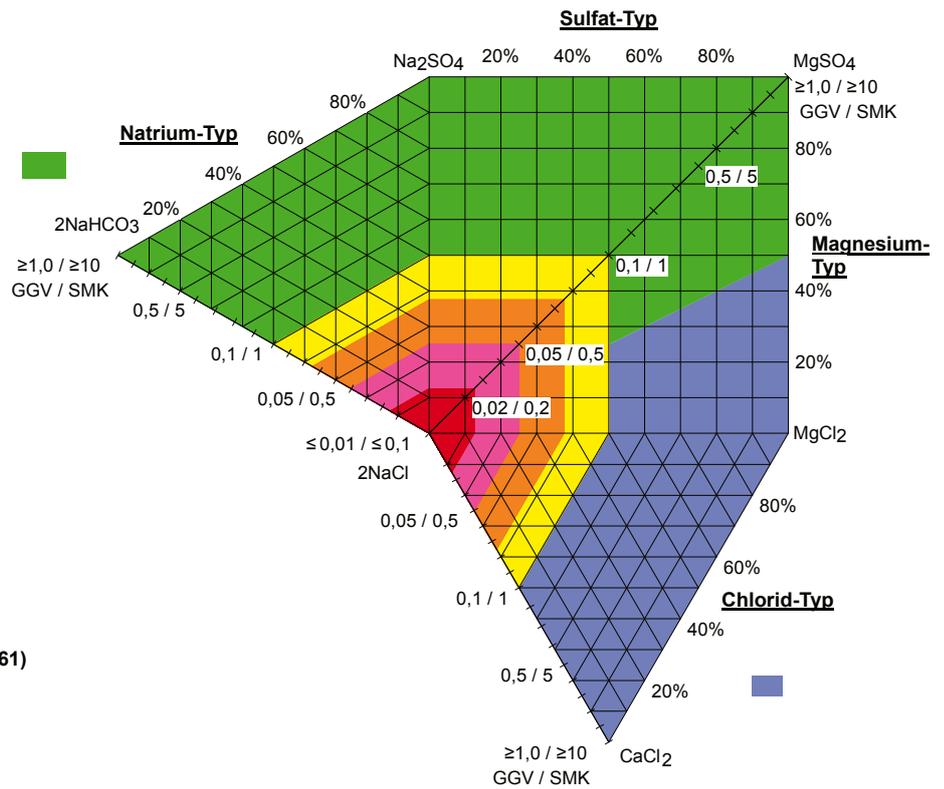
$$GGV = \sum \text{K-Salze} / \text{NaCl} + \text{NaBr} + \text{NH}_4\text{Cl} + \text{FeCl}_2$$

- ≥ 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

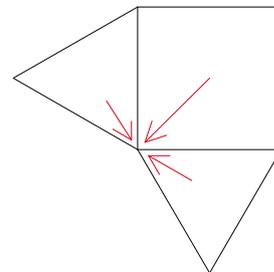
SMK-Klassifikation [□] nach RECHLIN (2008)

$$SMK = \frac{\text{NaHCO}_3 + \text{MgSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2 + \text{K-Salze} + \text{NH}_4\text{-Salze} + \text{NO}_3\text{-Salze}}{\text{CaCl}_2 + \text{NaCl} + \text{NaBr}}$$

- > 1 nicht salinar ■ ■ ≤ 1 salinar ■ ■ ■ ■



Richtung der Zunahme des Eintrags von salinären 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 Lageverhältnisse 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 saline 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 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 und $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, 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 $\text{SMK} \leq 1$ und auch das $\text{GGV} < 0,1$. Die „Süßwassersalze“ werden mit den das Salzwasserstockwerk charakterisierenden Salzen CaCl_2 , NaCl und NaBr in Beziehung gesetzt:

$$\text{SMK} = \frac{\text{NaHCO}_3 + \text{MgSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{MgCl}_2 + \text{K-Salze} + \text{NH}_4\text{-Salze} + \text{NO}_3\text{-Salze} (\%)}{\text{CaCl}_2 + \text{NaCl} + \text{NaBr} (\%)} > 1 \text{ nicht salinar}$$

$$\leq 1 \text{ salinar}$$

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-salinärer 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 Straßenlaugung.

Im Diagramm erfolgt ebenfalls an der Grenze $\text{SMK} \leq 1/ > 1$ 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 salinärer Stoffeintrag aus geogener und/oder anthropogener Ursache geht i. d. R. mit einem prozentualen Anteil von $\text{NaCl} > 15\%$ 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 VALJAŠKO verbunden ist, kann mit seiner Hilfe die Süßwasserkomponente besser spezifiziert werden, d. h. bei Testpumpversuchen oder Zeitreihenuntersuchungen von Analysen die Zuspeisung nicht salinärer 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 VALJAŠKO-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 salinärer 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 salinärer bzw. nichtsalinärer 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 salinärer 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 ($\text{Cl}^- < 10 \text{ mg/l}$), 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 Intrusionsföhne 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 salinärer Wässer sehr viel früher als bei alleiniger Betrachtung der Cl^- -Konzentration und/oder des VALJAŠKO-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 VALJAŠKO 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 nichtsalinärer 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 Förderleis-

tung 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 $\text{GGV} < 0,1$ durch den $\text{SMK} > 1,0$ bei vorliegender Kalium-Sorption infolge längerer Verweilzeiten im salinar unbeeinflussten GWL.

2.6 Anwesenheit salinärer Wässer vom Halit-Typ

In GEBAH wird die Anwesenheit salinärer 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,

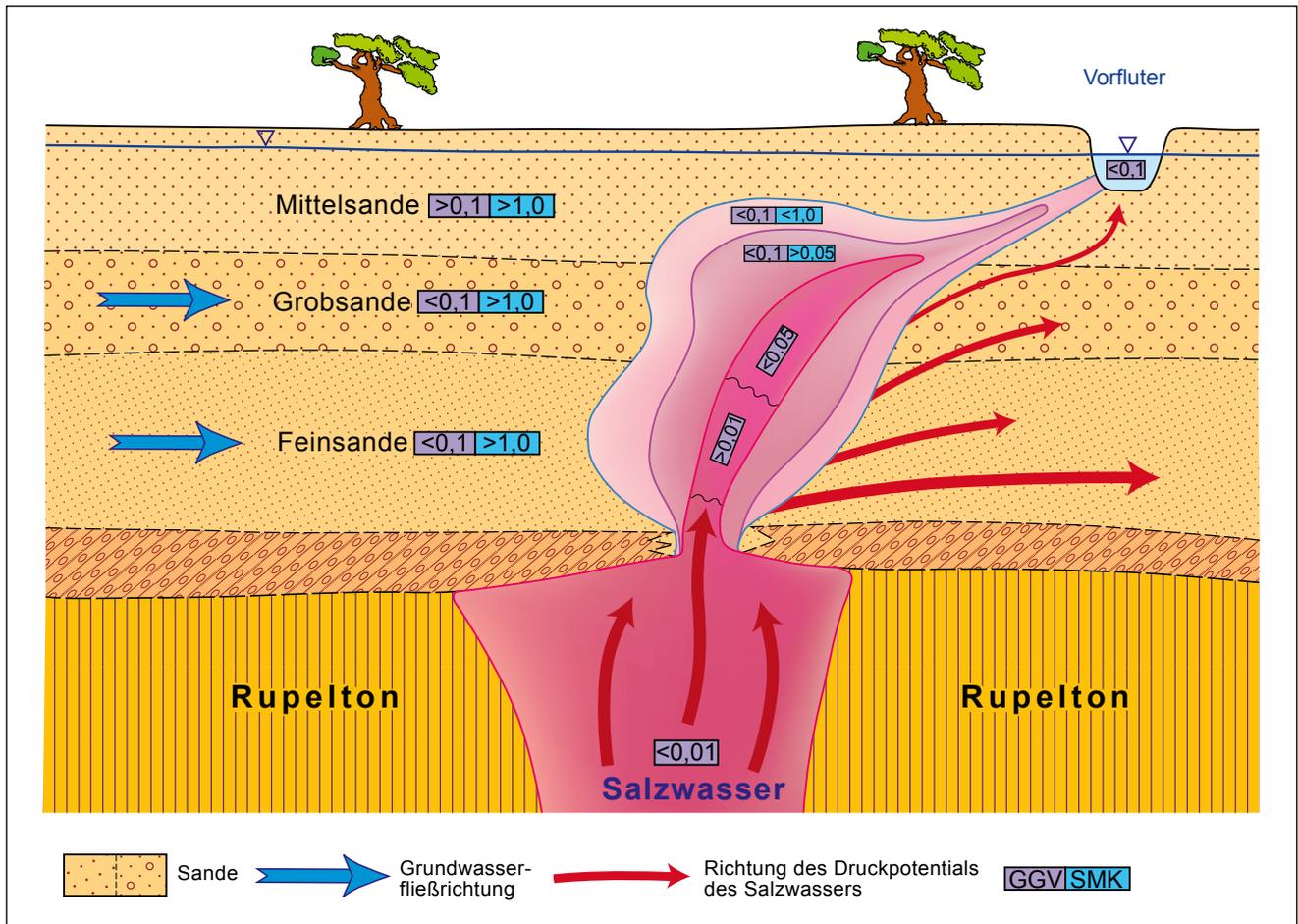


Abb. 2: Idealisierte Ausbildung einer Salzfahne in einem Süßwasser führenden Grundwasserleiter und Schematisierung mit Genetischem Grundverhältnis (GGV) und Salinarem Matrix Koeffizienten (SMK) (RECHLIN in RECHLIN et al. 2010)

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
$\geq 0,1$	diffus	ohne
$< 0,1 \geq 0,075$	diffus-migrierend	gering
$< 0,075 \geq 0,05$	migrierend	mittel
$< 0,05 \geq 0,025$	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 ($GGV < 0,1 \geq 0,1$) 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 isopenphysikalische Untersuchungen näher untersucht. 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 Analysergebnisse vom Trink- und Abwasserverband Lindow-Gransee übermittelt) dargestellt.

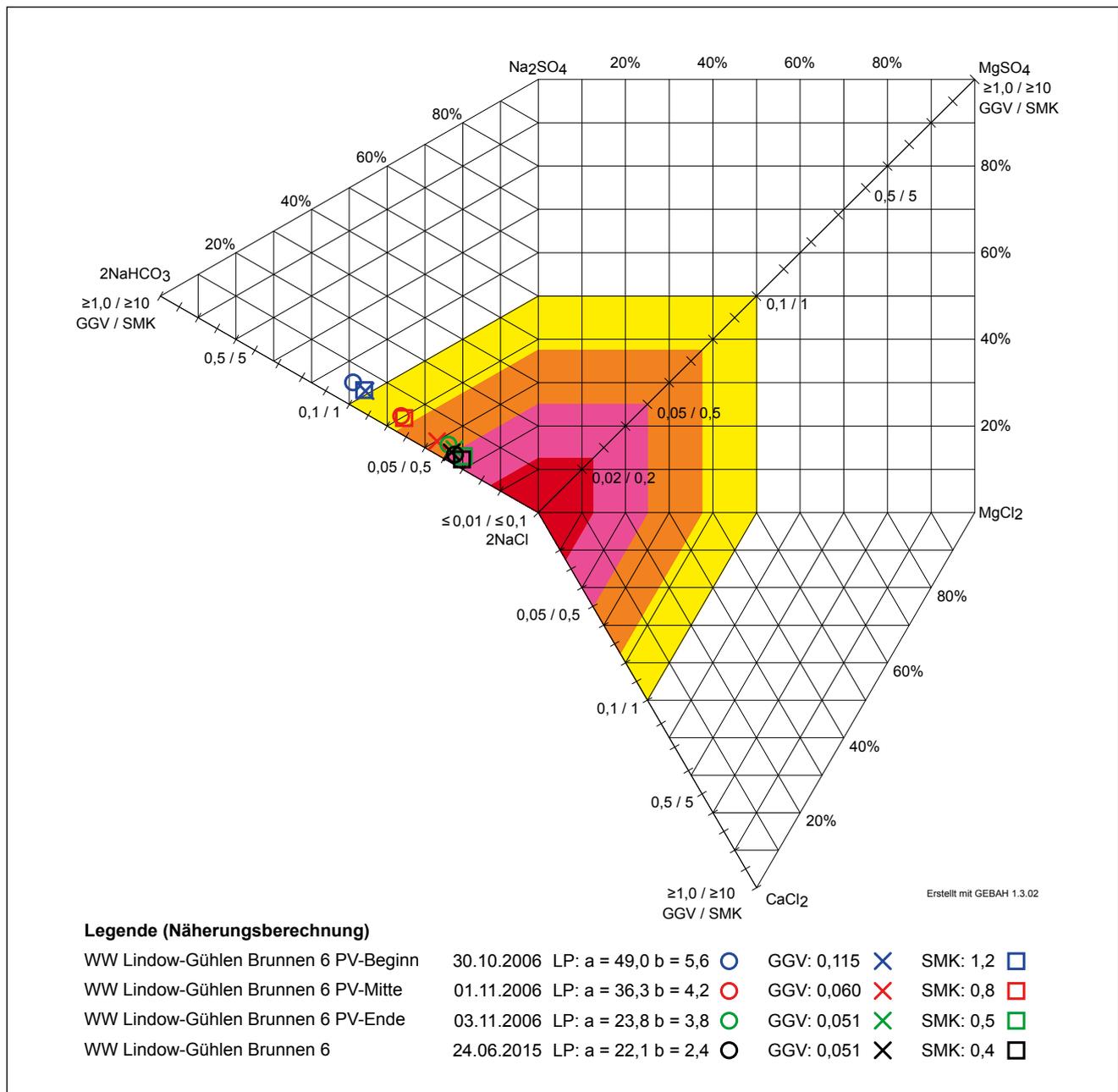


Abb. 3: Wasserwerk (WW) Lindow-Gühlen Förderbrunnen 6, genetische Bewertung mit GEBAH
GGV = Genetisches Grundverhältnis; SMK = Salinar Matrix Koeffizient; LP = Lagepunkt; PV = Pumpversuch
Fig. 3: Extraction well number 6 at the waterworks Lindow-Gühlen, the genetic assessment with GEBAH

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-salinärer 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 salinärer Tiefenwässer hin. Für die Einstellung der Brunnenfährweise (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 saline 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 $\text{GGV} < 0,05$) 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; $\text{GGV} \leq 0,011$, $\text{SMK} \leq 0,3$, 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 überwachtungswürdig.

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 ($\text{GGV} > 0,1$, $\text{SMK} \gg 1$) identifiziert (siehe Abb. 6). Durch die Isotopenuntersuchungen wurde der Anteil der alten Grundwasserneubildungen (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 saline 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]

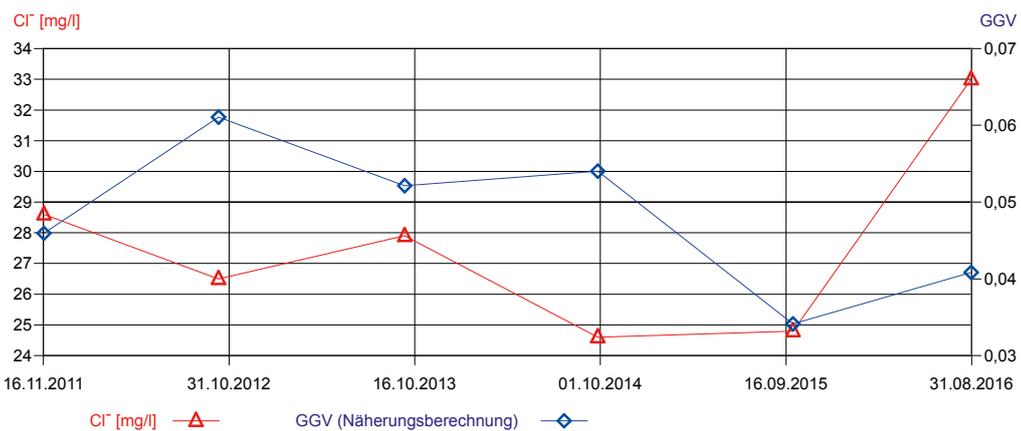
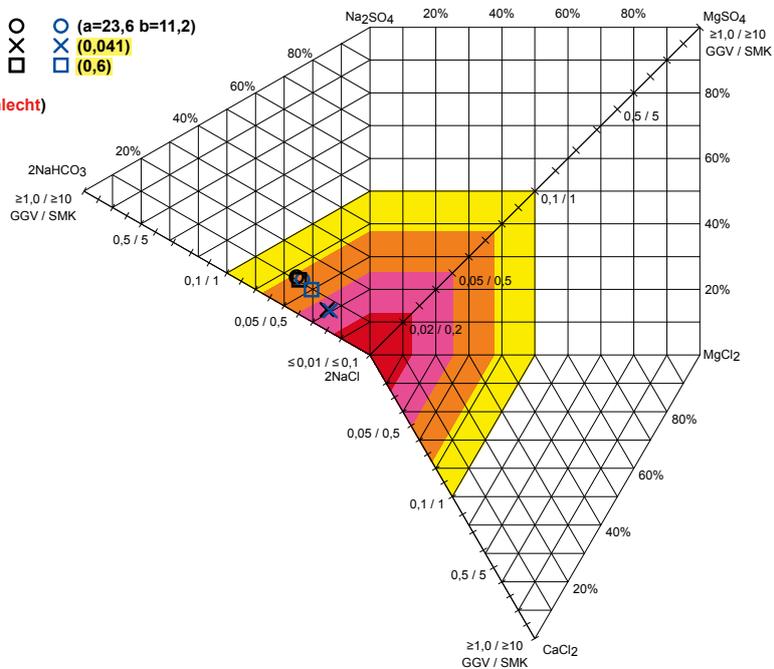
Legende
 Lagepunkt Analyse / Näherung: (a=25,7 b=10,9) ○ (a=23,6 b=11,2)
 Lagepunkt GGV / Näherung: (0,043) × (0,041)
 Lagepunkt SMK / Näherung: (0,7) □ (0,6)
 Bewertung ges. Analyse: mäßig
 Bewertungen (Farbe): (gut, mäßig, schlecht)

Bilanz
 Mineralisation: 225,045 mg/l (5,22 mmol/l)
 Ionenbilanz: -0,583 mmol/l (eq) -1,9088%
 (DVVK 128/1992)

Originalanalyse		
Anionen	[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

Originalanalyse		
Kationen	[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
Mg(HCO3)2	10,63/10,62	MgSO4	0,000/0,000	MgCl2	0,000/0,000
NaHCO3	12,48/10,94	Na2SO4	5,309/5,206	NaCl	27,35/28,97
KHCO3	0,000/0,000	K2SO4	0,000/0,000	KCl	1,188/1,188
NH4HCO3	0,000/0,000	(NH4)2SO4	0,000/0,000	NH4Cl	0,354/0,095
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-salinärer Wässer vom Halit-Typ: ja
 Intrusionspotenzial geogen-salinärer 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

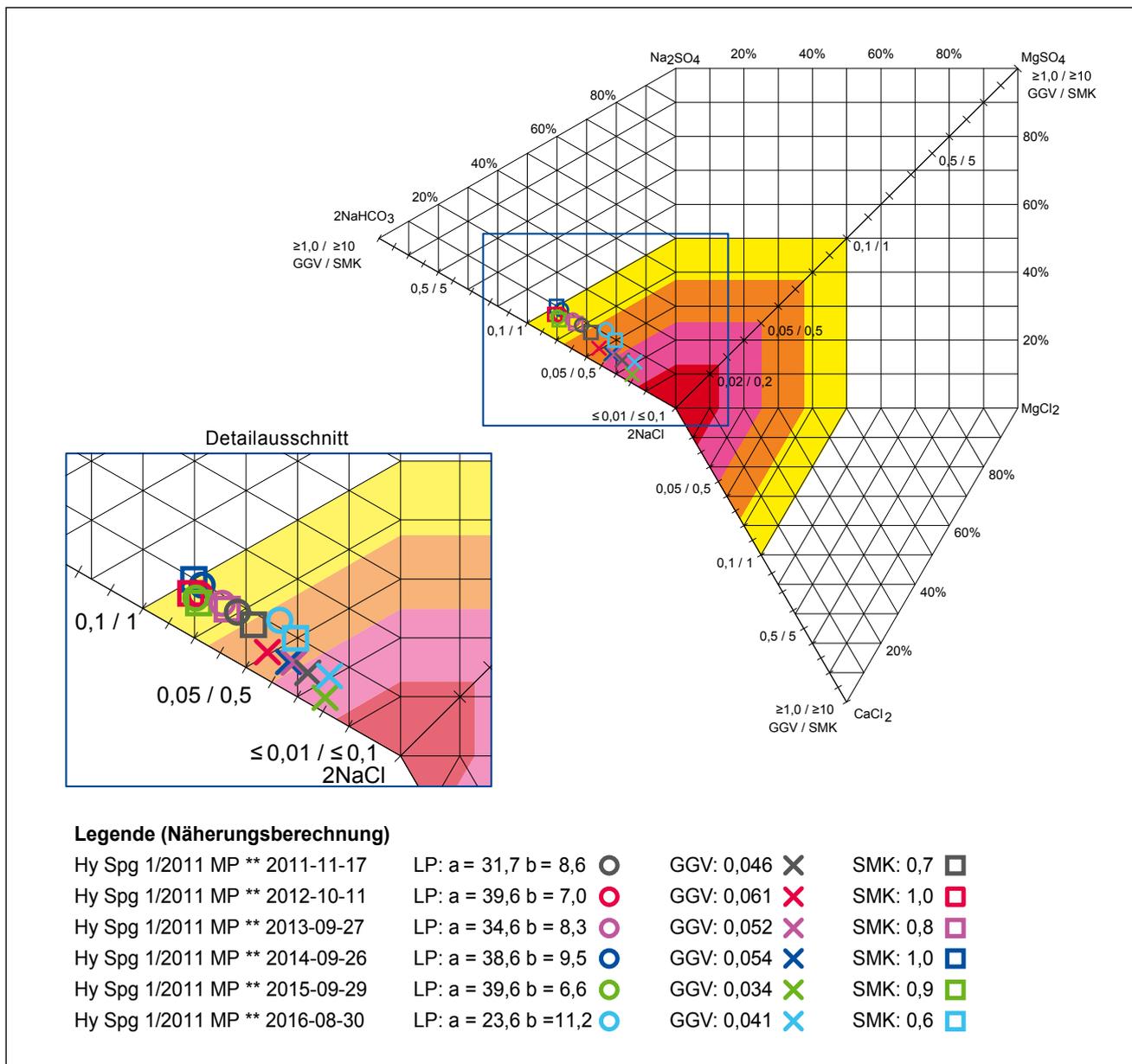


Abb. 5: Grundwassermessstelle Spreenhagen Mittelpegel (MP; Gesamtbild), genetische Bewertung mit GEBAH
 GGV = Genetisches Grundverhältnis; SMK = Salinar Matrix Koeffizient; LP = Lagepunkt
 Fig. 5: Monitoring well Spreenhagen MP (general view), the genetic assessment with GEBAH

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 Analyseergebnis 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

Auswertung nach dem Genesemodell Hy Bbc 1/2012 OP ** 2015-09-30

Beschreibung: F 29,0-33,0 m u. GOK
 Probenahmedatum: 30.09.2015 Labor: LLB
 Vorortparameter: pH: 7,5; Lf: 424 [$\mu\text{S}/\text{cm}$];
 Organische Parameter: DOC: 6,9 [mg/l]; UV254: 40,4 [$1/\text{m}$]

Legende

Lagepunkt Analyse / Näherung: (a=41,3 b=30,6) ○ ○ (a=43,1 b=29,7)
 Lagepunkt GGV / Näherung: (0,118) ✕ ✕ (0,138)
 Lagepunkt SMK / Näherung: (5,3) □ □ (7,3)
 Bewertung ges. Analyse: mäßig
 Bewertungen (Farbe): (gut, mäßig, schlecht)

Bilanz

Mineralisation: 368,524 mg/l (7,39 mmol/l)
 Ionenbilanz: 0,0694 mmol/l (eq) 1,4754%
 (DVWK 128/1992)

Originalanalyse	
Anionen	[mg/l] [mmol/l (eq)]
HCO ₃	242,00 3,9688
SO ₄	17,100 0,3557
Cl	11,600 0,3271
Br	<0,100 0,0006
NO ₃	0,9100 0,0147
B	0,0970 0,0269
I	0,0000 0,0000
NO ₂	<0,030 0,0003
PO ₄	<0,020 0,0003

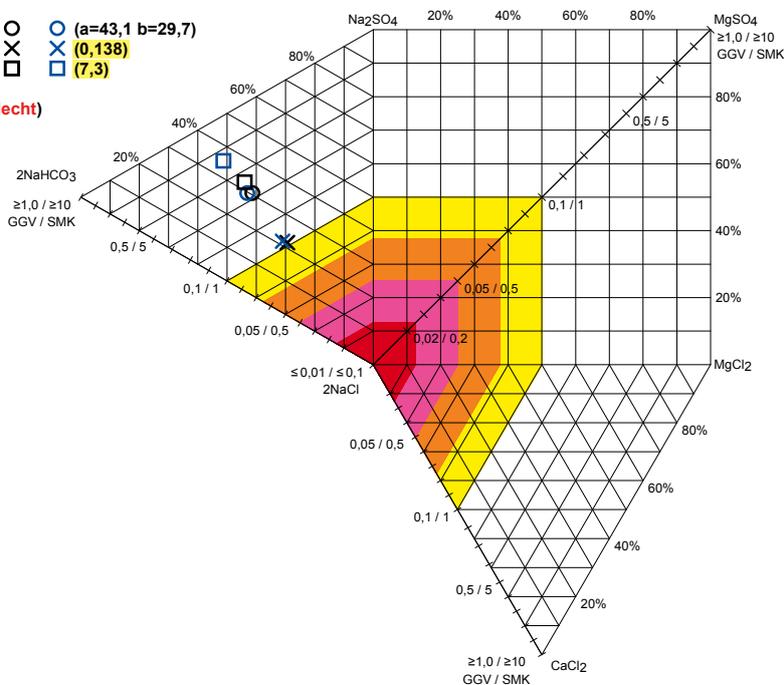
Originalanalyse	
Kationen	[mg/l] [mmol/l (eq)]
Ca	61,500 3,0689
Mg	5,1000 0,4192
Na	23,100 1,0049
K	1,3000 0,0333
NH ₄	0,4400 0,0244
Ba	0,0440 0,0006
Mn gel.	0,2060 0,0075
Mn ges.	0,2070 0,0075
Fe gel.	4,9770 0,1782
Fe ges.	4,9790 0,1782
Al	0,0000 0,0000
Zn	0,0000 0,0000

Berechnungssalze [%] - Originalanalyse / Näherung

Ca(HCO ₃) ₂	67,43/67,32	CaSO ₄	0,000/0,000	CaCl ₂	0,000/0,000	Ca(NO ₃) ₂	0,000/0,000	CaBr ₂	0,000/0,000
Mg(HCO ₃) ₂	9,211/9,242	MgSO ₄	0,000/0,000	MgCl ₂	0,000/0,000	Mg(NO ₃) ₂	0,000/0,000	MgBr ₂	0,000/0,000
NaHCO ₃	10,56/11,45	Na ₂ SO ₄	7,815/7,888	NaCl	3,701/2,813	NaNO ₃	0,000/0,000	NaBr	0,014/0,014
KHCO ₃	0,000/0,000	K ₂ SO ₄	0,000/0,000	KCl	0,731/0,734	KNO ₃	0,000/0,000	KBr	0,000/0,000
NH ₄ HCO ₃	0,000/0,000	(NH ₄) ₂ SO ₄	0,000/0,000	NH ₄ Cl	0,539/0,537	NH ₄ NO ₃	0,000/0,000	NH ₄ Br	0,000/0,000
Karbonate	87,20/88,01	Sulfate	7,815/7,888	Chloride	4,971/4,084	Nitrate	0,000/0,000	Bromide	0,014/0,014

Orientierungen zum Salinar

Anwesenheit geogen-salinärer Wässer vom Halit-Typ: nein
 Intrusionspotenzial geogen-salinärer Wässer vom Halit-Typ: ohne
 Eignung der Messstelle für ein Salinarmonitoring: bedingt geeignet



Erstellt mit GEBAH 1.3.02

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 isotonenphysikalischen 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)

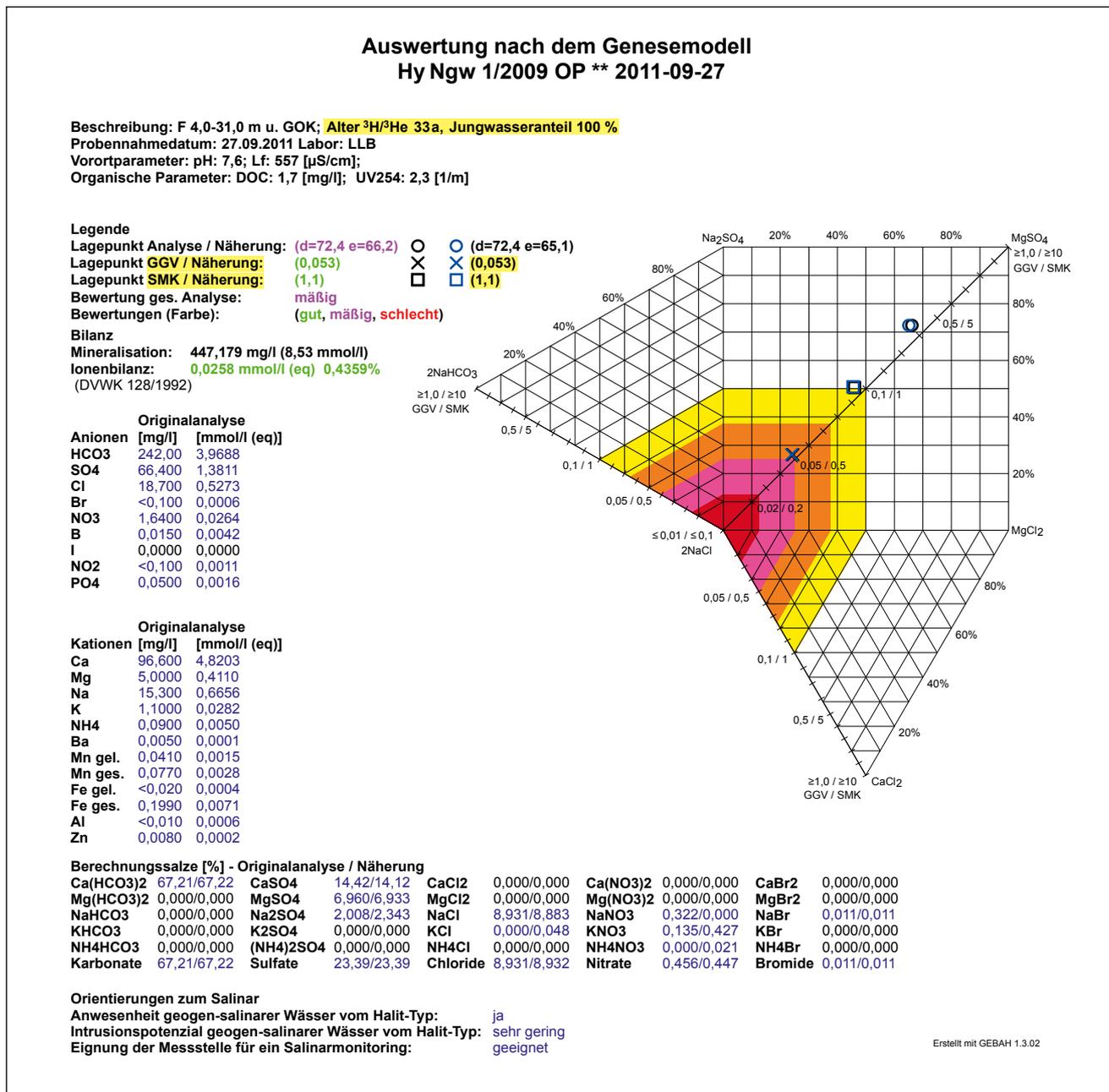


Abb. 7: Grundwassermessstelle Neuglobsow Oberpegel (OP; 2011), genetische Bewertung mit GEBAH
 Fig. 7: Monitoring well Neuglobsow OP (2011), the genetic assessment with GEBAH

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 salinärer 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 Flattow) 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 salinärer 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-salinärer 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 salinären 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 (VALJAŠKO 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

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 83–101	12 Abb., 12 Tab., 6 Zit.
------------------------------	---------	----------------	-----------	--------------------------

Altersdatierung mittels Isotopenanalytik zur Verweilzeitbestimmung und Identifizierung von Speisungsanteilen des Grundwassers in Brandenburg

Isotope age dating for residence time estimation and identification of different groundwater influx portions in fresh water aquifers of Brandenburg

FALK BEDNORZ & DIETMAR BROSE

1 Einleitung

Die Nutzung isopenhydrogeologischer Methoden in der Hydrogeologie auf dem Territorium des Landes Brandenburg begann mit lokalen Untersuchungen Anfang der 1970er Jahre. Diese wurden vordergründig von der Bergakademie Freiberg und dem Zentralinstitut für Isotopen- und Strahlungsforschung durchgeführt.

Das Ziel dieser Arbeiten bestand in der alterstruktuellen Zuordnung der Grundwässer, der Entwicklungsverfolgung der durch Atombombentests stark angestiegenen Tritium (^3H)- und Kohlenstoff-14 (^{14}C)-Inputs im Grundwasser und der Geschützteitsbewertung von Grundwasserlagerstätten.

So wurde z. B. das Wasserwerk (WW) Tettau (Südbrandenburg) langjährig von 1972 bis 1991 dahingehend in unregelmäßigen Abständen untersucht.

Großräumigere Untersuchungen gab es im Zusammenhang mit Braunkohleerkundungen im Raum Fürstenwalde Südost (TRETTIN 1997), in zahlreichen Wasserwerken des ehemaligen Bezirkes Cottbus (BEDNORZ 1992) und in sogenannten lokalen Polygonfeldern, die im Rahmen der Grundwasserbeschaffenheitsanalyse der DDR (unfertig abgebrochen) betrachtet wurden.

Die Analytik beschränkte sich damals im Wesentlichen auf Tritium, Kohlenstoff-13/14 ($^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$) und vereinzelt Deuterium/Sauerstoff-18 ($\text{D}/^{18}\text{O}$).

Mitte der 1990er Jahre gab es erste Versuche des Landesamtes für Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LGRB) und seit 2004 des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) die isopenhydrogeologischen Methoden zur Verifizierung des im LBGR entwickelten Genesemodells (Software GEBAH) heranzuziehen. Seit 2002 werden nun jährlich meist unterschiedliche Brunnen, Grundwassermessstellen (GWM) und vereinzelt Oberflächengewässer untersucht, um die Aussagen des Genesemodells zu prüfen und bezüglich des Alters bzw. der Verweilzeit des Grundwassers und dessen Speisungsbedingungen zu untersetzen. Dabei wurde das Beprobungs- und Analyseprogramm um die Edelgase Helium-3/Helium-4 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) und aktuell auch um Schwefel-34 (^{34}S) erweitert.

Für die Isotopenanalytik wurden das Labor für Umweltisotope des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung GmbH Halle, das Institut für Umweltphysik der Universität Bremen und in Einzelfällen die Hydroisotop GmbH Schweitenkirchen einbezogen.

Von den in Abbildung 1 dargestellten Untersuchungsstandorten werden die markierten in diesem Beitrag erläutert.

In der Kombination von ^3H , $^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$, $\text{D}/^{18}\text{O}$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ und teilweise ^{34}S ist es nun auch möglich, Mischwässer aus neubildungsgeprägten jungen und alten gegebenenfalls salinar geprägten Wässern zu identifizieren. Insbesondere bei der Differenzierung von anthropogenen und geogenen Salzquellen liefert die Methode wertvolle Ergebnisse.

Eine Gegenüberstellung und Erläuterung der isopenphysikalischen mit den hydrogeochemisch-genetischen Befunden erfolgt anhand von Beispielen ausgewählter WW und GWM, in denen mittels GEBAH Speisungsanteile salinärer Tiefenwässer identifiziert wurden. Aber auch bei der Diagnostizierung von Wässern, die der reinen Grundwasserneubildung (GWN) ohne salinare Liegendspeisung unterliegen, konnte in Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen Ergebnisse mit den Isotopendaten eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden. Dies soll an Beispielen der GWM mit Mehrfachausbau verdeutlicht werden.

Nur kurz wird die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der Analysenergebnisse mit GEBAH dargestellt. Die ausführliche Beschreibung der GEBAH-Klassifikation erfolgt im Beitrag von D. BROSE in diesem Band.

2 Isopenhydrogeologische Methodik

Bei den isopenhydrogeologischen Untersuchungsmethoden spielen stabile und radioaktive Isotope gleichermaßen eine Rolle. Dabei werden Unterschiede in der Isopen-Output-Konzentration bzw. -Aktivität in Grundwässern bewertet. Diese werden in Abhängigkeit von Ort, Zeit und Intensität des Eintritts in die Hydrosphäre und von Zerfalls- und Wechselwirkungsprozessen betrachtet (siehe Abb. 2).



Abb. 1: Standorte der Untersuchungen im Land Brandenburg; Nummer 1–6 im Text vorgestellte Standorte
 Fig. 1: Investigation sites, 1–6 are discussed in paper

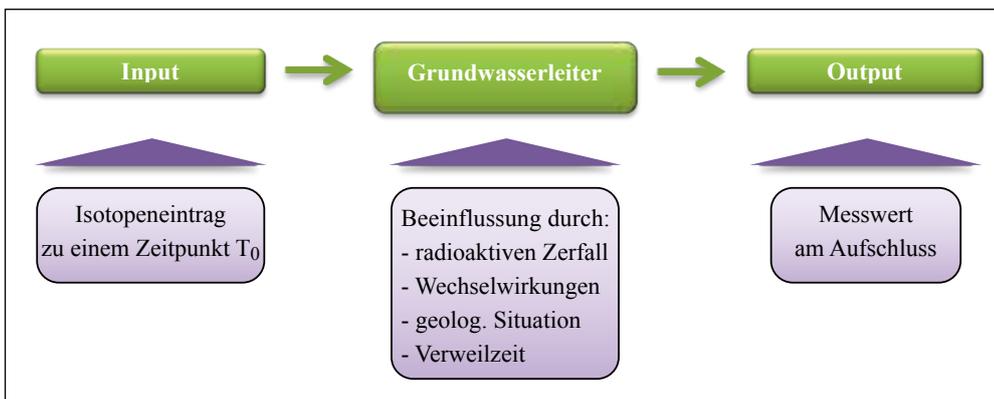


Abb. 2: Grundschemata zur Auswertung isotopehydrogeologischer Daten

Fig. 2: Basic scheme for assessment of isotope data in hydrogeology

Insbesondere die wassermolekül-internen Isotope ^3H , ^2H (D) sowie ^{18}O aber auch die He-Isotope sind dabei ideale Tracer, da sie die Bewegung des Wassers an sich nachvollziehen und die Möglichkeit bieten, eine maximale potentielle Stoffmigration zu simulieren, da sie:

- der Bewegung des Wassers folgen,
- nicht durch irreversible Sorption und durch physikalische, chemische und biologische Vorgänge fixiert werden,
- nicht die physikalischen Eigenschaften des Wassers verändern,
- eine genügend lange Lebensdauer haben und
- auch in großer Verdünnung nachweisbar sind.

3 Kurzcharakteristik der analysierten Isotope

3.1 Tritium

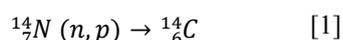
^3H hat eine Halbwertszeit von 12,43 a. Es zerfällt unter Abgabe von β -Strahlen in das stabile ^3He . Die Tritium-Aktivität wird in T. E. (Tritium-Einheiten) oder T. R. (tritium ratio) angegeben (1 T. E. = 0,12 Bq/kg Wasser). Für die isoplenhydrogeologische Bewertung spielen zwei genetische Ursachen eine Rolle:

1. der **natürlich-kosmogene Eintrag** mit einem Jahresmittel von ca. 5 T. E. ^3H entsteht vorwiegend in den oberen atmosphärischen Schichten durch die Einwirkung von Neutronen auf Stickstoff-14-Atome. Nach der Oxydation zu Tritiumoxid gelangt ^3H zu 90 % in die Hydrosphäre. Im Wassermolekül folgt es der Bewegung der atmosphärischen Feuchtigkeit.
2. der **anthropogen verursachte ^3H -Eintrag** durch vorwiegend überirdische Kernwaffentests seit 1953 und durch Kernkraftwerke/Aufbereitungsanlagen. Im Zusammenhang mit den Atomtests stieg die durchschnittliche Tritium-Aktivität im Niederschlag um das 1 000fache und bildet somit die eigentliche Grundlage für die Anwendung in der hydrogeologischen Untersuchungsmethodik.

Seit 1963 nimmt die Tritium-Aktivität im Zusammenhang mit dem Teststoppabkommen für oberirdische Atomtests wieder ab. Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass der Aktivitätslevel den ursprünglichen Stand aufgrund von vorhin genannten Kernkraftwerken und Aufbereitungsanlagen erreichen wird. Die Differenz wird jedoch zunehmend geringer und es steigen die Ansprüche an den laborativen Nachweis und die Interpretation.

3.2 Kohlenstoff-14

^{14}C ist ebenfalls ein Radionuklid und entsteht durch das Einfangen thermischer Neutronen durch das Isotop ^{14}N .



Als Maß der spezifischen ^{14}C -Aktivität ist die Bezeichnung „%-modern = pmc“ gebräuchlich. Dabei entsprechen 100 %-modern der spezifischen ^{14}C -Aktivität in Holz von 1950 mit 0,226 Bq/g Kohlenstoff. Im Gegensatz zu ^3H wurde die ^{14}C -Aktivität im atmosphärischen Kohlendioxid (CO_2) und damit auch im Pflanzen- und Boden- CO_2 durch Atomtests lediglich verdoppelt. 1964 lag die ^{14}C -Aktivität in der Atmosphäre somit bei 200 %-modern. ^{14}C besitzt eine Halbwertszeit von 5 730 a und ist für Altersbestimmungen zwischen 1 000 bis max. 70 000 a geeignet. In Korrelation der vorliegenden Befunde zur Altersdatierung mit den geologischen Lagerungsverhältnissen sind in Brandenburg plausible Ergebnisse überwiegend mit ^{14}C -Anfangsgehalten von 55–65 pmc und nur vereinzelt bis 85 pmc ableitbar. Bei Wechselwirkungen mit Braunkohle führenden Schichten und Anteilen toten Kohlenstoffs (C) können die Anfangsgehalte jedoch verfälscht sein.

3.3 Kohlenstoff-13

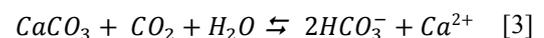
^{13}C ist ein stabiles Isotop und im natürlichen C zu 1,12 % enthalten. Es wird durch die Größe $\delta^{13}\text{C}$ charakterisiert [2]. Als Standard gilt dabei das CO_2 des PDB (= Belemnella-Standard aus der PeeDee Belemnite limestone formation South Carolina). Die Messung erfolgt massenspektrometrisch und der Messwert wird am Standard verglichen.

$$\delta = \frac{R_F + R_S}{R_S} \times 1\,000 \text{ ‰} \quad [2]$$

R_F = Isotopenverhältnis der Probe

R_S = Isotopenverhältnis des Standards

Durch eine Reihe von Isotopieeffekten sind bei einer isoplenhydrogeologischen Auswertung die verschiedenen natürlichen Variationsbereiche von ^{13}C in den beteiligten Teilreservoirs des Kohlenstoffkreislaufes nutzbar, wobei innerhalb des Systems bei Milieu ändernden Faktoren (z. B. Kalklösung aus dem Gestein [3])



der ^{13}C -Wert verschoben wird. ^{13}C spielt ebenfalls bei der Ermittlung der ^{14}C -Anfangsgehalte eine Rolle.

3.4 Helium-Isotope

Im Vergleich zur alleinigen Datierung des Grundwassers mit ^3H lassen sich zusammen mit dessen Tochternuklid ^3He belastbarere Ergebnisse erzielen.

Da die Bestimmung und Auswertung von ^3H -Analysen insbesondere von Erstmalsbeprobungen zunehmend Unsicherheiten unterliegt, wird seit 2003 das Zerfallsprodukt ^3He einbezogen. Damit lässt sich eine genauere Datierung des Grundwassers als bisher bis zurück in die 1950er Jahre durchführen.

Die Methode funktioniert auf Grundlage des Piston-Flow-Modells, das sich für die in den vergangenen Jahren beprobten Messstellen und Brunnen in Brandenburg als plausibler Modellansatz bewährt hat.

Da bei der ^3He - ^3H -Methode nur das Verhältnis dieses Nuklidpaares genutzt wird, ist man von der Variation des ^3H -Eintrags unabhängig.

In der praktischen Anwendung ist es zusätzlich möglich, die Mischungsanteile von jungem Wasser (< 40 a) mit altem Wasser zu quantifizieren.

Durch die Analyse weiterer Edelgasisotope, speziell ^4He , gewinnt man Informationen über Alter auf Zeitskalen von ~100–1 000 000 a. Eine eindeutige Methodik zur Ableitung von Altern/Verweilzeiten aus ^4He für das Grundwasser gibt es nicht. Der Parameter dient jedoch der Prüfung der Plausibilität von ^{14}C -Altern und gibt Hinweise auf potenzielle Einflüsse von totem C auf die ^{14}C -Ergebnisse.

3.5 Deuterium und Sauerstoff-18

Das Hauptreservoir von D und ^{18}O befindet sich in den Ozeanen mit Konzentrationen von ca. 320 ppm (D) und ca. 2 000 ppm (^{18}O) (MOSER & RAUERT 1980). Bei den Binnenmeeren hängen die Konzentrationen von der Kommunikation mit den Ozeanen, Verdunstungsverlusten und Süßwasserzuflüssen ab.

In der Hydrogeologie wird ausgenutzt, dass unter verschiedenen regionalen Bedingungen unterschiedliche Isotopenfraktionierungen für D und ^{18}O auftreten. Somit sind u. a. folgende Effekte zu berücksichtigen:

1. Kontinentaleffekt: D- und ^{18}O -Anreicherung aufgrund von Ausregnung und Zumischung kontinental gebildeter Niederschläge, die D- und ^{18}O -Werte nehmen mit zunehmender Entfernung zu den Ozeanen und Meeren ab.
2. Höheneffekt: In Gebirgen findet beim Aufsteigen feuchter Luftmassen eine Anreicherung von D und ^{18}O statt (wird z. B. im Hochgebirgsbereich zur Lokalisierung von Grundwassereinzugsgebieten genutzt).
3. Temperatureffekt: Aus den D- und ^{18}O -Werten kann auf die Bildungstemperaturen des Niederschlages geschlossen werden, von dem die zu betrachtenden Grundwässer gespeist wurden. Warm- bzw. kaltzeitlich gebildete Wässer lassen sich damit unterscheiden. So haben pleistozäne Wässer deutlich niedrigere D- und ^{18}O -Werte als Wässer aus warmzeitlichen Perioden.
4. Verdunstungseffekte in Seen: Durch die meist negative Wasserbilanz im Bereich von Binnenseen reichern sich D und ^{18}O darin an. Insbesondere zuflusslose Seen und Bergbaurestlöcher haben deshalb hohe D- und ^{18}O -Gehalte. Mit diesem Effekt lassen sich sowohl die Größenordnung von Grundwasserzuflüssen in den See aber auch eine gegebenenfalls vorhandene Speisung in das Grundwasser bewerten (Beispiel: Uferfiltrat).

3.6 Schwefel-34

Für die genetische Zuordnung von Sulfaten im Grundwasser wird in der Hydrogeologie die Untersuchung von $\delta^{34}\text{S}$ und $\delta^{18}\text{O}$ am Sulfat eingesetzt.

So lassen sich z. B. die Isotopenverhältnisse im Sulfatschwefel von Evaporitsulfaten verschiedener geologischer Formationen gut voneinander unterscheiden.

Im Lockergesteinsbereich spielt dies jedoch eine untergeordnete Rolle. Hier ist vielmehr gefragt, ob die Herkunft des Sulfats mehr den mesozoischen Evaporiten oder sekundärem Sulfat aus anthropogenen Einträgen oder der Pyrit-Verwitterung zugeordnet werden kann.

Die sekundären Sulfate haben eine ^{34}S -Signatur, die sich signifikant von mesozoischen Evaporiten unterscheidet. Damit kann eingeschätzt werden, ob das Sulfat im Grundwasser aus den Ursprungsgesteinen oder aus anderen Quellen stammt oder ob Mischungen beider Komponenten wahrscheinlich sind.

4. Hydrogeologische und hydrogeochemisch-genetische Beschreibung der Standorte mit geogen salinärer Beeinflussung

4.1 WW Lindow-Gühlen

Durch das WW Lindow-Gühlen wird für die Trinkwassergewinnung ein tiefes bedecktes Grundwasserstockwerk [Grundwasserleiterkomplex (GWLK) 2 nach LGRB-Nomenklatur; MANHENKE et al. 1995] genutzt, das sich aus elster- bis saalekaltzeitlichen Sanden zusammensetzt. Diese Grundwasserlagerstätte wird von einem 32–70 m mächtigen Grundwasserstauerkomplex (Grundwasserhemmer) aus saalekaltzeitlichen glazilimnischen Bildungen und Geschiebemergeln überlagert, der eine hydraulische Barriere zu den darüber liegenden weichselkaltzeitlichen Schmelzwassersanden (GWLK 1 nach LGRB-Nomenklatur) bildet. Die durch die Brunnen erschlossene Grundwasserlagerstätte ist durch komplizierte geologische Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet, die sich in kleinräumigen Veränderungen des lithofaziellen Aufbaus der Schichtenfolgen widerspiegeln. So konnte durch Untersuchungsarbeiten im Rahmen der Hydrogeologischen Dargebots erkundung Lindow-Gühlen 1993 der Nachweis eines einheitlichen, im gleichen Niveau ausgebildeten, durchgehend verbreiteten Grundwasserleiters (GWL) im Einzugsgebiet der Wasserfassung nicht erbracht werden. Dieser Tatsache geschuldet, sind die ursprünglich genutzten vier Förderbrunnen des WW selbst in unterschiedlichen Niveaus verfiltert (Abb. 3).

Das unterirdische Einzugsgebiet der Wasserfassung Lindow-Gühlen befindet sich am Rand einer quartären Ausräumungszone (QAZ). Aus dieser Rinnenrandposition resultieren die z. T. stark steilstehenden Schichtenfolgen im Betrachtungsraum. Über den Rinnenrand erfolgt zudem die Intrusion salinärer Tiefenwässer, die eine Qualitätsbeeinträchtigung des durch die Brunnen des WW Lindow-Gühlen geförderten Grundwassers bewirken.

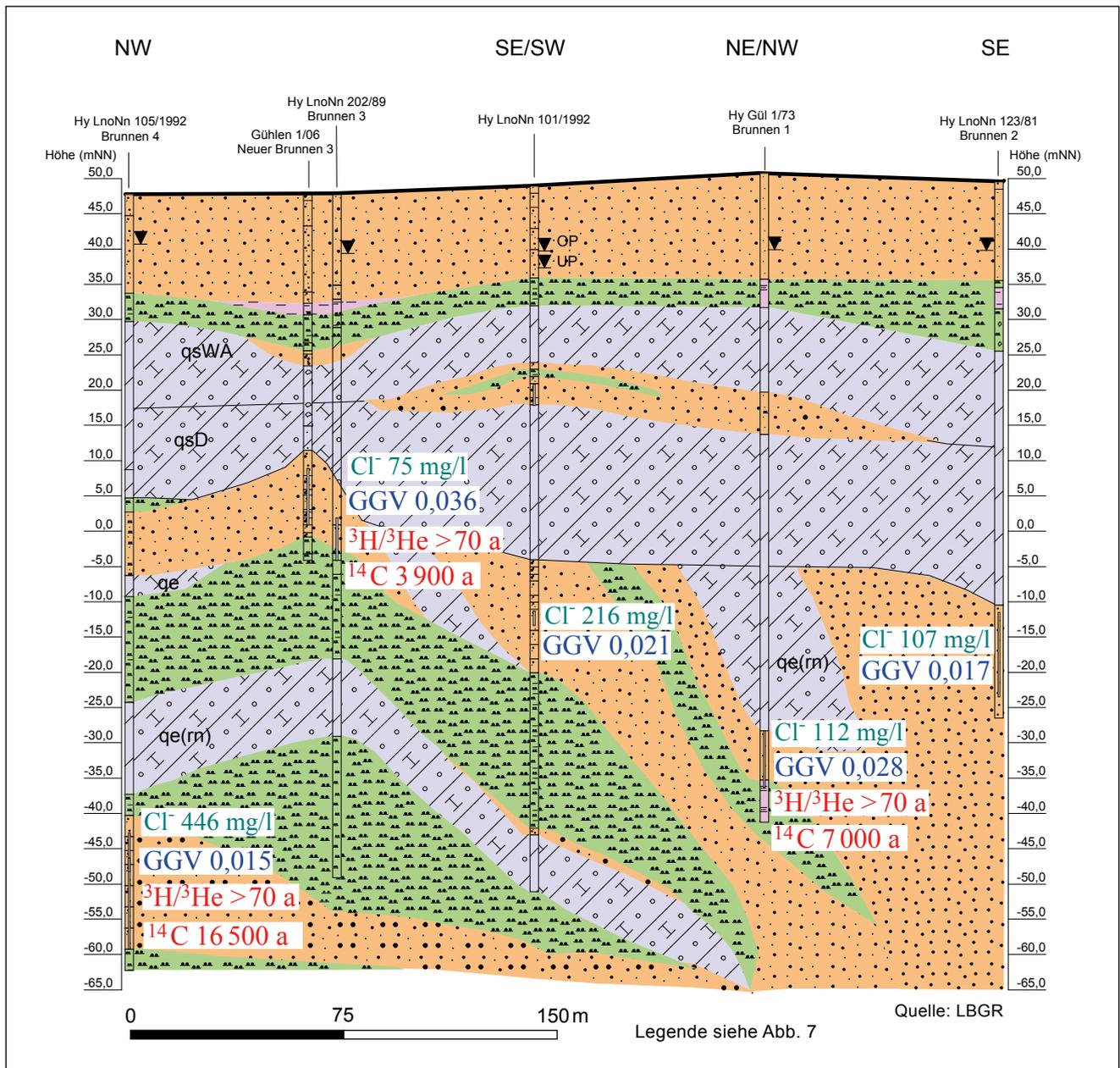


Abb. 3: Fassungsschnitt Wasserwerk Lindow-Gühlen
 Fig. 3: Hydrogeological cross section of waterworks Lindow-Gühlen

In allen Brunnen ist aufgrund der genetischen Befunde die Intrusion salinärer Tiefenwässer deutlich erkennbar. Das Verhältnis von Süß- zu Salzwasseranteilen ist jedoch in den einzelnen Brunnen unterschiedlich ausgebildet. So ist der Brunnen 4 vollständig „aufgesalzen“, was schon durch einen Chlorid (Cl⁻)-Gehalt von 446 mg/l belegt wird [Genetisches Grundverhältnis (GGV) (nach RECHLIN 2008) = 0,015]. Der „Aufsalzungsgrad“ von Brunnen 1 und 2 ist als hoch zu bezeichnen (GGV 0,028 bzw. 0,017). Im Gegensatz zu Brunnen 4 (nicht mehr am Netz) ist jedoch zumindest im Brunnen 1 ein deutlich höherer, noch förderfähiger Süßwasseranteil zur Abdeckung von Bedarfsspitzen identifizierbar. Der Brunnen 3 besitzt den höchsten Anteil förderfähigen Süßwassers (Betrieb in Grundlast), der „Aufsalzungsgrad“

mit Cl⁻-Gehalten von 75 mg/l (GGV 0,036, aber auch hier Hinweis auf intrusiv migrierend!) ist am geringsten ausgeprägt (Abb. 3 und 4).

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Isotopenanalytik aufgeführt, anhand derer eine Altersdatierung vorgenommen wurde. Die Ergebnisse der Altersbestimmungen sind in Tabelle 2 enthalten.

Nach dem ³H/³He-Befund (Tab. 1) lässt sich ableiten, dass kein Jungwasser aus den Brunnen gefördert wird und das Alter in allen drei Brunnen über 70 a liegt.

Für die ¹⁴C-Altersbestimmungen wurden Anfangsgehalte zwischen 56 und 65 pmc ermittelt. Daraus resultieren Alter zwischen 3 900 und 16 500 a. Die ⁴He-Konzentrationen bestätigen die Plausibilität dieser ¹⁴C-Altersbewertung. Die

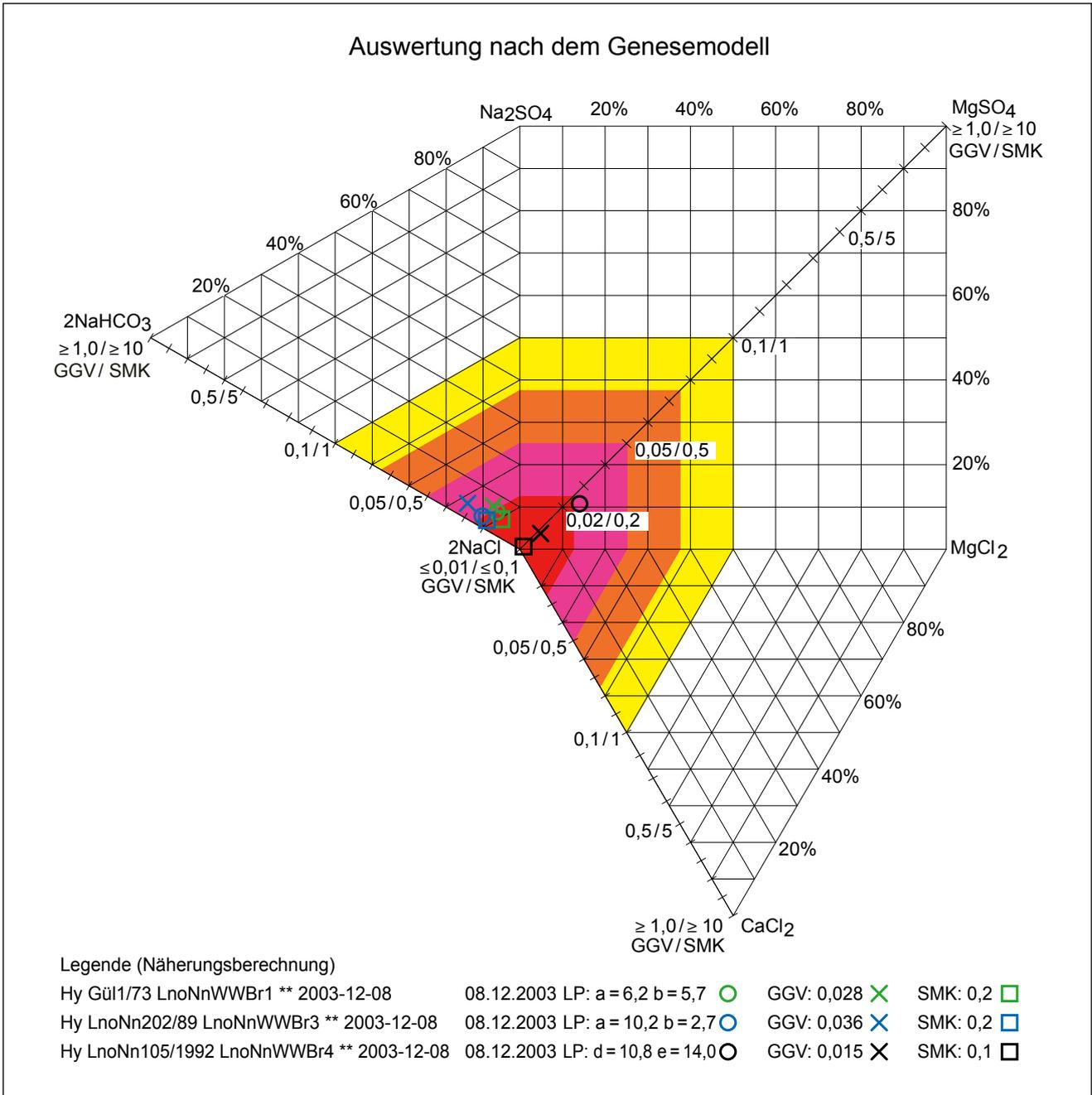


Abb. 4: Wasserwerk Lindow-Gühlen, genetische Bewertung mit GEBAH

Fig. 4: Waterworks Lindow-Gühlen, genetic assessment by using GEBAH

Projekt	Name	Probenahme Datum	³ H [T.E.]	³ He tritiogen [T.E.]	³ H/ ³ He gesamt [T.E.]	⁴ He radiogen [Nml/kg]	¹⁴ C [pMC]	δ ¹³ C [‰]	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]
Lindow-Gühlen	WW Brunnen 1	08.12.2003	0,008	0,42	0,43	2,50*10 ⁻⁴	24,3	-13,5	-8,83	-64,1
	WW Brunnen 3	08.12.2003	0,013	1,06	1,07	1,87*10 ⁻⁴	39,7	-13,8	-8,88	-63,5
	WW Brunnen 4	08.12.2003	0,013	0,16	0,17	6,82*10 ⁻⁴	9,0	-13,3	-9,22	-67,6

Tab. 1: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für das Wasserwerk (WW) Lindow-Gühlen

Tab. 1: Results of isotope analytics for waterworks Lindow-Gühlen

Projekt	Name	Alter nach $^3\text{H}/^4\text{He}$ [a]	Alter nach $^{14}\text{C}/^4\text{He}$ [a]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$
Lindow-Gühlen	WW Brunnen 1	> 70	7 000	warmzeitlich (Holozän)
	WW Brunnen 3	> 70	3 900	warmzeitlich (Holozän)
	WW Brunnen 4	> 70	16 500	Übergang kaltzeitlich zu warmzeitlich oder Zumischung präpleistozäner Wässer

Tab. 2: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope Wasserwerk (WW) Lindow-Gühlen

Tab. 2: Results of age dating/assessment stable isotopes for waterworks Lindow-Gühlen

hier zu beobachtenden Schwankungen der Altersstruktur in der Wasserfassung sind nur durch die unterschiedlichen Anteile salinärer Tiefenwässer erklärbar. Der Brunnen 4 mit dem stärksten Salinareinfluss hat somit auch das höchste Alter. Bei den stabilen Isotopen ^{18}O und D deuten sich für den Brunnen 4 kältere Bildungstemperaturen an. Die Messwerte liegen jedoch noch nicht in der für eiszeitliche Bildungen typischen Größenordnung von $< -10 \text{‰}$ (^{18}O) bzw. $< -70 \text{‰}$ (D). Die Befunde lassen auf Wässer aus dem Übergang von kaltzeitlichen zu warmzeitlichen Bildungen der Grundwässer oder auf eine Zumischung präpleistozäner Wässer schließen.

Mit den Isotopenbefunden konnte die genetisch identifizierte salinare Liegendspeisung in allen Brunnen sowohl bestätigt als auch altersstrukturell spezifiziert werden. Der förderfähige Süßwasseranteil ist ^3H -frei und unterliegt somit nicht der aktuellen Grundwasserneubildung. In Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen und isotopenphysikalischen Ergebnisse mit den geologischen Lagerungsverhältnissen weist der GWLK 2 einen sehr hohen Geschütztheitsgrad auf.

4.2 WW Flatow

Das WW Flatow befindet sich regionalgeologisch auf der Glien-Hochfläche, einer saaleglazial angelegten und weichselkaltzeitlich überprägten Grundmoränenplatte. Die drei Brunnen des WW fördern aus dem Hauptgrundwasserleiter (HGWL) des Betrachtungsraumes (GWLK 2), der ab einer Teufe von 33 m erbohrt wurde und von saalekaltzeitlichen Schmelzwassersanden aufgebaut wird. Der GWLK 2 erreicht eine Mächtigkeit von bis zu 12 m, sein mittlerer kf-Wert kann mit $5 \cdot 10^{-4}$ m/s angegeben werden. Überlagert wird er von einer bindigen Schichtenfolge, die sich aus einer Wechsellagerung von Geschiebemergel und schluffig-tonigen Beckenablagerungen zusammensetzt. In diesen Schichtenkomplex, der insgesamt als Grundwasserhemmer fungiert, sind vereinzelt sandige Horizonte geringer Mächtigkeit eingeschaltet. Im Standortbereich stehen oberflächlich Sande des Brandenburger Stadiums (qw1) mit einer Mächtigkeit von ca. 3 m (GWLK 1) an, die nur eine saisonale Wasserführung aufweisen. Der mittlere Grundwasserstand liegt im Betrachtungsraum bei 37–38 m NN, die gene-

relle Grundwasserfließrichtung verläuft von E nach W. Der Ruhewasserspiegel des gespannten Grundwassers im HGWL wurde in den Brunnenbohrungen zwischen 7,8 und 10 m unter Geländeoberkante (GOK) ermittelt.

Ungefähr 2,5 km westlich vom WW-Standort verläuft eine QAZ, deren Basis zwischen -200 und -300 m NN liegt. Durch seismische Untersuchungen wurden Fehlstellen im Rupelton nachgewiesen. Die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der vorliegenden Rohwasseranalysen des WW Flatow mit GEBAH weist für alle Förderbrunnen Speisungsanteile salinärer Tiefenwässer nach. Die Beeinflussung in den langjährigen Untersuchungsreihen reicht von „diffus migrierend bis migrierend“ (GGV 0,046 Brunnen 1) über „migrierend bis intrusiv migrierend“ (GGV 0,037 Brunnen 2) bis zu „intrusiv migrierend bis nahe intrusiv“ (GGV 0,022 Brunnen 3; Abb. 5). Im weiteren Anstrom des WW selbst konnte in den im wasserwirtschaftlich genutzten HGWL installierten Bewässerungsbrunnen der Nachweis geogen salinärer Wässer nicht erbracht werden. Hingegen sind die nordwestlich des WW Flatow im GWLK 2 ausgebauten Bewässerungsbrunnen, die sich zwischen der QAZ und den WW-Brunnen befinden, hydrogeochemisch-genetisch deutlich durch salinare Liegendspeisung gekennzeichnet (Abb. 6). Der Transport und die Intrusion des Salzwassers im wasserwirtschaftlich genutzten GWL erfolgt somit verstärkt durch hydraulische Entlastung entgegen der Grundwasserfließrichtung.

Die Ergebnisse der Altersbestimmungen aus den Isotopendaten liefern (mit der Quantifizierung der Jungwasser- bzw. Altwasserkomponenten) wichtige zusätzliche Hinweise zu den Speisungsbedingungen des HGWL und fließen somit bei der Entscheidungsfindung für dessen Weiterbewirtschaftung (Prognose) durch die Wasserfassung Flatow mit ein. Für die Identifizierung der Herkunft der Sulfat-Gehalte (20–30 mg/l) bei Anwesenheit salinärer Tiefenwässer erfolgte zusätzlich eine Bestimmung der ^{34}S -Signatur.

Tabelle 3 fasst die Befunde der Isotopenanalytik zusammen, anhand derer Altersbestimmungen vorgenommen wurden (Ergebnisse in Tab. 4).

Unter Ansatz eines Anfangsgehaltes von 60 pmc ergeben sich Alter zwischen 1 020 und 3 000 Jahren (Abb. 6). Diese Alter erscheinen aus der Sicht des möglichen Fließweges und daraus resultierender Fließzeiten relativ hoch. Der ^{14}C -Befund kann jedoch durch ^{14}C -freie Tiefenwässer beeinflusst sein.

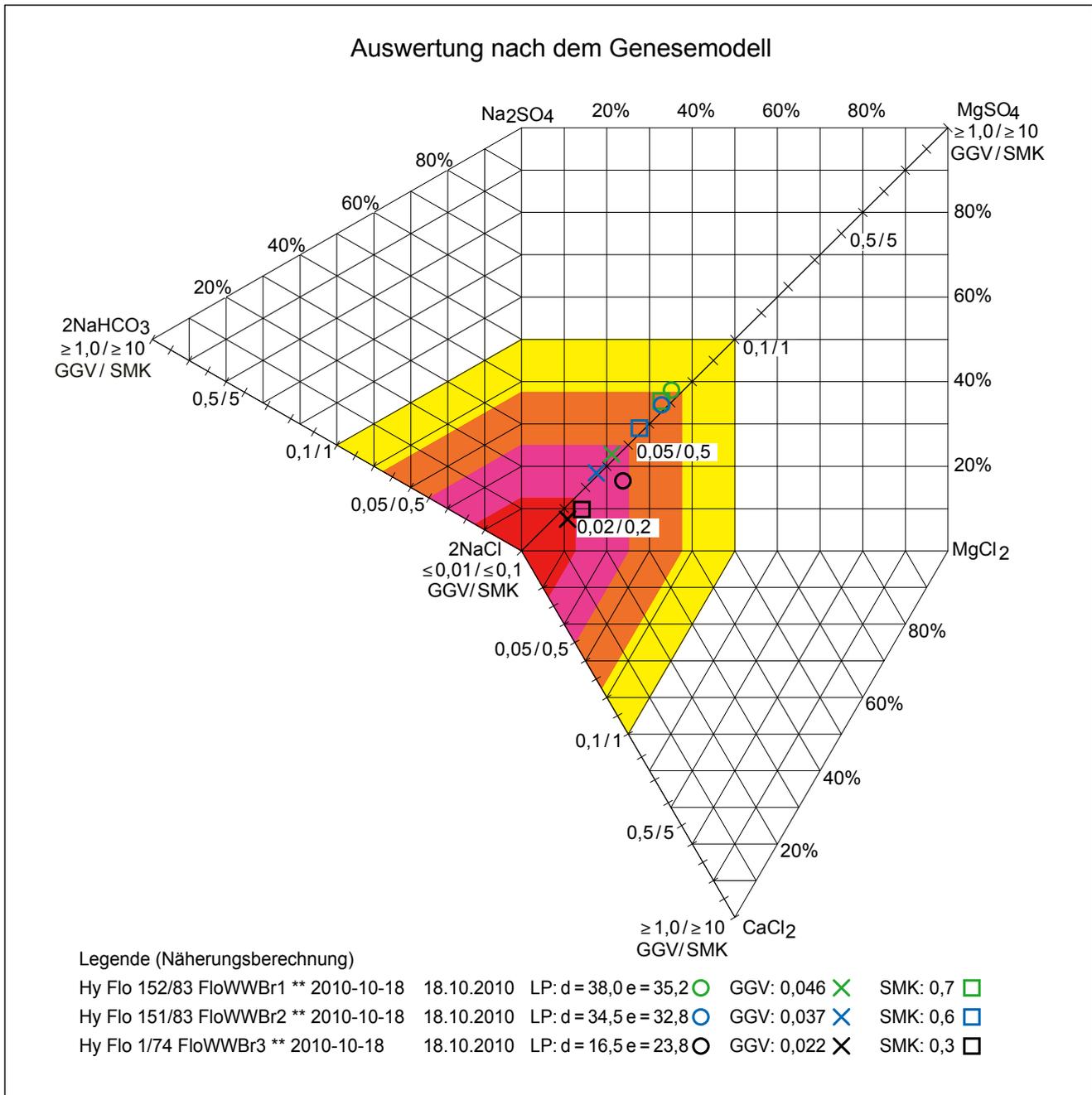


Abb. 5: Wasserwerk Flatow, genetische Bewertung mit GEBAH

Fig. 5: Waterworks Flatow, genetic assessment by using GEBAH

Generell kann eingeschätzt werden, dass das Wasser sicher mehr als 60 a, wahrscheinlich einige hundert bis < 3 000 a alt ist und nicht dem Einfluss der aktuellen Grundwasserneubildung unterliegt.

2015 wurden die Brunnen 1 bis 3 ausschließlich auf ³⁴S mit dem Ziel untersucht, die genetische Herkunft der Sulfat-Anteile im Grundwasser zu präzisieren. Die Ergebnisse aller drei Brunnen zeigen dabei eine ähnliche Größenordnung. Die Werte lassen auf eine Mischung von Wässern mit ³⁴S-Anteilen schließen, die sowohl aus mesozoischen Evaporiten als auch aus jüngeren Sekundärsulfaten stammen. Mit den Isotopenbefunden konnte die genetisch identifizierte sa-

linare Liegendspeisung auch hier bestätigt und altersstrukturell unteretzt werden. Der förderfähige Süßwasseranteil ist nahezu ³H-frei und unterliegt somit nicht der aktuellen Grundwasserneubildung. In Korrelation der hydrogeochemisch-genetischen und isotopephysikalischen Ergebnisse mit den geologischen Lagerungsverhältnissen weist der HGWL einen sehr hohen Geschütztheitsgrad auf.

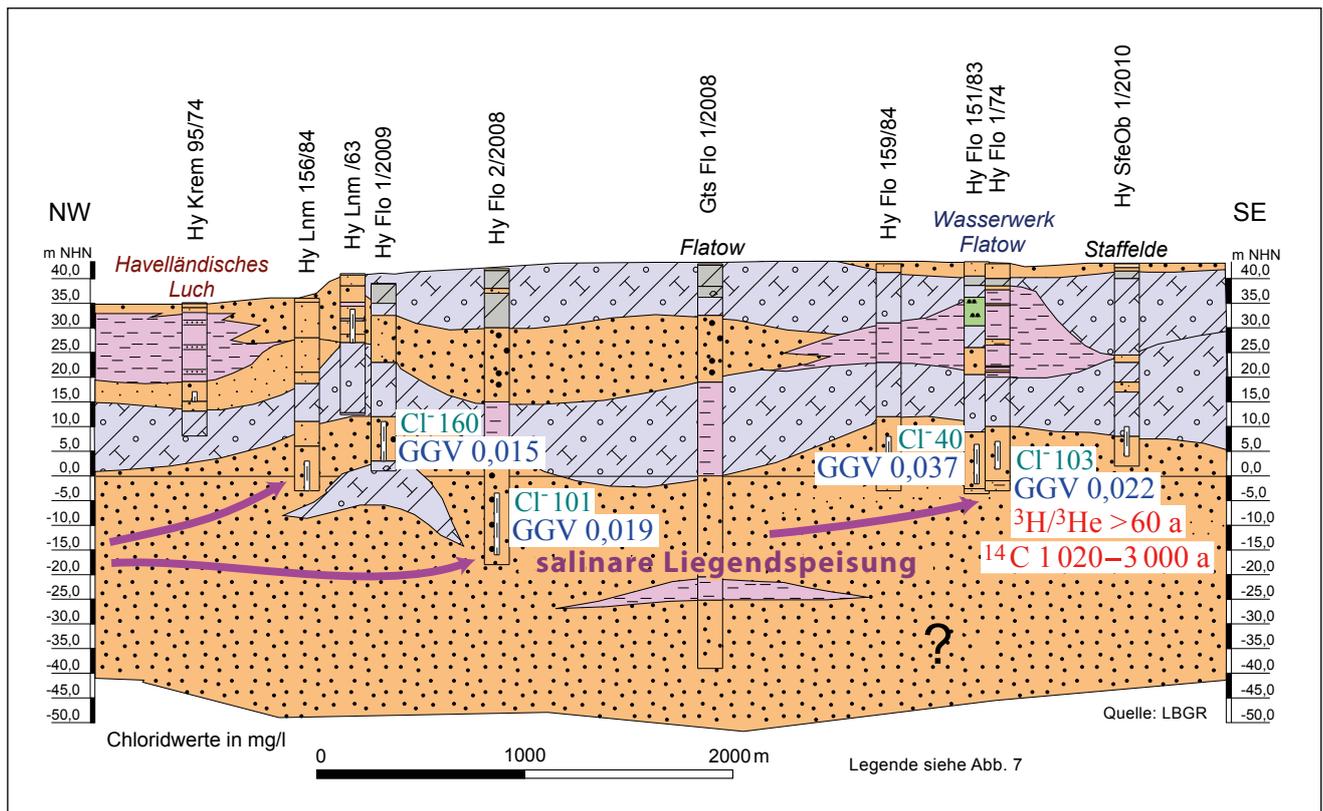


Abb. 6: Hydrogeologischer Profilschnitt Wasserwerk Flatow
 Fig. 6: Hydrogeological cross section of waterworks Flatow

Projekt	Name	Probenahme Datum	³ H [T.E.]	³ He tritiogen [T.E.]	³ H/ ³ He gesamt [T.E.]	⁴ He radiogen [Nml/kg]	¹⁴ C [pmc]	δ ¹³ C [‰]	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]	³⁴ S * v. SO ₄ [‰]	¹⁸ O * v. SO ₄ [‰]
WW Flatow	Brunnen 1	18.10.2010	0,06	2,0	2,06	9,60*10 ⁻⁵	43,3±0,7	-13,7	-8,93	-64,4	3,4	7,5
	Brunnen 2	18.10.2010	0,06	2,0	2,06	1,06*10 ⁻⁴	53,1±0,8	-14,4	-9,02	-64,8	3,6	7,0
	Brunnen 3	18.10.2010	0,02	2,0	2,02	2,64*10 ⁻⁴	42,0±0,7	-15,2	-9,00	-64,8	3,4	7,4

Tab. 3: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für das Wasserwerk (WW) Flatow; *Nachbeprobung am 21.09.2015
 Tab. 3: Results of isotope analytics for waterworks Flatow

Projekt	Name	Alter nach ³ H/ ³ He [a]	Alter nach ¹⁴ C*/ ⁴ He [a]	Bewertung Temperatureffekt δ ¹⁸ O/δ ² H
WW Flatow	Brunnen 1	> 60	2 700	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 2	> 60	1 020	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 3	> 60	3 000	warmzeitlich (Holozän)

Tab. 4: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope Wasserwerk (WW) Flatow;
 *berechnet mit einem Anfangsgehalt von 60 pmc

Tab. 4: Results of age dating/assessment stable isotopes for waterworks Flatow

4.3 WW Mildenberg

Die Wassergewinnung erfolgt aus drei ca. 200 m nördlich des WW gelegenen Brunnen, die aus einem bedeckten quartären GWL (GWLK 2) fördern. Im Bereich der Wasserfassung gibt es einen oberen unbedeckten GWL (GWLK 1), bestehend aus bis zu 10 m mächtigen weichselzeitlichen Sanden. Im südwestlichen Einzugsgebiet des WW werden diese größtenteils von 0,3–0,6 m (max. 2 m) mächtigen holozänen Bildungen (Humus, Torf) bedeckt. Unterlagert wird der GWLK 1 von einem Grundwasserhemmer, der sich aus 5–15 m mächtigen weichselzeitlichen Geschiebemergeln, Schluffen und Bändertonen zusammensetzt. Darunter folgt der vom WW Mildenberg wasserwirtschaftlich genutzte GWL (GWLK 2), welcher von saale- bis weichselzeitlichen, glazifluviatilen, sandig-kiesigen Schichten gebildet wird. Deren Mächtigkeit beträgt etwa 20–40 m (am WW-Standort ca. 30 m). Im Liegenden sind saalezeitliche Geschiebemergel und Schluffe mit Mächtigkeiten zwischen 10 und 40 m verbreitet. Diese sind im Bereich der WW-Brunnen nicht durchgängig ausgebildet, so dass Verbindungen zu tiefer liegenden Grundwasserstockwerken wahrscheinlich sind. Auch ein Kontakt zu höher mineralisierten Wässern des Tiefenwasserstockwerkes ist insbesondere im Bereich einer nahegelegenen quartären Ausräumungszone nicht auszuschließen (Abb. 7).

Die hydrogeochemisch-genetische Bewertung der vorliegenden Rohwasseranalysen des WW Mildenberg mit GEBAH weist für alle Förderbrunnen Speisungsanteile salinärer Tiefenwässer nach. Die Beeinflussung reicht von „migrierend“ (GGV 0,053 Brunnen 1) bis zu „intrusiv migrierend“ (GGV 0,046 Brunnen 2; GGV 0,037 Brunnen 3; Abb. 8). Die Ergebnisse der Altersbestimmungen aus den Isotopendaten liefern (mit der Quantifizierung der Jungwasser- bzw. Altwasserkomponenten) wichtige zusätzliche Hinweise zu den Speisungsbedingungen des GWLK 2 und fließen somit bei der Entscheidungsfindung für dessen Weiterbewirtschaftung (Prognose) durch die Wasserfassung Mildenberg mit ein. Um zu klären, ob der unmittelbar östlich an die Wasserfassung angrenzende Tonstich bei der Ausweisung des Wasserschutzgebietes einzubeziehen ist, wurden zur Identifizierung von Uferfiltratanteilen im GWLK 2 die Befunde der Isotopensignatur von D/¹⁸O aus dem Tonstich mit dem Grundwasser abgeglichen. Die Analyseergebnisse gemäß Tabelle 5 zeigen eindeutig die für derartige überwiegend niederschlagsgespeisten Teiche typischen Eindunstungseffekte. Die Gehalte an D und ¹⁸O unterscheiden sich damit signifikant von den Befunden aus den Brunnen. Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Kommunikation zwischen den Brunnen des WW Mildenberg und dem östlich angrenzenden Tonstich nicht gegeben ist. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Isotopenanalytik

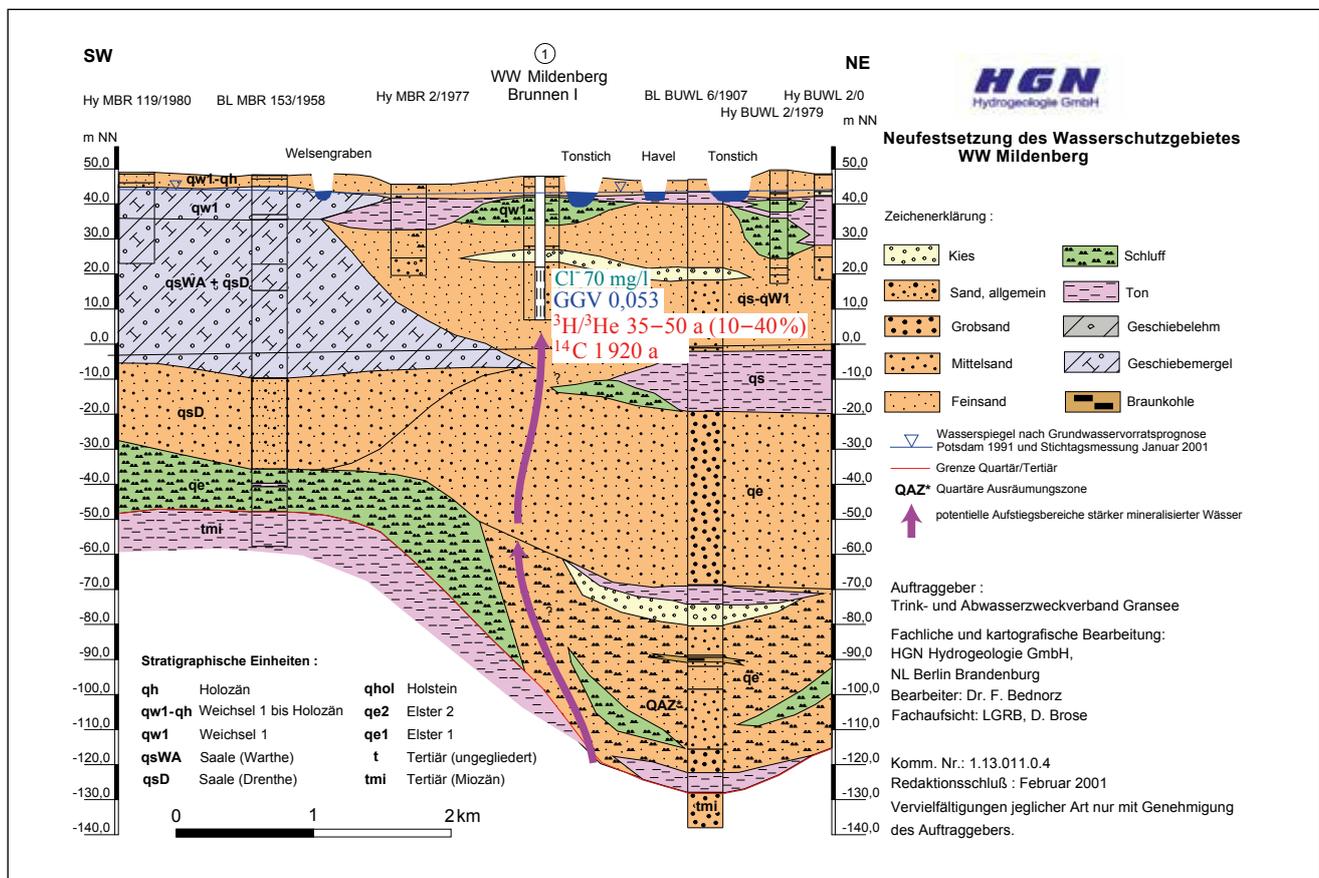


Abb. 7: Hydrogeologischer Profilschnitt Wasserwerk (WW) Mildenberg
 Fig. 7: Hydrogeological cross section of waterworks Mildenberg

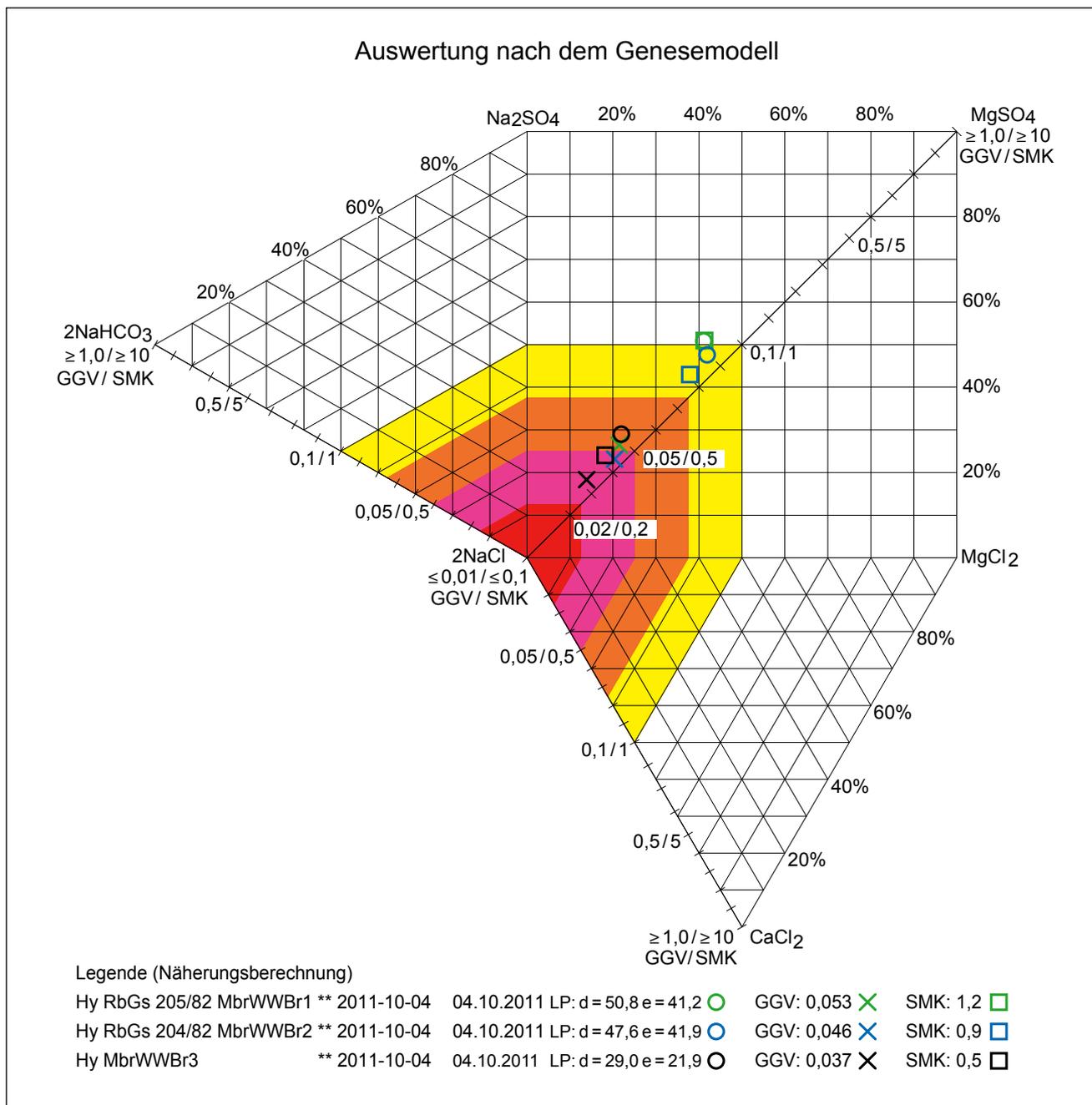


Abb. 8: Wasserwerk Mildenberg, genetische Bewertung mit GEBAH
 Fig. 8: Waterworks Mildenberg, genetic assessment by using GEBAH

Projekt	Name	Probenahme Datum	³ H [T.E.]	³ He tritiogen [T.E.]	³ H/ ³ He gesamt [T.E.]	⁴ He radiogen [Nml/kg]	¹⁴ C [pmc]	δ ¹³ C [‰]	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]
WW Mildenberg	Brunnen 1	04.10.2011	2,65	25,0	27,6	18,5*10 ⁻⁵	47,6 ± 0,5	-10,7	-8,45	-59,9
	Brunnen 2	04.10.2011	4,45	37,0	41,4	18,6*10 ⁻⁵	57, 2 ± 0,5	-10,6	-8,64	-60,6
	Brunnen 3	04.10.2011	1,2	n.b.	>1,2	n.b.	18,5 ± 0,3	-11,1	-8,44	-59,8
Mildenberg	Tonstich	10.10.2012	-	-	-	-	-	-	-1,66	-26,5

Tab. 5: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für das Wasserwerk (WW) Mildenberg
 Tab. 5: Results of isotope analytics for waterworks Mildenberg

Projekt	Name	Alter nach $^3\text{H}/^3\text{He}$ [a]	Alter nach $^{14}\text{C}/^4\text{He}$ [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$
WW Mildenberg	Brunnen 1	ca. 35–50	1 920	10–40	60–90	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 2	ca. 35–50	365	20–60	40–80	warmzeitlich (Holozän)
	Brunnen 3	-	9 500	5–15	85–95	warmzeitlich (Holozän)

Tab. 6: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope Wasserwerk (WW) Mildenberg;
*berechnet mit einem Anfangsgehalt von 60 pmc

Tab. 6: Results of age dating/assessment stable isotopes for waterworks Mildenberg

aufgeführt, anhand derer eine Altersdatierung vorgenommen wurde. Die Ergebnisse der Altersbestimmungen der einzelnen Mischwasserkomponenten sind in Tabelle 6 enthalten.

Der Brunnen 2 hat mit ca. 20–60 % den höchsten Jungwasseranteil. Im Brunnen 3 mit dem niedrigsten GGV und Salinar-Matrix-Koeffizient (SMK; RECHLIN 2008) dominiert mit 85–95 % der Anteil der alten Komponente. Der ^{14}C -Gehalt für den Brunnen 2 deutet darauf hin, dass das Wasser insgesamt deutlich jünger ist als im Brunnen 1.

Für die ^{14}C -Altersdatierung bestätigt sich durch den Befund der stabilen Isotope, dass der Anfangsgehalt am Standort nicht größer sein kann als 60 pmc. Anderenfalls würden sich ^{14}C -Alter von mehr als 10 000 a ergeben (Weichsel-Kaltzeit), was jedoch den D/ ^{18}O -Werten widersprechen würde, die klar warmzeitliche Bildungstemperaturen anzeigen.

Aufgrund der nachweislichen Jungwasseranteile sind die Brunnen 1 und 2 weniger durch einen potenziellen Aufstieg salinärer Wässer gefährdet als der Brunnen 3.

Mit den Isotopenbefunden konnte sowohl die genetisch identifizierte salinare Liegendspeisung als auch die GWN-Komponente bestätigt und altersstrukturell untersetzt werden. Die Förderbrunnen weisen jeweils unterschiedliche Anteile einer Jung- und Altwasserkomponente auf. Dem förderfähigen Süßwasseranteil (Jungwasserkomponente) konnte eine Verweilzeit zugeordnet werden, die einer älteren GWN zuzuordnen ist. Die Brunnen des WW Mildenberg fördern demnach aus einem alten statischen Grundwasservorrat, dem partiell eine jüngere Komponente aus der Neubildung zuströmt. In Korrelation der hydrogeochemischen und isotopephysikalischen Ergebnisse mit den geologischen Lagerungsverhältnissen weist der GWLK 2 am WW-Standort und im fassungsnahen Einzugsgebiet einen hohen Geschütztheitsgrad auf.

4.4 Grundwassermessstelle Spreenhagen

Diese Messstellengruppe wurde 2011 im Auftrag des LBGR im Rahmen des Salinarmonitorings errichtet.

Sie befindet sich westlich der Ortslage Spreenhagen unmittelbar südlich des Oder-Spree-Kanals, relativ zentral innerhalb des Berliner Urstromtals. Im nördlichen Vorland des Urstromtals dominieren große Sanderflächen, deren Oberflächen von ca. 65 m NN bis auf ca. 35 m NN im Bereich des Oder-Spree-Kanals abfallen. Im Urstromtal bilden die

glazifluvialen Sande einen oberen unbedeckten und bis zu 50 m mächtigen GWL (GWLK 1), der als HGWL des Gebietes fungiert. Der Ruhewasserspiegel liegt bei ca. 2,5 m u. GOK. Die Basis des GWLK 1 besteht aus bis zu 15 m mächtigen Holstein-zeitlichen Schluffen und schluffigen Sanden mit hohem organischen Anteil und vereinzelt Exemplaren von *Viviparum diluvianus*. Im Liegenden bauen elsterzeitliche Sande den GWLK 2 auf, der durch Schluffhorizonte aufgespalten wird. Etwa 70 m u. GOK wurden tertiäre Schichtenfolgen erbohrt, die sich aus miozänen Braunkohleschluffen und Fein- bis Mittelsanden zusammensetzen. Letztere werden nach LBGR-Nomenklatur dem GWLK 3 zugeordnet. Der Rupelton konnte in der Bohrung in einer Teufe ab 135 m nachgewiesen werden.

Da in diesem Betrachtungsraum der Aufstieg salinärer Tiefenwässer bis in das Niveau der Vorflut hinlänglich bekannt ist, erfolgte zum direkten Nachweis bzw. zur regelmäßigen Beobachtung und Beschreibung der Aufstiegsmechanismen im Rahmen der hydrogeochemischen Früherkennung mit GEBAH ein Mehrfachausbau der GWM in dafür relevanten Horizonten. Der Oberpegel (OP) wurde im GWLK 1 im Teufenbereich zwischen 19 und 23 m errichtet. Der Ausbau des Mittel- (MP) und Unterpegels (UP) erfolgte jeweils im GWLK 3, der MP in einem Teufenbereich zwischen 104 und 108 m. Der UP wurde unmittelbar oberhalb der erbohrten Rupel-Folge in einer Teufe von 131–135 m innerhalb der Cottbuser Schichten installiert (Abb. 9). Anhand der im Rahmen der Probenahmen gemessenen Grundwasserspiegel ist tendenziell ein abwärts gerichteter Druckgradient innerhalb der Messstellengruppe zu verzeichnen.

Die Wässer des UP sind zum Zeitpunkt der Probenahme mit einem Cl-Gehalt von 478 mg/l und einem GGV von 0,011 deutlich salinar geprägt und werden in GEBAH mit „intrusiv“ eingestuft. Im MP werden die salinaren Speisungsanteile mit GEBAH durch ein GGV von 0,061 immer noch identifiziert, obwohl der Cl-Gehalt mit ca. 26 mg/l eher unauffällig erscheint. Genau diese Identifikationen (GGV/Cl-Gehalt) erlangen im Hinblick auf die hydrogeochemisch-genetische salinare Früherkennung eine außerordentlich wichtige Bedeutung und bedürfen vor diesem Hintergrund einer langfristigen Beobachtung und Bewertung. Der OP ist hydrogeochemisch-genetisch eindeutig durch Wässer der Grundwasserneubildung gekennzeichnet, Speisungsanteile salinärer Tiefenwässer sind nicht diagnostizierbar (Abb. 10).

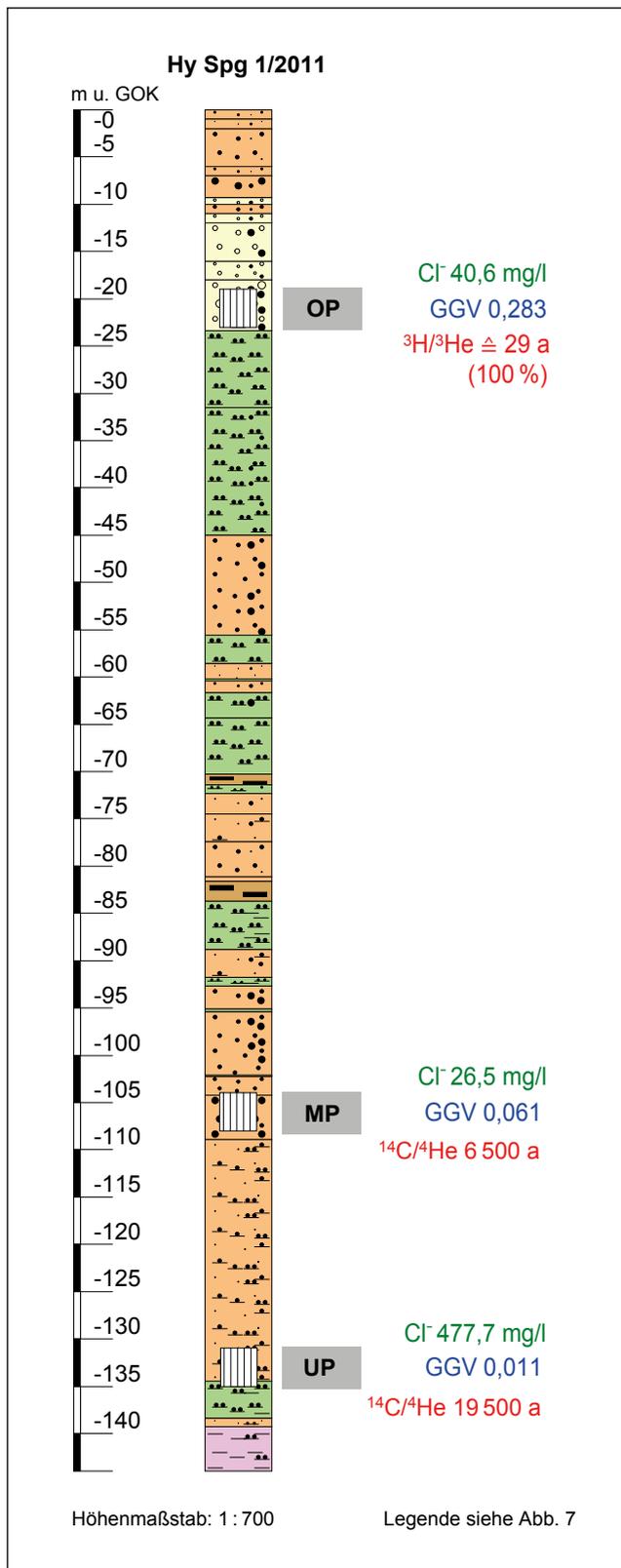


Abb. 9: Schichtenverzeichnis mit Ausbau der Grundwassermessstellen (GWM) Spreenhagen
 Fig. 9: Drill lock with groundwater observation well Spreenhagen

Zur Klärung der Kommunikation Oder-Spree-Kanal mit dem GWLK 1 wurden die Befunde der Isotopensignatur von D/¹⁸O aus dem Kanal mit dem Grundwasser abgeglichen. Im Ergebnis dessen konnte eine Speisung durch Uferfiltratanteile aus dem Oder-Spree-Kanal in den GWLK 1 im Standortbereich nachgewiesen werden.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Isotopenanalytik aufgeführt, anhand derer Altersbestimmungen vorgenommen wurden (Tab. 8).

Der OP der Messstellengruppe hat ein junges Neubildungsgeprägtes Wasser mit einem ³H-Alter von ca. 29 a. Der geringe Gehalt an radiogenem ⁴He belegt, dass keine Altwasserkomponente beteiligt ist. Mit den stabilen Isotopen D und ¹⁸O wurden Eindunstungswässer aus dem Oder-Spree-Kanal identifiziert, der hier durch die Einstauhaltung der Schleuse Wernsdorf in den GWLK 1 einspeist.

Der ¹⁴C-Gehalt ist im OP hoch und rein rechnerisch ergibt sich daraus ein Alter < 60 a und damit in der Größenordnung des ³H-Befundes. Da anhand der radiogenen ⁴He-Gehalte keine Altwasserkomponente im OP existiert, bestätigt sich in diesem Fall deutlich die Richtigkeit des ¹⁴C-Anfangsgehaltes von 65 pmc.

Beim MP wurde aufgrund der Tiefenlage des Filters von 104–108 m u. GOK auf die Untersuchung von ³H/³He verzichtet. Mit einem ¹⁴C-Gehalt von 30 pmc ist der Zerfallsprozess stark vorangeschritten und es ergibt sich daraus bereits ein Alter von ca. 6 500 a. Aus dem ¹³C-Befund deutet sich ein Einfluss von Austauschprozessen durch totem C an, was im Zusammenhang mit den tertiären Braunkohlenhorizonten in dieser Region plausibel ist.

Generell passt dieses isotopephysikalische Bild zur Einstufung im Genesemodell als ein sehr gering mineralisiertes Wasser des Natrium-Typs mit einem geringen diffus migrierenden Salinareinfluss.

Der UP hat im Vergleich zum MP nur noch einen ¹⁴C-Wert von 6 pmc, woraus sich ein hohes ¹⁴C-Alter von 19 500 a bei einem Anfangsgehalt von 65 pmc ergibt. Auch hier sind Austauschprozesse mit totem C aus den ¹³C-Werten abzuleiten.

Die stabilen Isotope D/¹⁸O zeigen für den UP einen Einfluss kälterer Bildungstemperaturen an, so dass ¹⁴C-Alter von ca. 12 000 a durchaus zum Ende der Weichsel-Kaltzeit passen. Diese Aussage wird zudem von dem sehr hohen radiogenen ⁴He-Wert gestützt, der das hohe Alter bestätigt. Die Wässer im GWL des UP nehmen offenbar kaum am Wasserkreislauf teil.

Mit den Isotopenbefunden konnte die genetisch identifizierte saline Liegendspeisung sowohl im UP als auch im MP (beachte im MP die geringen Cl⁻-Gehalte!) als auch die GWN-Komponente im OP bestätigt und altersstrukturell untersetzt werden.

Aufgrund der hier geschilderten Befunde ist diese Messstellengruppe für die kontinuierliche Beschreibung der Mechanismen der salinaren Früherkennung in den MP und OP in Abhängigkeit von den Niederschlagsereignissen bestens geeignet und wird im Rahmen des Salinarmonitorings des LBGR weiterhin langfristig einmal jährlich beprobt und hydrogeochemisch mit GEBAH bewertet.

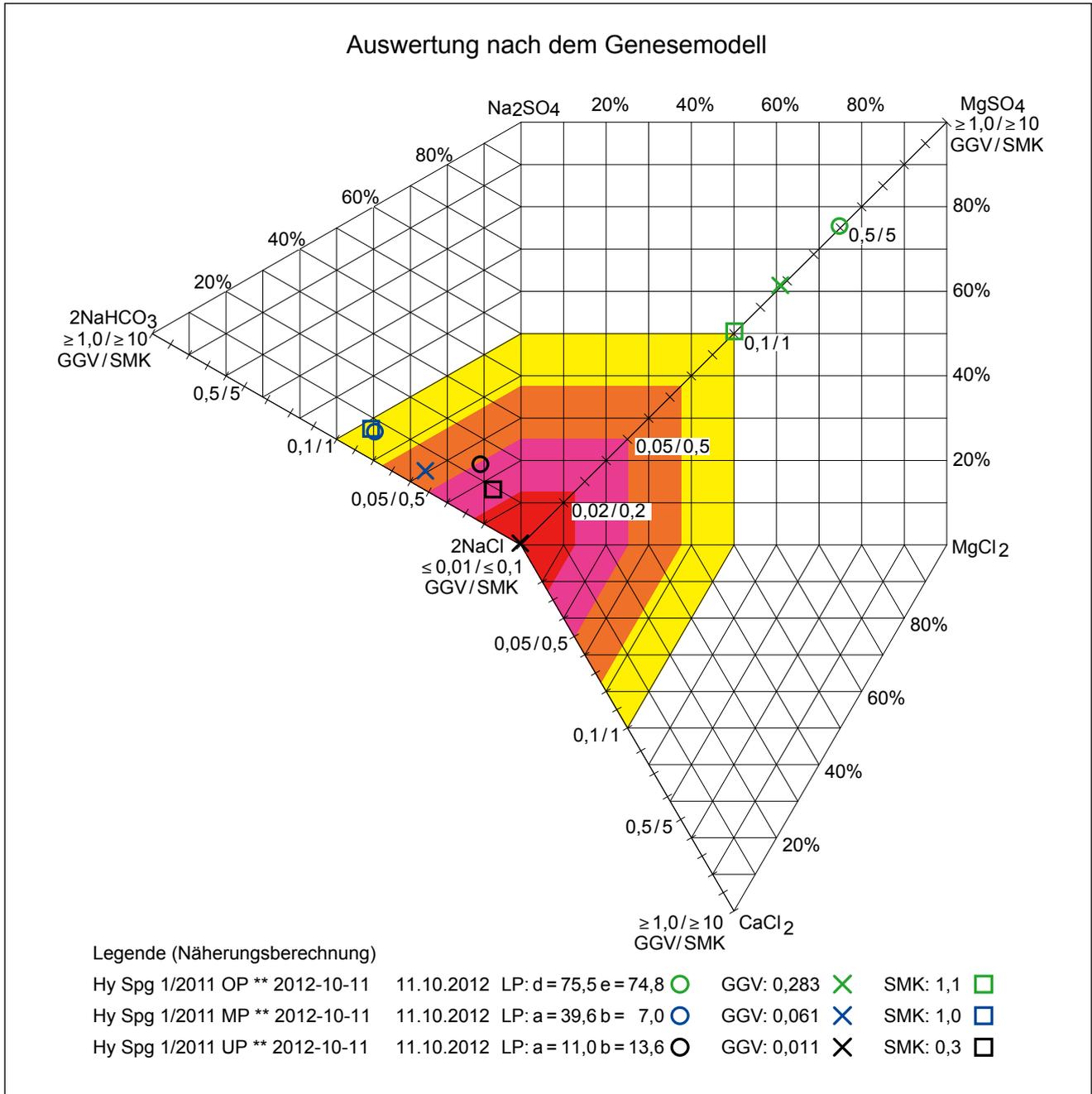


Abb. 10: Grundwassermessstellen (GWM) Spreenhagen, genetische Bewertung mit GEBAH
 Fig. 10: Groundwater observation well Spreenhagen, genetic assessment by using GEBAH

Standort	Name	Pobehahme Datum	Filter m u. GOK	³ H [T.E.]	³ He tritiogen [T.E.]	³ H/ ³ He gesamt [T.E.]	⁴ He radiogen	¹⁴ C [pmc]	δ ¹³ C [‰]	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]
Spreen- hagen	Hy Spg 1/2011 OP	11.10.2012	19–23	5,41	23,5	28,9	0,02*10 ⁻⁴	64,6 ± 1,3	-11,7	-7,92	-58,2
	Hy Spg 1/2011 MP	11.10.2012	104–108	-	-	-	1,55*10 ⁻⁴	30,1 ± 0,6	-13,0	-8,72	-62,2
	Hy Spg 1/2011 UP	11.10.2012	131–135	-	-	-	10,4*10 ⁻⁴	6,0 ± 0,4	-13,2	-9,66	-68,6
	Oder-Spree-Kanal	05.06.2013	-	-	-	-	-	-	-	-7,87	-57,6

Tab. 7: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für die Grundwassermessstelle Spreenhagen
 Tab. 7: Results of isotope analytics for observation well Spreenhagen

Standort	Name	Alter nach $^3\text{H}/^4\text{He}$ [a]	Alter nach $^{14}\text{C}/^4\text{He}$ [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]	Bewertung Temperatureffekt $\delta^{18}\text{O}/\delta^2\text{H}$
Spreenhagen	Hy Spg 1/2011 OP	29	15 oder 58***	100	0	warmzeitlich (Holozän)
	Hy Spg 1/2011 MP	..**	6 500*	0	100**	warmzeitlich (Holozän)
	Hy Spg 1/2011 UP	..**	19 500*	0	100**	Übergang kaltzeitlich zu warmzeitlich oder Zumischung präpleistozäner Wässer

Tab. 8: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope für die GWM Spreenhagen;

* berechnet mit einem Anfangsgehalt von 65 % pmc

** in Anbetracht der Filtertiefe kann Tritium-Freiheit als sicher angenommen werden

*** Die Software Multis bietet hier zwei mögliche Lösungen an

Tab. 8: Results of age dating/assessment stable isotopes for observation well Spreenhagen

4.5 Grundwassermessstelle Biegenbrück

Diese Messstellengruppe wurde ebenfalls im Auftrag des LBGR im Rahmen des Salinarmonitorings im Jahr 2012 errichtet. Der Standort der GWM liegt ca. 6 km westlich der Ortschaft Müllrose und befindet sich regionalgeologisch im Berliner Urstromtal. Im Urstromtal bilden die glazifluvialen Sande einen oberen unbedeckten GWL (GWLK 1), der am Standort mit einer Mächtigkeit von ca. 14 m erbohrt wurde. Der mittlere Ruhewasserspiegel liegt bei ca. 2,5 m u. GOK. Circa 2 km westlich der Bohrung verläuft eine etwa N-S streichende Quartärinne (Neubrück-Merz-Rinne), die bis in das Mesozoikum reicht und den Rupelton vollständig ausgeräumt hat. An den Rinnenrändern steigen saline Tiefenwässer bis in den quartären GWL auf und migrieren in Richtung der Ortschaft Müllrose. Diese wurden bei hydrogeologischen Erkundungsarbeiten 1988 im Raum Müllrose bis in den GWLK 1 nachgewiesen.

Zur Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheit und zur Identifizierung von Salinarfahnen bzw. deren Transportbahnen wurden am Standort drei GWM in unterschiedlichen Niveaus installiert. Der OP wurde in den glazifluvialen Sanden der Saale-Kaltzeit (GWLK 2), die am Bohrungsstandort von einem etwa 8 m mächtigen tonig-schluffigen Grundwasserhemmer überlagert werden, im Teufenbereich von 29–34 m errichtet. Die Filter des MP und UP wurden jeweils im GWLK 3 ausgebaut, der MP im miozänen Quarzsand-Horizont von 108–112 m u. GOK, der UP in den Cottbuser Schichten unmittelbar über dem Rupelton von 160–164 m u. GOK (Abb. 11). Zwischen den Niveaus des MP und UP wurden keine ausreichend mächtigen bindigen Sedimente erbohrt, die eine signifikante hydraulische Trennung der wasserführenden Schichten bewirken könnten. Der ermittelte Druckwasserspiegel innerhalb des GWLK 3 liegt daher in einem einheitlichen Niveau bei 41,55 m NN. Der Ruhewasserspiegel im OP wurde am Stichtag mit 41,76 m NN gelotet, d. h. am Standort tritt ein abwärts gerichteter Druckgradient auf.

Die Wässer des MP und UP sind allein schon durch einen Cl-Gehalt von 3 040 mg/l bzw. 3 271 mg/l als Salzwässer schlechthin einzustufen und werden demzufolge in GEBAH durch die direkte Lage am NaCl-Pol und einem GGV von

0,004 als intrusiv klassifiziert. Im OP hingegen sind mit GEBAH saline Speisungsanteile durch ein GGV von > 0,1 nicht diagnostizierbar, hier handelt es sich genetisch (Natrium-Typ) um alte Neubildungswässer mit längeren Verweilzeiten im Untergrund, die durch die Isotopenanalytik altersstrukturell spezifiziert werden (Abb. 12, Tab. 9, 10).

Beim ca. 30 m tief verfilterten OP der GWM Hy Bbc 1/2012 konnte ein Mischwasser mit einer Altwasserkomponente von 90 % mit einem ^{14}C -Alter von ca. 1 000 bis 3 600 a identifiziert werden. Mit nur 10 % ist der Anteil von Wässern aus der Grundwasserneubildung gering.

Die Wässer des MP und UP sind erheblich älter. ^{14}C ist weitgehend zerfallen, woraus sich ein Alter von über 20 000 a ableiten lässt. Der D/ ^{18}O -Befund zeigt insbesondere für den UP niedrige Bildungstemperaturen an, so dass die aus dem ^{14}C -Alter ableitbare Zuordnung der Wässer zur Weichsel-Kaltzeit plausibel ist. Auch die extrem hohen ^4He -Werte sind ein sicheres Indiz für ein sehr hohes Alter der Wässer. Dass der ^{14}C -Wert im MP etwas geringer ist als im UP, liegt möglicherweise an unterschiedlichen Einflüssen von organischem Material. Nach Abgleich mit dem Schichtenverzeichnis der Bohrung ist der MP mit hoher Wahrscheinlichkeit stärker von organischem toten C beeinflusst als der UP, was ein höheres ^{14}C -Alter im MP vortäuscht.

Aufgrund der hier geschilderten Befunde ist in dieser Messstellengruppe durch die schon im MP und UP nachgewiesene Versalzung, der OP für die kontinuierliche Beschreibung der Mechanismen der salinaren Früherkennung in Abhängigkeit von den Niederschlagsereignissen und damit möglicherweise einhergehender Veränderung des Druckpotenzials bestens geeignet. Im Rahmen des Salinarmonitorings des LBGR werden diese GWM weiterhin langfristig einmal jährlich beprobt und hydrogeochemisch mit GEBAH bewertet.

4.6 Grundwassermessstelle Müllrose des Landesamtes für Umwelt (LfU)

Eine ausführliche hydrogeochemisch-genetische Charakterisierung dieser Messstellengruppe mit Zuordnung zu Gene- seklassen erfolgt in dem Beitrag von G. Hotzan in diesem

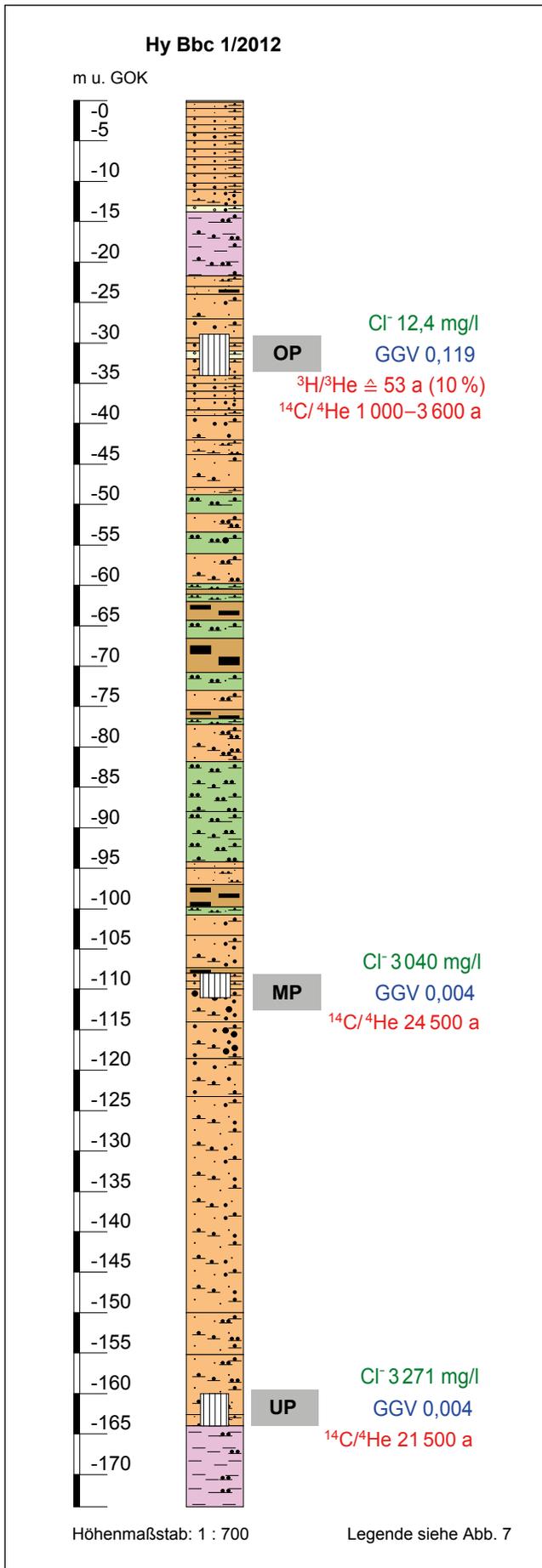


Abb. 11:
Schichtenverzeichnis mit Ausbau der
Grundwassermessstellen Biegenbrück

Fig. 11:
Drill lock with groundwater observation well Biegenbrück

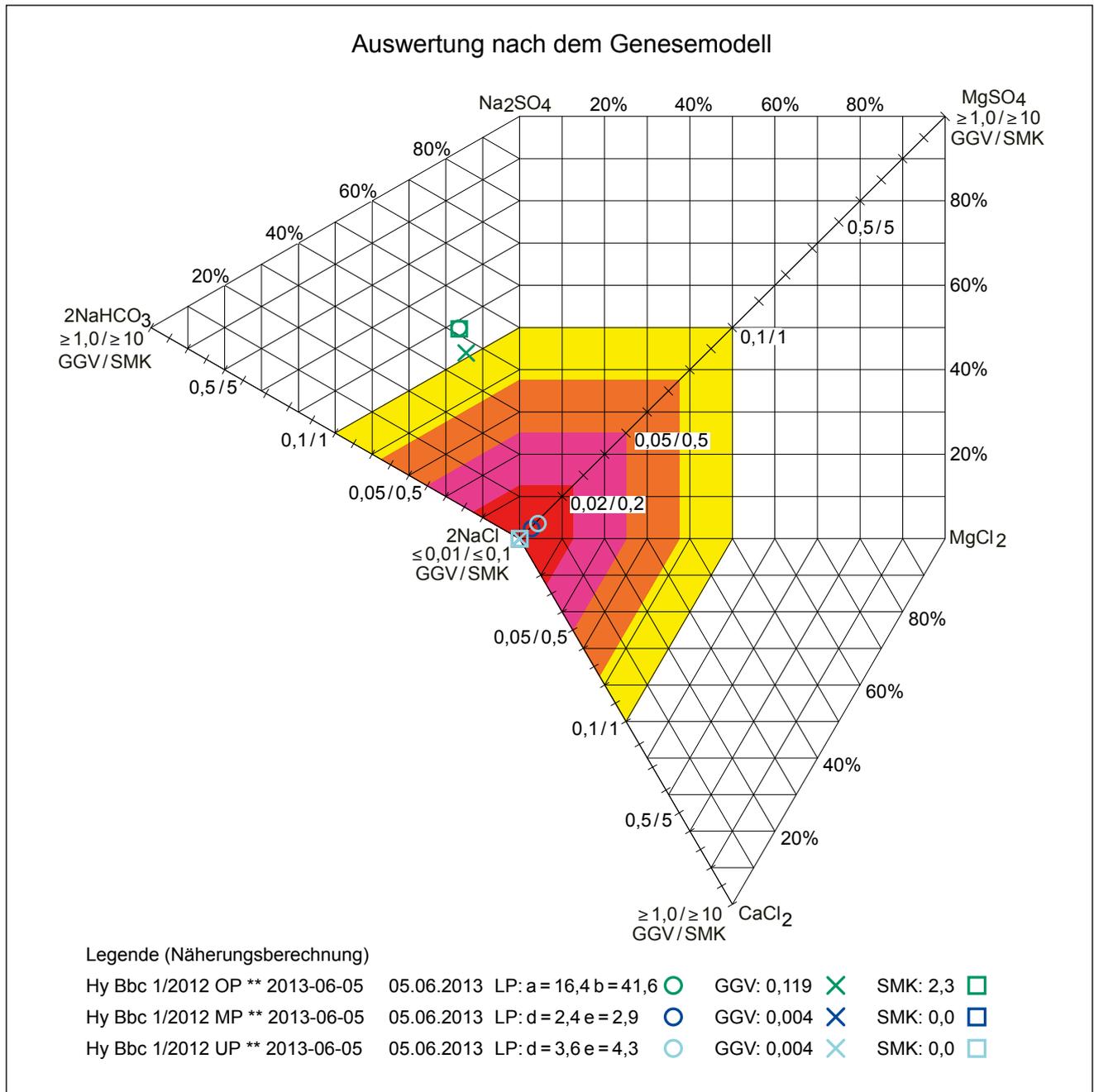


Abb. 12: Grundwassermessstellen Biegenbrück, genetische Bewertung mit GEBAH

Fig. 12: Groundwater observation well Biegenbrück, genetic assessment by using GEBAH

Standort	Name	Probenahme Datum	Filter m u. GOK	³ H [T.E.]	³ He tritiogen [T.E.]	³ H/ ³ He gesamt [T.E.]	⁴ He radiogen [Nml/kg]	¹⁴ C [pmc]	δ ¹³ C [‰]	δ ¹⁸ O [‰]	δ ² H [‰]
Biegenbrück	Hy Bbc 1/2012 OP	05.06.2013	29–33	1,0	18,0	19,0	18,7*10 ⁻⁵	59,7 ± 0,8	-13,4	-9,12	-64,7
	Hy Bbc 1/2012 MP	05.06.2013	108–112	-	-	-	2100*10 ⁻⁵	3,3 ± 0,1	-11,3	-9,11	-65,3
	Hy Bbc 1/2012 UP	05.06.2013	160–164	-	-	-	2100*10 ⁻⁵	4,8 ± 0,3	-13,6	-9,65	-69,0

Tab. 9: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für die Grundwassermessstelle Biegenbrück

Tab. 9: Results of isotope analytics for observation well Biegenbrück

Standort	Name	Alter nach ³ H/ ³ He [a]	Alter nach ¹⁴ C/ ⁴ He [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]	Bewertung Temperatureffekt δ ¹⁸ O/δ ² H
Biegenbrück	Hy Bbc 1/2012 OP	53	1.000–3 600***	10	90	warmzeitlich (Holozän)
	Hy Bbc 1/2012 MP	-**	24 500*	0	100	Übergang kaltzeitlich zu warmzeitlich, Einfluss toter C wahrscheinlich
	Hy Bbc 1/2012 UP	-**	21 500*	0	100	kaltzeitliche Bildungstemperaturen

Tab. 10: Ergebnisse der Altersbestimmungen/Bewertung stabiler Isotope für die Grundwassermessstelle Biegenbrück

*berechnet mit einem Anfangsgehalt von 65 pmc

** Tritium-Freiheit wurde in dieser Tiefe als sicher vorausgesetzt

***berechnet mit einem Anfangsgehalt von 65–85 pmc mit Infiltrationsmodell

Tab. 10: Results of age dating/assessment stable isotopes for observation well Biegenbrück

Band, so dass hier nur eine kurze Darstellung und Bewertung der Isotopenergebnisse (Tab. 11 und 12) vorgenommen wird. Trotz des geringen Teufenunterschiedes zum MP3 ist der UP der GWM Hy Müe 133/87 ³H-frei und hat mit 4 300 a ein deutlich höheres ¹⁴C-Alter. Im nur 3 m höher gelegenen MP3 wird ein Jungwasseranteil < 65 a von 20–30 % abgeleitet. Dies bestätigt sich auch in dem deutlich geringeren ¹⁴C-Alter. Der ⁴He-Wert ist im UP mit 240*10⁻⁵ Nml/kg sehr hoch und lässt ebenfalls auf ein hohes Alter schließen. Der Unterschied zwischen MP3 und MP2 ist gering und die Altersstruktur nach ³H/³He und ¹⁴C weitgehend identisch. Lediglich die ⁴He-Werte unterscheiden sich und deuten auf

unterschiedliche Mischungsverhältnisse älterer und jüngerer Komponenten hin.

Die im Beitrag von G. HOTZAN beschriebene hydrogeochemisch-genetische Zonierung innerhalb des GWL konnte somit durch die Isotopenuntersuchungen altersstrukturell untersetzt und bestätigt werden.

Zusammenfassung

Bei der Korrelation der isotopenphysikalischen mit den hydrogeochemisch-genetischen Ergebnissen konnte eine sehr

Standort	Name	Probenahme	Filter	³ H	³ He tritiogen	³ H/ ³ He gesamt	⁴ He radiogen	¹⁴ C	δ ¹³ C
		Datum	m u. GOK	[T.E.]	[T.E.]	[T.E.]	[Nml/kg]	[pmc]	[‰]
Müllrose	Hy Müe 133/87 UP	14.07.2016	36,4–37,4	0,02	0,00	0,02	240 *10 ⁻⁵	35,7 ± 0,6	-13,6
	Hy Müe 133/87 MP3	14.07.2016	32,3–33,3	2,05	0,00	2,05	81 *10 ⁻⁵	56,3 ± 0,9	-13,8
	Hy Müe 133/87 MP2	14.07.2016	28,4–29,4	1,73	0,00	1,73	57 *10 ⁻⁵	56,7 ± 1,0	-14,5

Tab. 11: Ergebnisse der Isotopenbestimmungen für die Grundwassermessstelle Müllrose

Tab. 11: Results of isotope analytics for observation well Müllrose

Standort	Name	Alter nach ³ H/ ³ He [a]	Alter nach ¹⁴ C/ ⁴ He [a]	Anteil junge Komponente [%]	Anteil alte Komponente [%]
Müllrose	Hy Müe 133/87 UP	>65	4 300	0	100
	Hy Müe 133/87 MP3	0–60	530	20–30	70–80
	Hy Müe 133/87 MP2	0–60	470	15–25	75–85

Tab. 12: Ergebnisse der Altersbestimmungen für die Grundwassermessstelle Müllrose

*berechnet mit einem Anfangsgehalt von 60 pmc

Tab. 12: Results of age dating for observation well Müllrose

gute Übereinstimmung erzielt werden. Da mit GEBAH lediglich die genetisch prägenden dominanten Lösungsanteile eines Mischwassers bewertet werden, gelingt es mit den o. g. verschiedenen Komponenten der Isotopenanalytik die Alt- bzw. Jungwasseranteile näher zu spezifizieren und diese einer Alterssignatur bzw. Verweilzeit im jeweiligen GWL zuzuordnen.

Die Bestimmung von ^{34}S ermöglichte es unter anderem im WW Flatow Mischwässer mit Anteilen mesozoischer Evaporitsulfate zu identifizieren.

Weiterhin konnte durch $\text{D}/^{18}\text{O}$ -Bestimmung und den Vergleich der Isotopensignatur des Oberflächen- mit dem Grundwasser eine Speisung des durch das WW Mildenberg genutzten GWLK 2 aus dem in Brunnennähe gelegenen Tonstich sicher ausgeschlossen werden, so dass dieser bei der Ausgrenzung des Wasserschutzgebietes nicht mit einbezogen werden muss.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die genetisch identifizierten salinaren Speisungsanteile durch die Isotopenanalytik eindeutig einer Altwasserkomponente mit entsprechender Alterssignatur zugeordnet werden konnten. Somit wurde die Methodik der konzentrationsunabhängigen Salinar-Früherkennung mittels GEBAH durch die Isotopenuntersuchungen bestätigt und altersstrukturell unteretzt.

Summary

With the isotope groundwater investigations in observation and pumping wells a good correlation between isotope and hydrochemical genetic results could be observed. For the genetic assessment of the different water samples the genetic groundwater model GEBAH can be used for classification according to the formative dominant solute portions. Age related classifications were only possible in rough units. In combination with isotope analytics (tritium, carbon-13/14, helium-3/4) it was possible to specify the groundwater age/residence time and to distinguish between old and young water components within the different aquifers.

The analytics of sulphur-34 isotope allowed to identify mixed water with parts of old mesozoic evaporate sulphat in waterworks Flatow.

Based on deuterium- and oxygen-18-analytics in waterworks Mildenberg a geohydraulic connection between ponds from earlier clay mining activities and the aquifer used for drinking water supply could be excluded. So the ponds didn't have to be included into the groundwater protection area for the water works.

In conclusion it can be stated that the genetically identified saliniferous parts in fresh water aquifers could be explicitly related to old water components with corresponding high ages.

Hence the method of the concentration-independent early detection of saliniferous water with GEBAH could be confirmed by the isotope investigations and groundwater aging.

Literatur

TRETTIN, R., HILLER, A., WOLF, M., DEIBEL, K. & W. GLÄSSER (1997): Isotopenuntersuchungen tiefliegender Grundwässer südöstlich Berlins. – Zeitschrift Grundwasser **2**, S. 65–76

BEDNORZ, F. (1992): Beschaffenheitsanalyse und Geschützteheitsbewertung von Aquiferen Südbrandenburgs. – Dissertation Bergakademie Freiberg, 118 S. (unveröff.)

MANHENKE, V., HANNEMANN, M. & B. RECHLIN (1995): Gliederung und Bezeichnung der Grundwasserleiterkomplexe im Lockergestein des Landes Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **1**, S. 12

MOSER, H. & W. RAUERT (1980): Isotopenmethoden in der Hydrogeologie. – S. 23 ff, Berlin, Stuttgart

RECHLIN, B. (2008): Eine Methode zur konzentrationsunabhängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in süßwasserführende Grundwasserleiter und Oberflächen-gewässer. – 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

Anschrift der Autoren:

Dr. Falk Bednorz
Fugro Consult GmbH
Wolfener Straße 36 U
12681 Berlin
F.Bednorz@fugro.com

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

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 103–109	5 Abb., 9 Zit.
------------------------------	---------	----------------	------------	----------------

Ergebnisse von Untersuchungen zur Identifikation und Verbreitung salinarer Wässer im Raum Müllrose

Results from investigations for identification and dissamination of saline waters in the region Müllrose

GERHARD HOTZAN

Geologisch-strukturelle und hydrodynamische Rahmenbedingungen im Raum Müllrose

Das Betrachtungsgebiet befindet sich im Bereich des Berliner Urstromtales, einer Hauptabflussbahn von Schmelzwässern der Weichsel-Kaltzeit. Der hier anzutreffende unbedeckte Grundwasserleiter (GWL) weist eine Mächtigkeit von ca. 40 m auf. Er besteht aus weichselkaltzeitlichen glazifluvialen Fein-, Mittel- und Grobsanden sowie saalekaltzeitlichen Fein- und Mittelsanden. Als Liegendstauer wirken feinsandige Schluffe der Unteren Brieske-Formation des Miozäns, die die pleistozänen Sedimente diskordant unterlagern.

Im westlichen Teil des Betrachtungsgebietes, bei der Ortslage Neubrück, befindet sich eine tiefreichende meridional streichende pleistozäne Rinnenstruktur, die Quartärausräumungszone von Merz-Neubrück, in der die tertiäre Schichtenfolge bis in das Prä-Rupel-Niveau erodiert ist. Diese Rinne ist mit elsterkaltzeitlichen glazifluvialen und glazilimnischen Sedimenten gefüllt. Insbesondere an den Rinnenrändern sind sandige Sedimente verbreitet, über die hydraulische Verbindungen zwischen den GWL der verschiedenen stratigraphischen Niveaus bestehen. Dabei ist nicht der gesamte Rinnenrand durchlässig, vielmehr sind es nur einzelne Bereiche.

Die Hydrodynamik im unbedeckten Hauptgrundwasserleiter (HGWL) wird durch die Entlastungszone des Berliner Urstromtales geprägt. Die regionale Grundwasserscheide zwischen Elbe und Oder quert in Nordwest–Südost-Richtung das Betrachtungsgebiet. Das Grundwassergefälle ist mit ca. 0,5 ‰ sehr gering. Die generelle Grundwasserfließrichtung ist nach West bzw. nach Ost orientiert. Im Betrachtungsgebiet herrschen stationäre hydrodynamische Verhältnisse. Die hydraulischen Wirkungen einer sich periodisch verstärkenden bzw. verminderten Grundwasserneubildung sind sehr gering. Die Differenzen der Druckpotentiale des unbedeckten HGWL bewegen sich im cm- bis dm-Bereich.

Die Grundwasserdynamik in den tertiären Grundwasserleitern folgt prinzipiell der des unbedeckten HGWL. Die Druckpotentiale liegen aber durchschnittlich ca. 1,5 m

(GWL der Spremberg-Formation) bzw. ca. 5 m (GWL der Prä-Rupel-Formationen) über dem Druckniveau des unbedeckten Hauptgrundwasserleiters.

Kinematik der Salzwasserintrusion im Raum Müllrose

Der Aufstieg salinarer Wässer aus dem Salzwasser- in das Süßwasserstockwerk wie auch von nichtsalinaren Wässern aus tieferen in höherliegende GWL ist grundsätzlich an zwei Bedingungen gebunden, die gleichzeitig vorliegen müssen. Die erste besteht im Vorhandensein geologischer Strukturelemente, die vertikale Wasserwegsamkeiten zwischen den GWL unterschiedlicher stratigraphischer Niveaus schaffen. Das können z. B. tektonische Störungen, aber auch quartäre Rinnenstrukturen und glazigene Deformationen sein. Die zweite Bedingung besteht darin, dass das Druckpotential im liegenden GWL höher sein muss, als das Druckpotential im hangenden GWL. Die Menge der intrudierenden Wässer wird durch die Fläche der wasserwegsamsten Bereiche, ihre Durchlässigkeit sowie die Potentialdifferenz zwischen den GWL limitiert. Im Ergebnis der Intrusion kommt es durch die Mischung und Neueinstellung der Reaktionsgleichgewichte im Grundwasser zu markanten Änderungen des Grundwasserchemismus.

Beim Übertritt salinarer Wässer bilden sich in Abhängigkeit von der intrudierten Menge „Salzwasserfahnen“ aus, bei großen Salzwassermengen auch „Salzwasserströme“, die sich in Grundwasserfließrichtung, bei hohem Mineralisierungsgrad dichtebedingt aber auch entgegengesetzt, im Süßwasser führenden Grundwasserleiter ausbreiten (vgl. HOTZAN 2010).

Im Betrachtungsgebiet hat die Intrusion der salinaren Tiefenwässer ihren Ausgangspunkt im großflächig verbreiteten GWL der Rupel-Basissande, der im Liegenden der als regionaler Grundwasserstauer wirkenden mächtigen Tone und Schluffe der Rupel-Formation liegt und zum Salzwasserstockwerk zählt. Aufgrund des im Vergleich zu den anderen tertiären und pleistozänen GWL deutlich höheren Druckpotentials in diesem Niveau ist die Intrusi-

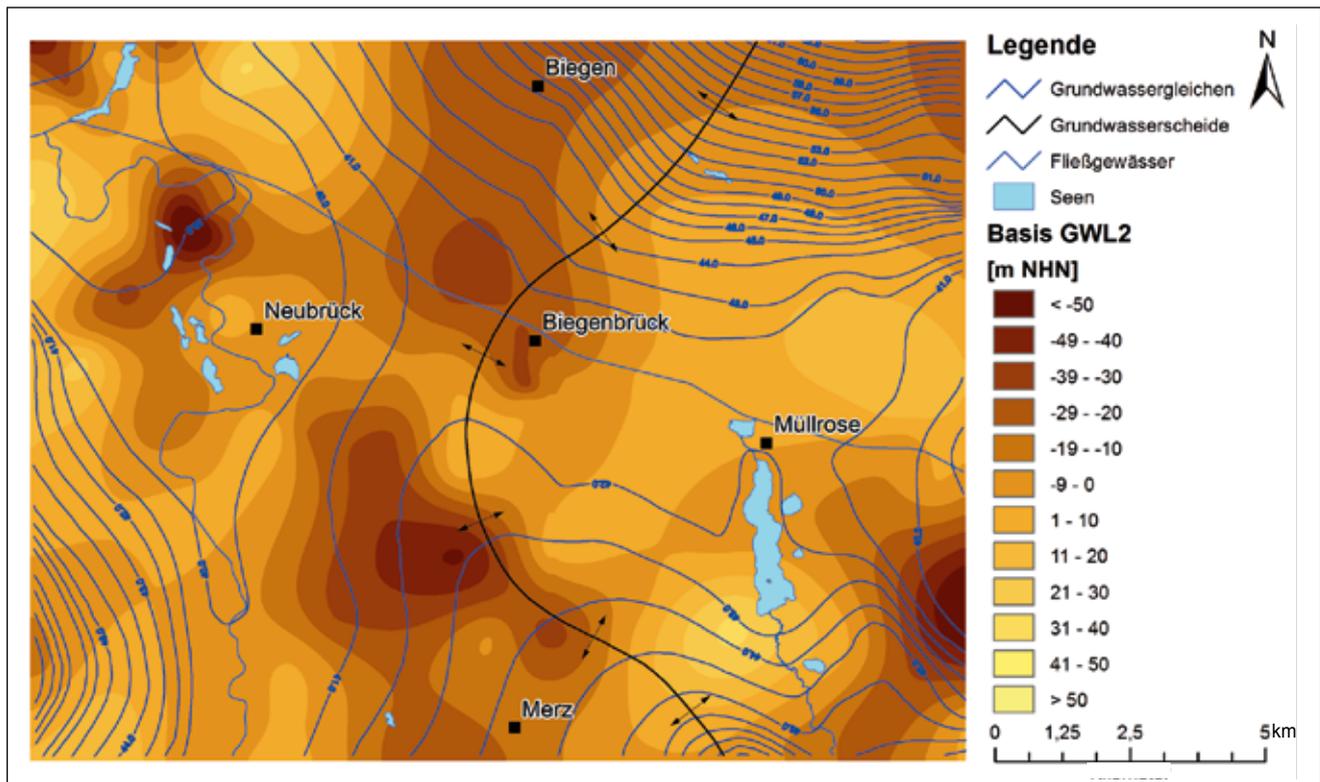


Abb. 1: Morphologie der Sohle des quartären Hauptgrundwasserleiters (HGWL) und Grundwasserdynamik im Raum Müllrose
 Fig. 1: Morphology of the base of Quaternary main aquifer in the region of Müllrose

on von Grundwässern in höherliegende GWL bei Vorhandensein vertikaler wasserwegsamere Bereiche möglich. Mit der Merz-Neubrücker Rinne ist dieses vertikale Strukturelement gegeben und ermöglicht den Salzwasseraufstieg in alle hangenden GWL bis zum unbedeckten HGWL des Berliner Urstromtales. Die Menge der intrudierenden salinaren Wässer ist so groß, dass sich ein „Salzwasserstrom“ ausbilden kann. Dieser bewegt sich einerseits mit dem Grundwasserstrom in nordwestliche Richtung und wird vom Vorfluter (Spree) aufgenommen. Ein Teil der Wässer fließt aufgrund ihrer höheren Dichte entgegen der regionalen Grundwasserfließrichtung in eine Senke der GWL-Sohle und überwindet dadurch die regionale Grundwasserscheide zwischen Elbe und Oder (vgl. Abb. 1). Dieser „Salzwasserstrom“ wird durch den im Bereich Müllrose als Vorfluter wirkenden Oder-Spree-Kanal aufgenommen.

Zeitlich-räumliche hydrogeochemisch-genetische Charakteristik des „Salzwasserstromes“

Bereits durch die hydrogeologische Erkundung Müllrose (KALATZ & DIETTERLE 1988) wurde im Bereich einer geplanten Wasserfassung südlich des Oder-Spree-Kanals im unbedeckten Hauptgrundwasserleiter das Vorhandensein von salinaren Wässern festgestellt. Im Ergebnis detaillierter Untersuchungen, insbesondere durch Bohrungen und ihrem Ausbau zu Grundwassermessstellen, wurden die laterale Verbreitung sowie die Mächtigkeit der Salzwäs-

ser im unbedeckten HGWL bestimmt. Auf der Grundlage dieser Daten erfolgten Tests zur Grundwassergewinnung mit Salzwasserabwehrbrunnen. Die qualitative Charakterisierung dieser Wässer erfolgte auf der Grundlage eines Grenzwertes für Chlorid (Cl^- ; 250 mg/l), auf dessen Grundlage eine Unterscheidung in salinare und nicht salinare Wässer vorgenommen wurde. Durch die stark rückläufige Wasserbedarfsentwicklung nach 1990 wurde der geplante Fassungsstandort zwar aufgegeben, das Messstellennetz aber nicht zurückgebaut.

Zum Studium der Auswirkungen des Klimawandels auf Salzwasserintrusionen wurden in Kooperation zwischen dem Landesamt für Umwelt (LfU) und dem Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe (LBGR) Messstellen ausgewählt und ab 2004 regelmäßig beprobt (HANNAPPEL et al. 2007). Die Salinar-Messstelle Müllrose des Landesmessnetzes ist im unbedeckten HGWL in fünf Teufenniveaus, von denen drei regelmäßig und zwei bei Bedarf beprobt werden, verfiltert. Die aus den Messstellen entnommenen Proben lieferten eine Vielzahl von Daten, deren hydrogeochemisch-genetische Interpretation auf der Grundlage von Geneseklassen (HOTZAN 2010, 2011) an dieser Stelle vorgestellt und diskutiert werden soll.

Die Analysen belegten eine allmähliche Zunahme der Chlorid-Konzentrationen nach der Teufe, d. h. dass am Kontakt von Süß- zu Salzwässern keine scharfe Grenzfläche (die „Süß-Salzwassergrenze“) ausgebildet ist, sondern ein Übergangsbereich existiert, in dem die Chlorid-Konzentrationen

zwischen dem regionalen Background und dem Grenzwert für salinare Wässer liegen. Im Ergebnis der Bearbeitung mit Hilfe des Softwareprogrammpaketes GEBAH 1.1 (RECHLIN 2010 et al.) und der Zuordnung der einzelnen Analysen zu Geneseklassen ist eine hydrogeochemisch-genetische Charakterisierung des „Salzwasserstromes“ sowie des Übergangsbereiches zu den salinar unbeeinflussten Süßwässern möglich.

Der „Salzwasserstrom“ zeigt einen zonalen Aufbau (siehe Abb. 2). Im Kernbereich befinden sich salinare Wässer, die der Geneseklasse I32 (gealterte, erdalkalisierte salinare Wässer) zugeordnet werden. Sie werden von salinaren Regenerationswässern der Geneseklasse I33 umgeben. Die Wässer dieser Geneseklassen bilden die „Salzwasserzone“. Daran schließen sich salinar beeinflusste statische Wässer der Geneseklasse G31 an. Anschließend folgen salinar beeinflusste alte Neubildungswässer der Geneseklasse F31. Die Geneseklassen der „inneren Salinarbeeinflussungszone“ sind stabil und werden durch Neubildungsprozesse nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu folgen nach außen hin Grundwässer, die die „äußere Salinarbeeinflussungszone“ bilden. Dabei handelt es sich um salinar beeinflusste gealterte bzw. junge Neubildungswässer der Geneseklassen E31 und D31. Diese Wässer zeigen eine mehr oder weniger starke Beeinflussung durch Neubildungsprozesse. An die „äußere Salinarbeeinflussungszone“ schließen sich salinar unbeeinflusste Wässer der Geneseklassen E11, E21, D11 sowie D21 an. Die Zonalität der Geneseklassen bleibt bei stationären hydrodynamischen Verhältnissen stets erhalten. Eine verstärkte bzw. verringerte Grundwasserneubildung bewirkt lediglich Mächtigkeitsänderungen der äußeren und inneren Salinarbeeinflussungszone.

Bei der Beobachtung von Zeitreihen treten diese Phänomene besonders deutlich hervor (siehe auch Abb. 3 und 4). Der Zeitraum zwischen 2004 und 2009 war im Betrachtungsgebiet durch eine verminderte Niederschlagstätigkeit und demzufolge eine verringerte Grundwasserneubildung charakterisiert. Die Mächtigkeit der jungen unbeeinflussten Neubildungswässer verringerte sich auf ca. 10 m. Danach folgten ca. 10 m salinar beeinflusste junge Neubildungswässer (Geneseklasse D31) und ca. 10 m salinar beeinflusste alte Neubildungswässer (Geneseklasse F31). Die Mächtigkeit der salinaren Wässer der „Salzwasserzone“ (salinare Regenerationswässer und gealterte erdalkalisierte salinare Wässer der Geneseklassen I33 und I32) erreichte in der Summe noch einmal ca. 10 m. Im Ergebnis der verstärkten Niederschläge ab 2010 und der damit einhergehenden Intensivierung der Grundwasserneubildung vergrößerte sich die Lamelle der jungen Neubildungswässer deutlich und erreichte 2014 eine Mächtigkeit von ca. 25 m. Daran schließen sich noch einmal ca. 5 m salinar beeinflusste junge Neubildungswässer an. Die Mächtigkeit der salinar beeinflussten alten Neubildungswässer ist auf ca. 3 m reduziert. Die Mächtigkeit der salinaren Wässer der „Salzwasserzone“ ist mit ca. 7 m relativ konstant.

Die Mächtigkeitschwankungen innerhalb der äußeren und inneren Salinarbeeinflussungszone in Abhängigkeit von einer verstärkten bzw. verminderten Grundwasserneubildung können durch Diffusionsprozesse, die auf den Grundwasserchemismus einwirken und zu Veränderungen der Ionenzusammensetzung der Grundwässer führen, erklärt werden. Das Konzentrationsgefälle zwischen den Süß- und den salinaren Wässern stellt die entscheidende Steuerungsgröße für diese Prozesse dar. Die Veränderungen der Ionenzu-

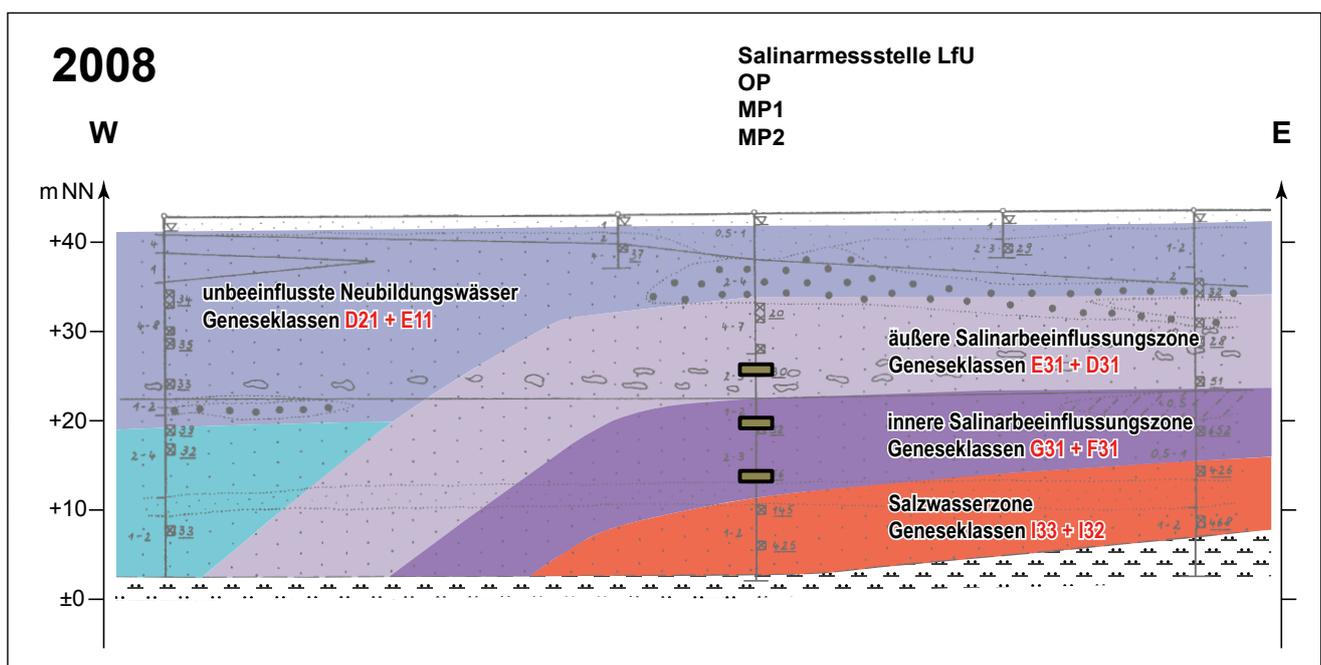


Abb. 2: Zonalität des „Salzwasserstromes“ im Bereich Müllrose (Geologie aus KALATZ & DIETTERLE 1988)
 Fig. 2: Hydrochemical zonation of the salt stream of the area of Müllrose

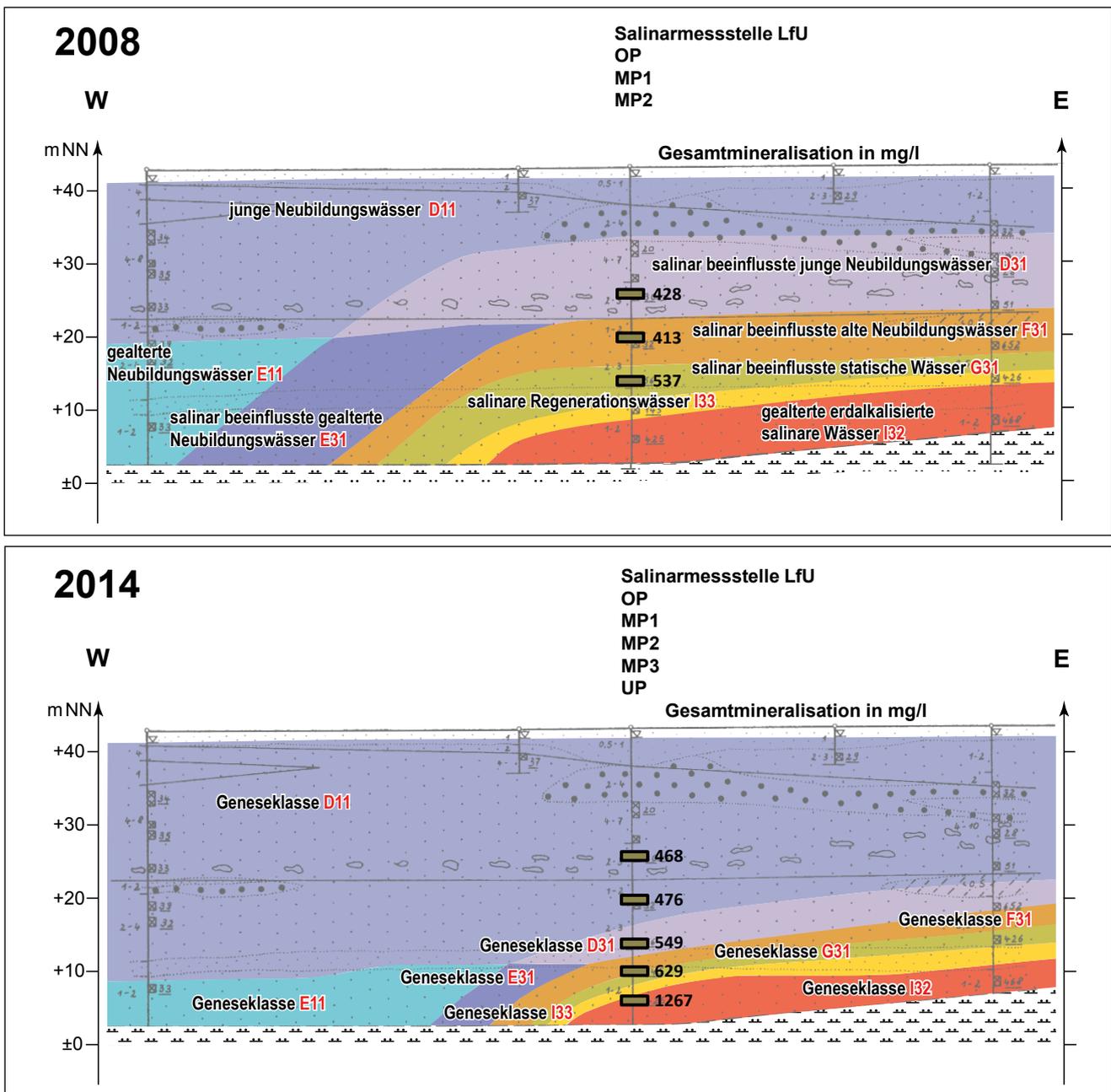


Abb. 3: Beobachtete maximale und minimale vertikale Ausdehnung der Genese Klassen im Bereich des „Salzwasserstromes“ (Geologie aus KALATZ & DIETTERLE 1988)

Fig. 3: Observed maximal and minimal vertical extent of the genesis classes within the salt stream

sammensetzung des Grundwassers können durch verschiedene hydrogeochemisch-genetischen Modelle beschrieben werden (z. B. durch Parametermodelle wie das Geologische Grundverhältnis GGV nach RECHLIN 2008 bzw. Genese Klassen nach HOTZAN 2010). Die weitestgehend konstante Mächtigkeit der „Salzwasserzone“ ist ein Hinweis auf die stabilen Speisungsverhältnisse des Salzwasserstroms. Die Menge der aufdringenden salinaren Wässer ist konstant und wird nicht durch Neubildungsprozesse beeinflusst. Die hydrodynamischen Auswirkungen einer verstärkten Grundwasserneubildung sind im Bereich des Berliner Urstromtales marginal.

Bei der Auswertung des Parameters „Gesamtmineralisation“ der untersuchten Wasseranalysen zeigte sich erwartungsgemäß eine Zunahme der Werte vom Hangenden zum Liegenden. Ebenfalls wurde aber auch eine Zonalität deutlich, die über den gesamten Beobachtungszeitraum von 12 Jahren weitestgehend konstant blieb. Der Mineralisierungsgrad der Grundwasser bewahrte unter stationären hydrodynamischen Bedingungen seine Stabilität unabhängig von den Neubildungsprozessen und der damit in Zusammenhang stehenden Veränderung der Ionenzusammensetzung der Grundwässer. Enorme Bedeutung hat dieses Phänomen für geophysikalische Untersuchungsarbeiten. Geoelektrische und elektromagneti-

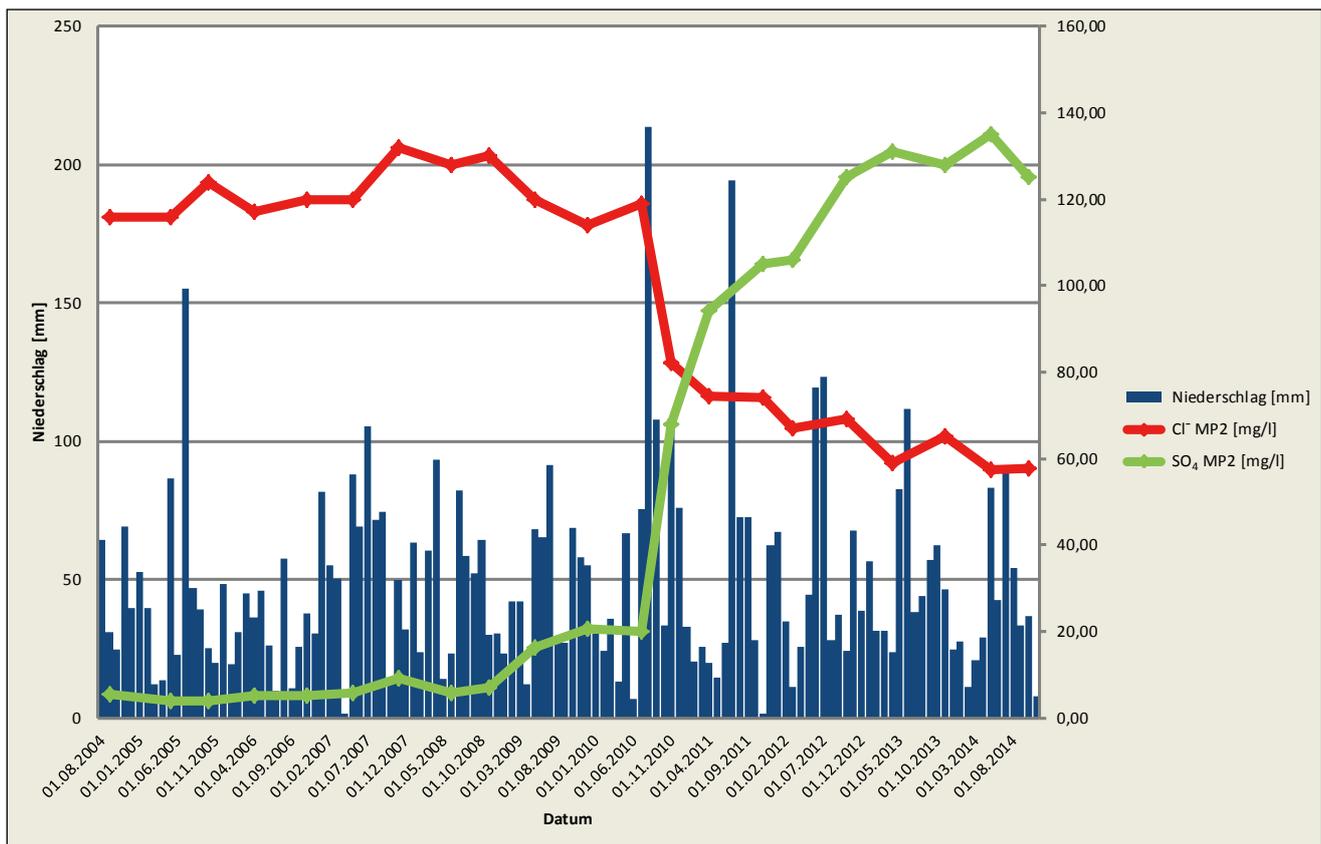


Abb. 4: Zeitreihen der Chlorid (Cl⁻)- und Sulfat (SO₄)-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Niederschlag in der Messstelle MP2
 Fig. 4: Time series of the concentrations of chlorides and sulfates in dependency of precipitation from the groundwater measuring point MP2

sche Verfahren erzeugen unter den oben genannten Prämissen bei Wiederholungsmessungen identische Widerstandsbilder. Für ein Salinarmonitoring, d. h., die Untersuchung der zeitlich-räumlichen Variabilität der salinären Wässer, sind diese Verfahren im Bereich Müllrose deshalb nicht geeignet.

Hydrogeochemisch-genetische Karte zur Darstellung der Salzwasserverbreitung im Raum Müllrose

Die hydrogeochemisch-genetische Karte für den saalekaltzeitlichen GWL wurde zur Charakterisierung des unbeeinflussten Ausgangszustandes der Verbreitung von Süß- und Salzwässern im Rahmen des Projektes zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) Beeskow-Birkholz erarbeitet und in HOTZAN & VOSS (2013) publiziert. Die Abbildung 5 zeigt eine Ausschnittsvergrößerung für den Bereich Müllrose. Die dieser Karte zugrunde liegenden methodischen Ansätze wurden in HOTZAN (2012) beschrieben. Kartierungseinheiten sind die „Geneseklassen“ für Süß- und salinare Wässer, die im Ergebnis der Auswertung der Analysendaten mit dem Softwareprogramm GEBAH 1.1 (RECHLIN et al. 2010) und der in HOTZAN (2010, 2011) beschriebenen Methodik ermittelt wurden.

Daten aus geophysikalisch vermessenen Bohrungen (VOSS & KLINCK 2010) liefern zusätzliche Stützstellen für die Ab-

grenzung der Geneseariale. Die aus den Bohrlochmessungen ermittelten Natriumchlorid (NaCl)-Äquivalente können mit hinreichender Genauigkeit spezifischen „Geneseklassen“ zugeordnet und als Hilfspunkte für die Kartierung genutzt werden.

Aus der hydrogeochemisch-genetischen Karte werden der Charakter und der Entwicklungsgrad der Grundwässer im betrachteten GWL deutlich. Die Speisungsbedingungen können rekonstruiert sowie Aufstiegsbahnen und die Verbreitung salinärer Wässer in den süßwasserführenden GWL verdeutlicht werden.

Die hydrogeochemisch-genetische Kartierung des Grundwasserchemismus stellt eine Momentaufnahme in einem dynamischen System dar. Änderungen der Grundwasserdynamik, z. B. durch anthropogene Eingriffe (Wassergewinnungsanlagen), können zu Veränderungen der Speisungsbedingungen in den GWL führen und gravierende Veränderungen im Grundwasserchemismus hervorrufen.

Mit der Merz-Neubrucker Rinne in Kombination mit der Fürstenwalde-Gubener Störungszone sind im Betrachtungsgebiet die für einen Salzwasseraufstieg notwendigen vertikalen Strukturelemente gegeben. Davon ausgehend verbreiten sich die salinären und salinar beeinflussten Wässer, in der Karte durch spezifische „Geneseklassen“ charakterisiert, im

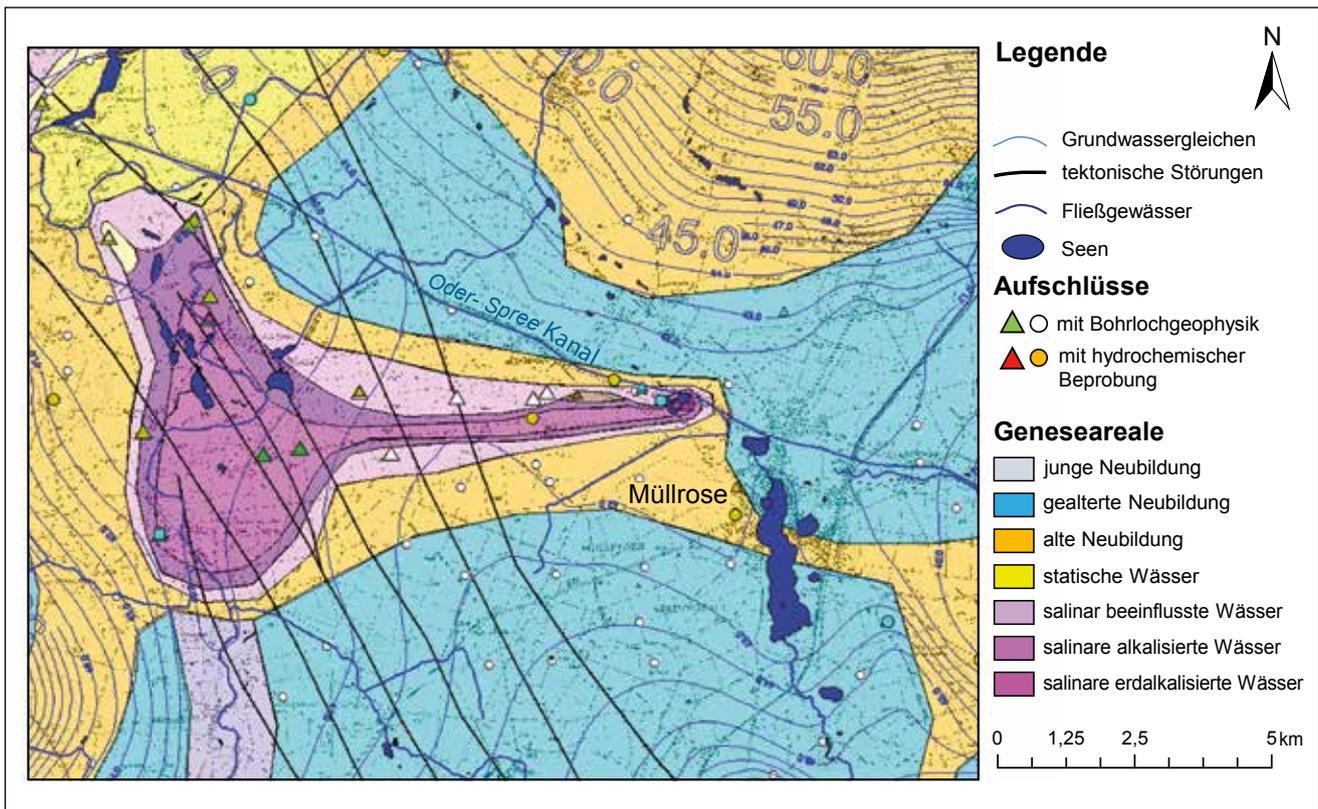


Abb. 5: Hydrogeochemisch-genetische Karte für den Bereich Müllrose
 Fig. 5: Hydrochemical-genetic map of the region of Müllrose

saale- bis weichselkaltzeitlichen Hauptgrundwasserleiter. Die intrudierten Salzwässer bilden „Salzwasserströme“ und bewegen sich in bzw. gegen die Grundwasserfließrichtung zu den Vorflutern. Mit der hydrogeochemisch-genetischen Kartierung gelingt es, die Ausbreitungskinetik der salinaren Wässer zu visualisieren.

Zusammenfassung

Das Auftreten geogen-salinärer Grundwässer im Niveau des unbedeckten quartären HGWL im Bereich Müllrose wurde erstmals bei hydrogeologischen Untersuchungsarbeiten 1986/87 festgestellt. Das im Rahmen dieser Untersuchungsarbeiten errichtete Messstellennetz gestattete die Entnahme einer Vielzahl von Wasseranalysen aus mehreren Niveaus innerhalb des unbedeckten HGWL. Durch die Übernahme einer Mehrfachmessstelle in das Sondermessnetz Salinar des LfU Brandenburg wurde das Monitoring fortgesetzt und eine kontinuierliche Datenreihe für einen Zeitraum von 12 Jahren geschaffen. Im Ergebnis der Auswertung der Daten mit Hilfe des Softwareprogramms GEBAH 1.1 (RECHLIN et al. 2010) und der Ermittlung von Geneseklassen konnte die Internstruktur des Salzwasserstromes und ihre zeitlich-räumliche Variabilität in Abhängigkeit von der Grundwasserneubildung beschrieben werden.

Durch die Übertragung der aufschlusspezifischen Punktdaten in die Fläche in Kombination mit der Darstellung der

Grundwasserdynamik sowie geologischen Strukturelementen, die hydraulische Verbindungen zwischen den einzelnen GWL schaffen, wurde eine hydrogeochemisch-genetische Karte erzeugt. Aufgrund der hohen Aufschlussdichte im Betrachtungsgebiet gelang eine flächenhafte Darstellung der Verbreitungsareale von Wässern mit gleichem hydrochemischem Entwicklungsgrad. Diese Karte kann als Grundlage für weiterführende Untersuchungsarbeiten dienen.

Summary

The occurrence of geogenic saline groundwater in the depth of the uncovered Cenozoic freshwater aquifers in the region of Müllrose was first found during hydrogeological field studies in 1986–87. These investigations included the establishment and development of an extended network of groundwater monitoring wells which allows the abstraction of groundwater samples from different groundwater levels within the uncovered main aquifer. On the basis of a multiple-measurement well which is part of the groundwater monitoring network in relation to geogenic groundwater salinization of the Brandenburg State Authority of Environment (LfU Brandenburg) continuous measurements of hydrochemical parameters were conducted over a period of 12 years. The data interpretation by the software package GEBAH 1.1 (RECHLIN et al. 2010) and the subsequent determination of hydrochemical genesis classes showed that the

internal structure and the spatial and temporal variability of the salt stream are mainly controlled by the recharge process. The spatial representation of point data in combination with information to groundwater dynamics and hydrogeological connections between the different aquifers provide the basis of a hydrochemical-genetic map of the region of Müllrose. The relatively high density of exploration wells in the study area allowed visualizing the spatial distribution of groundwater with the same hydrochemical development. The map serves as the basis for further investigation.

VOSS, TH. & W. KLINK (2010): Interpretationsbericht zur Komplexauswertung von Alt-Bohrlochmessdaten im Bereich des Erlaubnisfeldes Beeskow-Birkholz. – Bericht Bohrlochmessung Storkow GmbH i. A. der Vattenfall Europe Mining AG, 42 S., Storkow (unveröff.)

Literatur

HANNAPPEL, S., HERMSDORF, A., POHL, S., RIETZ, CH. & R. KOSSECK (2007): Aufbau von Sondermessnetzen zur Überwachung der geogenen Grundwasserversalzung in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **14**, 1/2, S. 4–14

HOTZAN, G. (2010): Genetische Grundwassertypen der Binnenversalzung, ihre Klassifizierung und Erscheinungsformen. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **17**, 1/2, S. 39–53

HOTZAN, G. (2011): Die Formierung und Entwicklung des Chemismus natürlicher Grundwässer, ihre Widerspiegelung in hydrogeochemischen Genesemodellen sowie ihre Klassifizierung auf hydrogeochemisch-genetischer Grundlage. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **18**, 1/2, S. 77–91

HOTZAN, G. (2012): Ein Beitrag zur Methodik der hydrogeochemisch-genetischen Kartierung von Grundwässern in den Lockergesteinsgrundwasserleitern des Norddeutschen Tieflands. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **19**, 1, S. 65–80

HOTZAN, G. & TH. VOSS (2013): Komplexe hydrogeochemisch-genetische Kartierung zur Einschätzung der Salzwassergefährdung pleistozäner und tertiärer Grundwasserleiter im Raum Storkow-Frankfurt (Oder)-Eisenhüttenstadt. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **20**, 1/2, S. 63–82

KALATZ, R. & J. DIETTERLE (1988): Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit GW-Vorratsnachweis Müllrose 1988. – Bericht VEB Hydrogeologie Nordhausen, BT Berlin, 40 S., 10 Anl., Nordhausen (unveröff.)

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

Anschrift des Autors:

Dipl.-Geol. Gerhard Hotzan
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe
Brandenburg
Dezernat Hydrogeologie
Inselstraße 26
03046 Cottbus
gerhard.hotzan@lbgr.brandenburg.de

Brandenburg. geowiss. Beitr.	Cottbus	24 (2017), 1/2	S. 111–128	16 Abb., 5 Tab., 22 Lit.
------------------------------	---------	----------------	------------	--------------------------

Das Salzwatermonitoring im Land Brandenburg

The salt water monitoring in Brandenburg

ANGELA HERMSDORF & NORMAN PYRITZ

1 Veranlassung, Zielsetzung

Im Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU) wird seit 2007 ein Monitoring (HANNAPPEL et al. 2007) betrieben, dass die Entwicklung salinärer Tiefenwässer, speziell deren Einfluss auf die wasserwirtschaftlich relevanten Hauptgrundwasserleiter betrachtet. Neben diesem Monitoring liegen auch im Rahmen von Wasserwerksrecherchen Informationen über salinar beeinflusste Brunnen vor, deren hydraulische Einzugsgebiete auf hoch mineralisierte geogene Wässer untersucht und bewertet wurden (FUGRO 2013, HYDOR 2015). Des Weiteren beschäftigt sich das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (LBGR) intensiv mit den Ursachen und Bedingungen der Migration bzw. Intrusion salinärer Wässer und deren Aufstiegsbahnen aus dem Untergrund in das Süßwasserstockwerk. Besonderes Augenmerk liegt hier bei der Früherkennung dieser Tiefenwässer.

Im Rahmen einer Masterarbeit (PYRITZ 2016) wurde eine Auswertung langjähriger Analysereihen von 2007–2015 zum Salzwassermessnetz Brandenburgs vorgenommen, in der hauptsächlich ein methodischer Vergleich zur hydrogeochemisch-genetischen Bewertung von Grundwässern in Brandenburg sowie statistische Betrachtungen im Fokus standen. Im Ergebnis dessen sollte die weitere Fortschreibung der Überwachung dieser salinaren Wässer geprüft werden. Im vorliegenden Beitrag werden die Erkenntnisse dieser Masterarbeit dargestellt bzw. zusammengefasst.

2 Charakterisierung des landesweiten Untersuchungsgebietes

Der Aufbau des salinaren Messnetzes begann im Jahr 2005 und die damit verbundene Verteilung der Grundwassermessstellen (GWM) im Land erfolgte nach den geologischen Hinweisen zum Auftreten von salinaren Wässern aus der Literatur und deren Bedeutung auf wasserwirtschaftlich genutzte Grundwasserleiter (GWL). So hielt man sich bei der Auswahl der Gebiete für das Salzwatermonitoring nach

an die Verbreitung der oberflächennahen Versalzung aus der Rupelton-Karte des Atlases der Geologie von Brandenburg (STACKEBRANDT & MANHENKE 2002; Abb. 1) und an bereits bekannte Gebiete aus den hydrogeologischen Erkundungen. HANNAPPEL et al. (2007) haben in Verbindung mit der regionalen Verteilung der GWM und den hier auftretenden salinaren Erscheinungen die Salzzonen entwickelt.

In diesem Artikel wird auf eine Betrachtung der geologischen Situation zur Versalzung im Land Brandenburg verzichtet, dazu siehe den Beitrag von BROSE & HERMSDORF in diesem Band. Dafür soll jedoch näher auf die klimatischen Gegebenheiten eingegangen werden.

Für den Beobachtungszeitraum von 1961 bis 1998 konnte nachgewiesen werden, dass die mittlere Tagestemperatur um ca. 1 °C gestiegen ist, wobei der Anstieg im Winterhalbjahr (+1,6 °C) deutlich höher ausfiel als im Sommerhalbjahr (+0,6 °C) (GERSTENGARBE 2003). Weiterhin ist eine Reduzierung der Sickerwassermenge auf etwa 75 % der Gesamtfläche Brandenburgs, besonders in Niederungsgebieten (-100 mm/a) beobachtet worden. Diese Erkenntnis beruhte auf der Auswertung von ca. 1 000 GWM des LfU. Hierbei zeigten die langjährig beobachteten Grundwasserstände einen überwiegend schwachen Abfall, der oft anthropogen bedingt war (z. B. durch die Einstellung der Rieselfeldbewirtschaftung). In bestimmten Regionen konnten anthropogene Einflüsse aber auch einen Anstieg der Grundwasserstände zur Folge haben (z. B. durch Einstellung der Entwässerung von Tagebauen). Des Weiteren wurden Absenkungen beobachtet, die keine direkte anthropogene Ursache hatten (GERSTENGARBE et al. 2003) und somit auf natürliche klimatische Veränderungen zurückzuführen sein könnten. Für den Zeitraum von 2001 bis 2055 wird mit einer Temperaturerhöhung von 1,4 °C gerechnet. Dies hätte zur Folge, dass die Sickerwassermenge im langjährigen Mittel um mehr als die Hälfte (57 %) gegenüber heute auf 46 mm/a abnimmt. Die weitere Verschiebung der Niederschläge bei gleichzeitig zunehmender Verdunstung wird sich vor allem in den Sommermonaten in einem weiteren Absinken der Grundwasseroberfläche, rückläufigen Abflüssen in Fließgewässern,

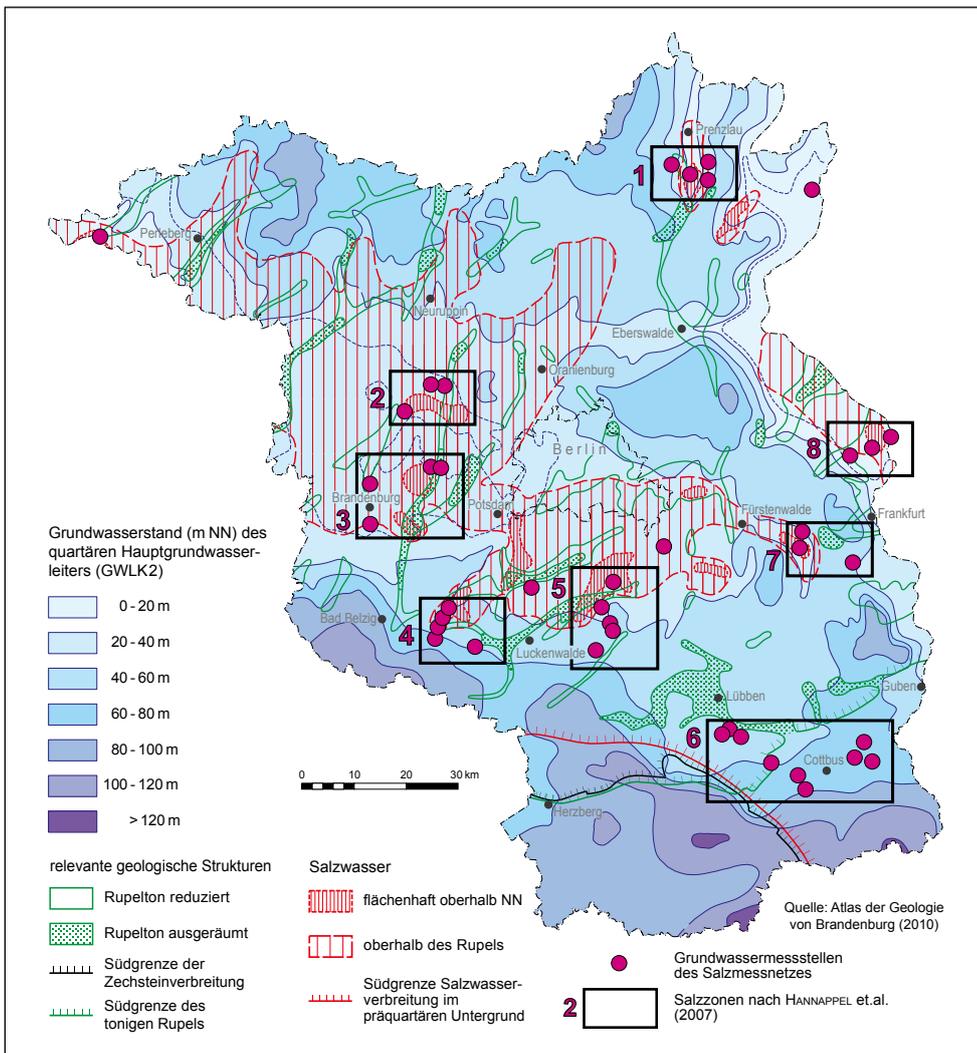


Abb. 1:
Rupelton-Fehlstellen mit den
untersuchten Standorten im
Land Brandenburg
(SCHIRMEISTER 1996,
verändert durch PYRITZ 2016)

Fig. 1:
Study areas in Brandenburg
without Rupelian
(SCHIRMEISTER 1996,
changed by PYRITZ 2016)

fallenden Seewasserpegeln sowie den damit verbundenen Problemen bei der Wasserverfügbarkeit und der Wasserqualität widerspiegeln.

Einen Überblick hinsichtlich der klimatischen Situation liefert der Bericht des LfU zur Grundwasserbeschaffenheit (LfU 2015, im Weiteren Gütebericht genannt). Im Zeitraum von 1991 bis 2012 wurde für Brandenburg eine mittlere jährliche Niederschlagshöhe von 591 mm ermittelt. In 12 von 22 Jahren konnten mehr als 591 mm Niederschlag verzeichnet werden (Abb. 2).

Mit einer Niederschlagshöhe von 772 mm war das Jahr 2007 das niederschlagsreichste Jahr im Betrachtungszeitraum (Abb. 3). Jedoch entfielen 30 % der Jahressumme auf wenige Starkregenereignisse, die nur zu einem geringen Anteil zur Grundwasserneubildung beigetragen haben. Besonders niederschlagsreiche Gebiete im Land Brandenburg sind die Prignitz, die Niederlausitz und der Barnim (Abb. 2).

Mit Hilfe des Modellsystems ArcEgmo (PFÜTZNER 2012) wurden u. a. die Grundwasserneubildungsraten für den Zeitraum von 1991 bis 2010 berechnet. Etwa 8 % der Gesamtfläche Brandenburgs weisen negative Grundwasserneubildungsraten auf. Die langjährige durchschnittliche Zehrung aus dem

Grundwasser durch die Verdunstung und Exfiltration ist in diesen Gebieten also größer als die Sickerwasserrate. Außerhalb dieser „wasserhaushaltlichen Zehrflächen“ beträgt die mittlere Grundwasserneubildungsrate 82 mm/a. Bis zu 35 % der jährlichen Niederschlagssumme, hauptsächlich in den Wintermonaten, können zur Grundwasserneubildung führen, im Landesdurchschnitt werden aber nur 12 % erreicht. Hohe Grundwasserneubildungsraten sind vor allem in Bereichen mit Flurabständen größer 2 m und landwirtschaftlich genutzten Gebieten charakteristisch. In der Prignitz, der Niederlausitz und im Barnim werden so beispielsweise hohe Grundwasserneubildungsraten erreicht (Abb. 4).

Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, dass insbesondere Temperaturerhöhungen und Verschiebungen der Niederschlagsmengen zu beobachten sind. Diese Entwicklungen veränderter klimatischer Einflüsse können durch eine Verringerung des Grundwasserdruckpotenzials, also der „Auflast“ des Grundwassers möglicherweise eine Zunahme der Migration von hoch mineralisierten Tiefenwässern in die oberflächennahen Süßwasser führenden GWL bewirken. Daraus resultiert ein Gefährdungspotenzial für die wasserwirtschaftlich relevanten Grundwasserdargebote.

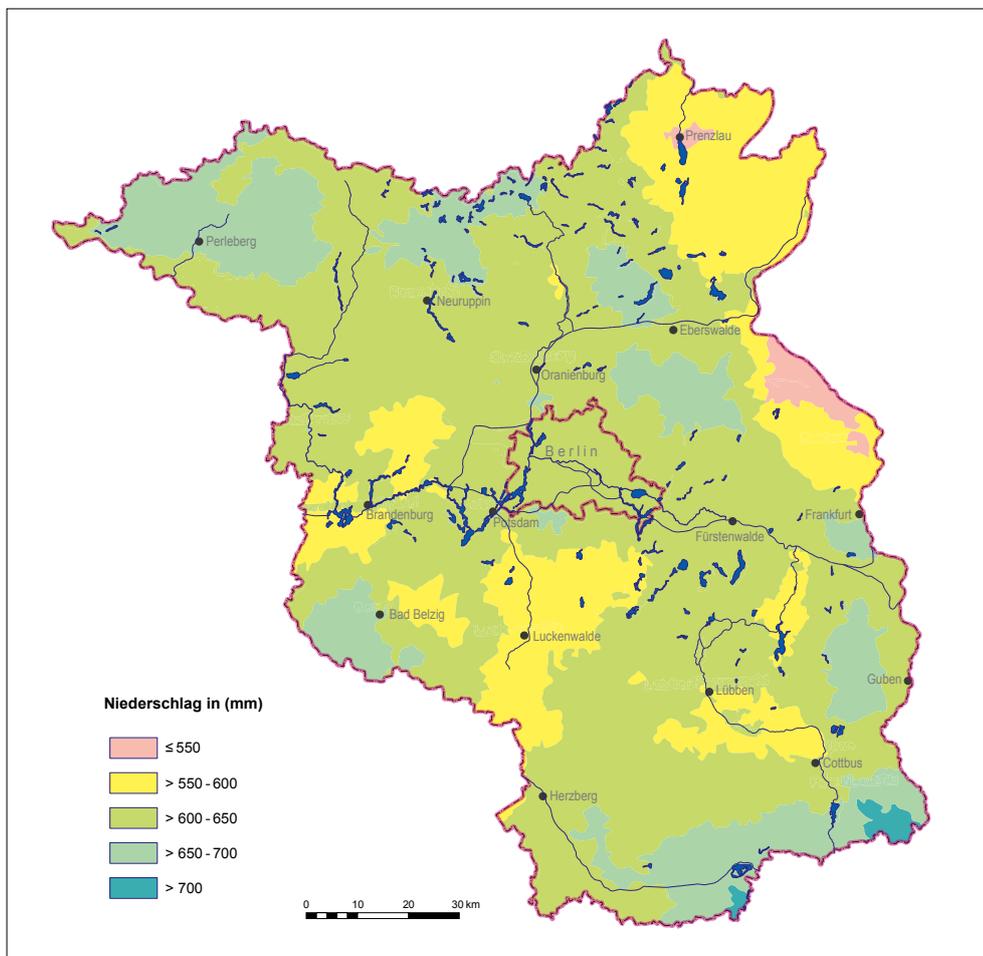


Abb. 2: Räumliche Verteilung des Niederschlags (mm/a), Mittelwerte der Zeitreihe 1991–2010 (aus LfU 2015)

Fig. 2: Spatial distribution of precipitation (mm/a), mean values of time series 1991–2010 (LfU 2015)

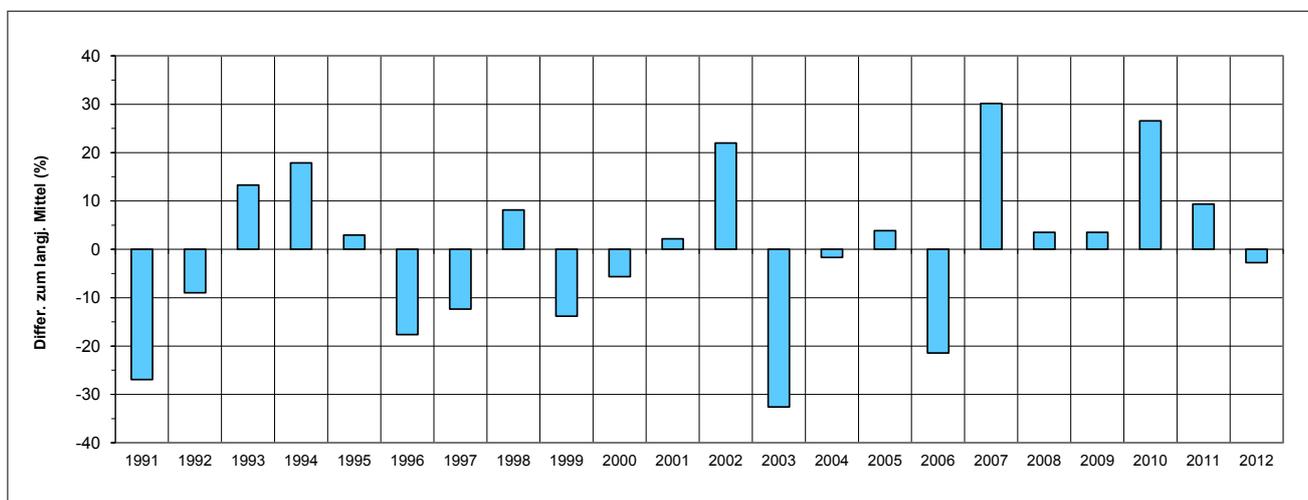


Abb. 3: Abweichungen der jährlichen Niederschlagshöhen vom langjährigen Mittel der Reihe 1991–2012 (%) nach LfU (2015)

Fig. 3: Deviations of precipitation heights from longtime average of 1991–2012 (%) after LfU (2015)

3 Methodische Ansätze zur hydrogeochemisch-genetischen Bewertung von Grundwässern

Durch PYRITZ (2016) wurden verschiedene hydrogeochemisch-genetische Auswertemethoden für das Grundwasser mit dem Ziel gegenübergestellt, die Praktikabilität und Zu-

verlässigkeit der Methoden zur Interpretation einer salinaren Beeinflussung zu analysieren.

Für eine Charakterisierung der Wassertypen wird in der Hydrogeologie häufig die Darstellung des PIPER-Diagramms (PIPER 1944) gewählt. Es handelt sich hierbei um eine Verhältnisdarstellung relativer Häufigkeiten (Abb. 5). FURTAK &

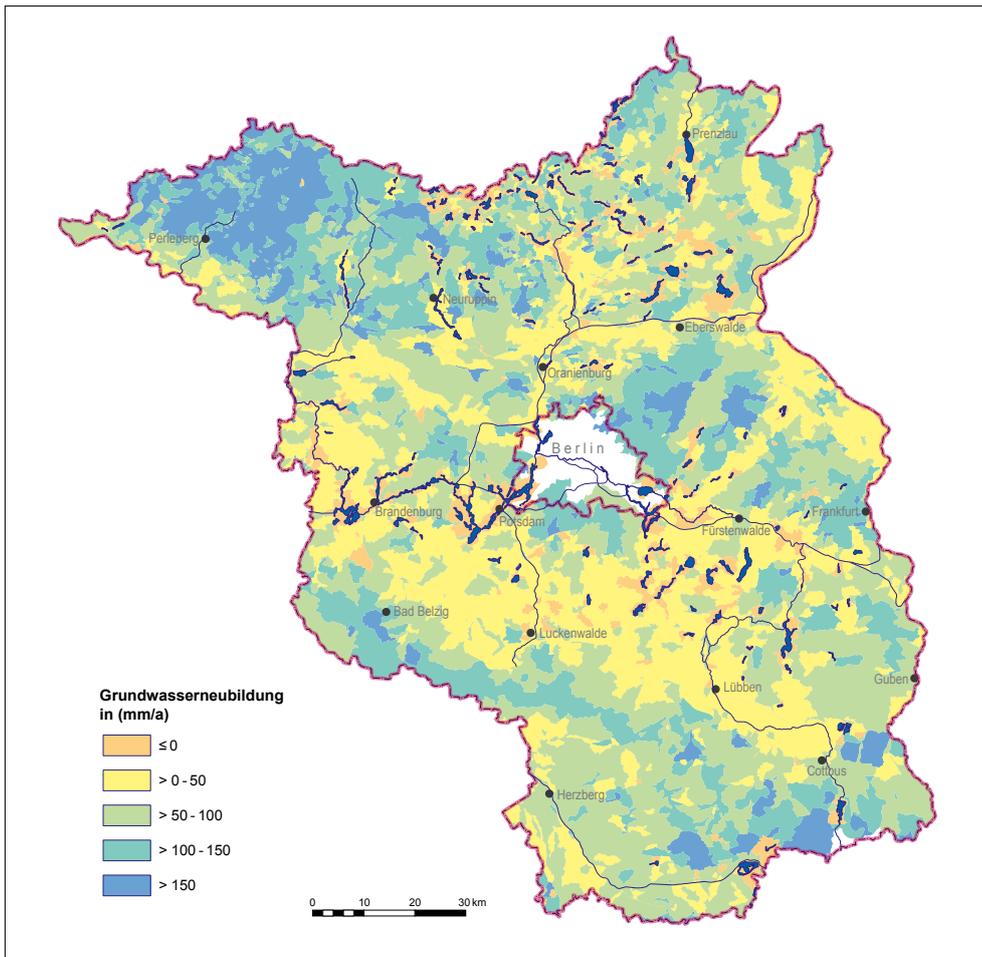


Abb. 4:
Räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung (mm/a), Mittelwerte der Zeitreihe 1991–2010 aus LfU (2015)

Fig. 4:
Spatial distribution of groundwater recharge (mm/a), mean values of time series 1991–2010 after LfU (2015)

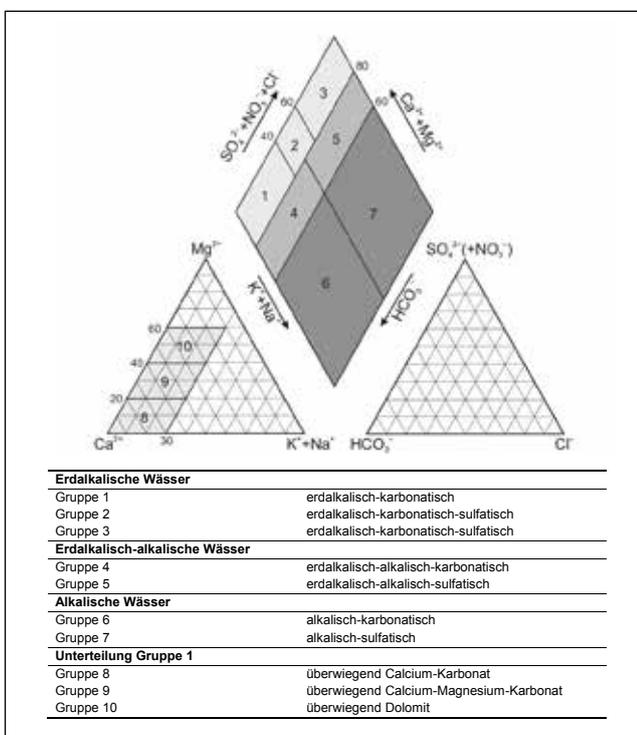


Abb. 5: PIPER-Diagramm nach PIPER (1944) und FURTAK & LANGGUTH (1967)

Fig. 5: Piper diagram according to PIPER (1944) and FURTAK & LANGGUTH (1967)

LANGGUTH (1967) haben eine Klassifizierung innerhalb des PIPER-Diagramms nach den Gehalten an Erdalkalien (Ca^{2+} , Mg^{2+}), Alkalien (K^+ , Na^+), Chlorid (Cl^-), Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) in insgesamt zehn Gruppen erarbeitet, wobei sich die Plausibilität der Ergebnisse nach dem Ionenbilanzfehler ($\leq 5\%$) richtet.

Im Ergebnis dieser Methodik bekommt man eine Einschätzung zur Zusammensetzung des Grundwassers am Standort.

Eine weitere Methode ist das Genesemodell des LBGR (RECHLIN 1997, 2008), welches durch das Programm GEBAH (RECHLIN et al. 2010; siehe Beitrag BROSE in diesem Band) berechnet und visualisiert wird. Weitere Informationen für eine genetische Bewertung erhält man aus den hypothetischen Karbonat-, Sulfat- und Chlorid-Salzen. Entsprechend der prozentualen Anteile in der Lösung können vor allem Aussagen zu den Entwicklungen in der Zusammensetzung des Grundwassers getroffen werden.

Die Zuordnung und Bewertung der hypothetischen Berechnungssalze wird in besonderem Maße u. a. durch das Genetische Grundverhältnis (GGV; RECHLIN 2008) erweitert. Dieses wichtige Salzverhältnis wird in allen hydrogeochemisch-genetischen Grundtypen berechnet und ermöglicht selbst bei einer hohen Verdünnung eine relativ zuverlässige Aussage zur Anwesenheit salinärer Wässer im betrachteten GWL.

Aus Bewertungen wie Häufigkeitsverteilungen, statistischen Kennwerten, Spannweitendiagrammen und Trendentwicklungen ergeben sich weitere Informationen zum hydrogeochemischen Hintergrund des Grundwassers. Die Ergebnisse aus dem Salzwassermonitoring wurden denen des Güteberichts (LfU 2015) gegenübergestellt. Es sollte geklärt werden, in wie weit sich die statistischen Kennwerte aus den Betrachtungen des Güteberichtes von denen des Salinarmonitorings unterscheiden lassen.

4 Parameterbezogene Auswertung, Trendbetrachtung

In PYRITZ (2016) selbst sind die Hauptparameter (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_x^- -Verbindungen, PO_x^- -Verbindungen, Bromid (Br^-), Eisen (Fe^{2+}), Mangan (Mn^{2+}) und die vor Ort-Parameter Leitfähigkeit, Sauerstoff, Redoxpotenzial und pH-Wert einer statistischen Betrachtung unterzogen worden. An dieser Stelle soll nur auf ausgewählte Parameter der salinar beeinflussten Grundwässer eingegangen werden sowie eine Gegenüberstellung zu den Ergebnissen des Güteberichts (LfU 2015) erfolgen.

Es wurden aus ca. 550 Analysen des Salzwassermessnetzes die einzelnen Parameter statistisch auf die GWL bezogen ausgewertet (z. B. Medianwert, Spannweiten). Entsprechende Informationen sind der Tabelle 1 zu entnehmen, wobei aber nur die Tiefenwässer prägende Parameter aufgeführt wurden. Es ist erkennbar, dass bei allen Parametern die Konzentrationen mit der Tiefe zunehmen. Insbesondere trifft das natürlich auf die Parameter Na^+ , Ammonium (NH_4^+), Cl^- , Br^- und die Leitfähigkeit zu. Nur die Konzentration von SO_4^{2-} nimmt vom GWL 1 bis GWL 3 ab. Abbildung 6 und 7 geben in Übersichtskarten die gemessenen Leitfähigkeits- und Chlorid-Werte wieder. Aufgrund der chemischen Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Chlorid treten folgerichtig gleiche Verhaltensmuster in der Verteilung der jeweiligen Konzentrationen auf. Höhere Chlorid-Konzentrationen können auch anthropogene Ursachen haben, so dass eine detaillierte Auswertung hinsichtlich der Unterscheidung von geogenen Einflüssen und anthropogenen Stoffeinträgen erforderlich ist. Ein Lösungsansatz hierzu wird im Gütebericht 2015 zwischen der JAHNKE-Methode (2011) und dem Genesemodell (RECHLIN 2008) diskutiert.

Parameter	Einheiten	Median GWL 1	Median GWL 2	Median GWL 3	Spannweiten GWL 3	Grenzwert TrinkwV (2013)	Gütebericht Median Wald
elektrische Leitfähigkeit	$\mu S/cm$ bei 25 °C	784,5	689,5	1518	347–19 402	2 790	350–550
Redoxpotential	mV	106	103	104	44–202		400 bis -200
Kalium	mg/l	1,99	2,415	5,2	1,6–37	12	2
Natrium	mg/l	36,05	34,15	115	21–3592	200	20
Magnesium	mg/l	10,15	10,85	11,75	6,4–191,2	50	7,5
Chlorid	mg/l	64,65	49,5	133	5,5–6726	250	25
Sulfat	mg/l	105	72,5	12,3	5–697	250	100
Ammonium	mg/l	0,37	0,49	0,81	0,3–4,5	0,5	0,1
Bromid	mg/l	0,14	0,22	0,28	0,1–6,3	0,01	kein Wert

Tab 1: Übersicht zu den Medianwerten und Spannbreiten ausgewählter Parameter

Tab.1: Overview of mean values and range of parameters

Prozesse	Reaktion	Eh-Wert Prozessbeginn
Nitrat-Reduktion	$2 NO_3^- + 12 H^+ + 10 e^- \rightarrow N_2 + 6 H_2O$	600 bis 300 mV
Mangan-Reduktion	$MnO_2(s) + 4 H^+ + 2 e^- \rightarrow Mn^{2+} + H_2O$	500 bis 220 mV
Eisen-Reduktion	$Fe(OH)_3(s) + 3 H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3 H_2O$	400 bis 180 mV
Sulfat-Reduktion	$SO_4^{2-} + 10 H^+ + 8 e^- \rightarrow H_2S + 4 H_2O$	100 bis -200 mV
Methan-Reduktion	$CO_2 + 8 H^+ + 8 e^- \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$	-150 bis -280 mV

Tab. 2: Abfolge der Redoxreaktionen in Abhängigkeit vom Redoxpotential nach OTTOW (1981)

Tab. 2: Sequence of redox reactions depending of the redox potential, according to OTTOW (1981)

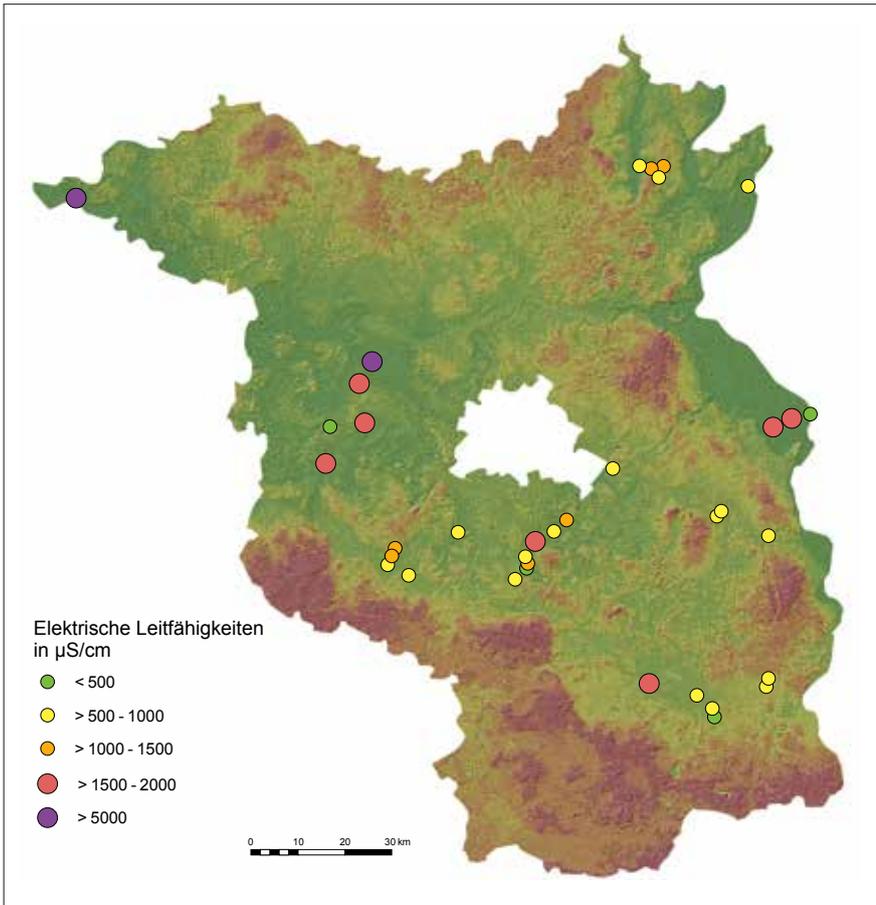


Abb. 6:
Konzentrationen der spezifischen
elektrischen Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
an den untersuchten
Grundwassermessstellen im
Land Brandenburg

Fig. 6:
Measured specific electric
conductivity at the monitoring
wells in Brandenburg

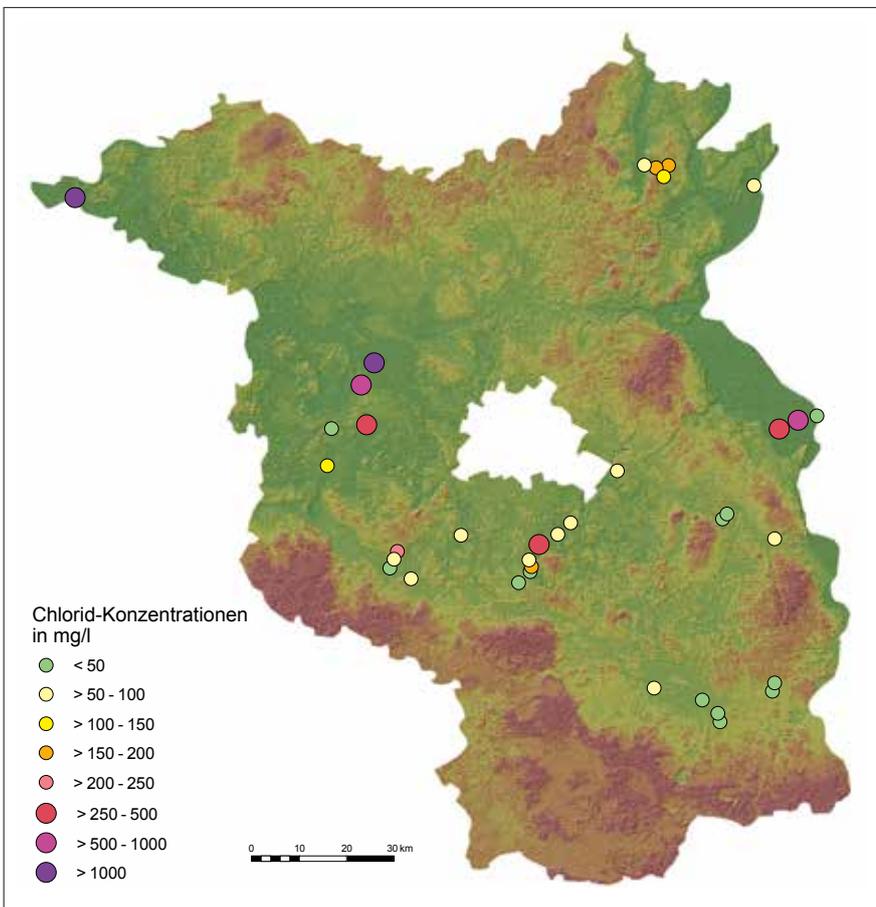


Abb. 7:
Chlorid-Konzentrationen (mg/l)
der untersuchten
Grundwassermessstellen
in Brandenburg

Fig. 7:
Chloride concentration (mg/l)
at the monitoring
wells in Brandenburg

Zur Beschreibung der Milieubedingungen im Grundwasser ist das Redoxpotential (Eh-Wert) ein wichtiger Parameter. Auf Grund der organischen Verbindungen im Boden und im Grundwasser wird der Sauerstoff (O₂)-Gehalt häufig „aufgezehrt“, was mit einer Verringerung des Redoxpotenzials einhergeht (LfU 2015). Die Untersuchungen zeigen, dass selbst bei oberflächennahen GWM die Konzentrationen an O₂ überwiegend gering sind. Bei mehr als 90 % aller Analysen liegen die O₂-Gehalte im Bereich 0,1 bzw. < 0,1 mg/l. Nach dem Verbrauch von O₂ bilden sich im Laufe verschiedener Redoxprozesse Nitrat (NO₃⁻), Mn²⁺, Fe²⁺- und SO₄²⁻-reduzierende Wässer (Tab. 2), wobei für Wässer in Brandenburg nur die Prozesse innerhalb 400 bis -200 mV maßgebend sind.

NH₄⁺ spielt für die brandenburgischen Grundwasserhältnisse auf Grund der o. g. Milieubedingungen eine besondere Rolle. Sind die Medianwerte (Tab. 1) der Messdaten aus GWL 1 und 2 meist unterhalb des Grenzwertes von 0,5 mg/l [TRINKWASSERVERORDNUNG (TRINKWV) 2013], treten bis zu 4,5 mg/l im GWL 3 auf. Grund hierfür sind die geogenen Gehalte, die im Zusammenhang mit einer Liegendspeisung auftretenden organischen Bestandteilen einhergehen. Ähnliche Verhaltensweisen sind bei den Parametern K⁺ und Br⁻ zu beobachten.

Die durchgeführte Betrachtung einzelner Parameter (Abb. 8) lässt keine steigenden Trends im Sinne einer Zunahme der salzwasserprägenden Parameter wie Cl⁻, Na⁺, der Leitfähigkeit oder SO₄²⁻ erkennen. Lediglich bei der Leitfähigkeit treten mehr steigende als fallende Trends in den jeweiligen GWM auf. Generell dominieren jedoch die trendfreien Entwicklungen der einzelnen Parameter.

Vergleicht man die hier betrachteten Trends mit denen aus dem Gütebericht 2015, ergeben sich ähnliche Entwicklungen.

5 Hydrogeochemisch-genetische Auswertung

Für eine bessere Übersicht der standortspezifischen hydrogeochemischen und genetischen Ergebnisse wurde die Zusammenführung von acht Gebieten in sogenannte „Salzzonen“ aus HANNAPPEL et al. (2009) übernommen (Abb. 9). Hierzu zählen:

Der Oberuckersee, das Havelluch, die Nauener Platte, Salzbrunn, der Nottekanal, die Krausnick-Burg-Peitzer-Rinne, der Oder-Spree-Kanal und das Oderbruch.

Exemplarisch werden hier die Gebiete Oberuckersee, Salzbrunn und Oder-Havel-Kanal näher beschrieben, jeweils verbunden mit einer Auswertung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) mittels PIPER-Diagramm und mittels GEBAH. Die anderen fünf Gebiete sowie einzelne GWM sind in PYRITZ (2016) intensiv betrachtet worden.

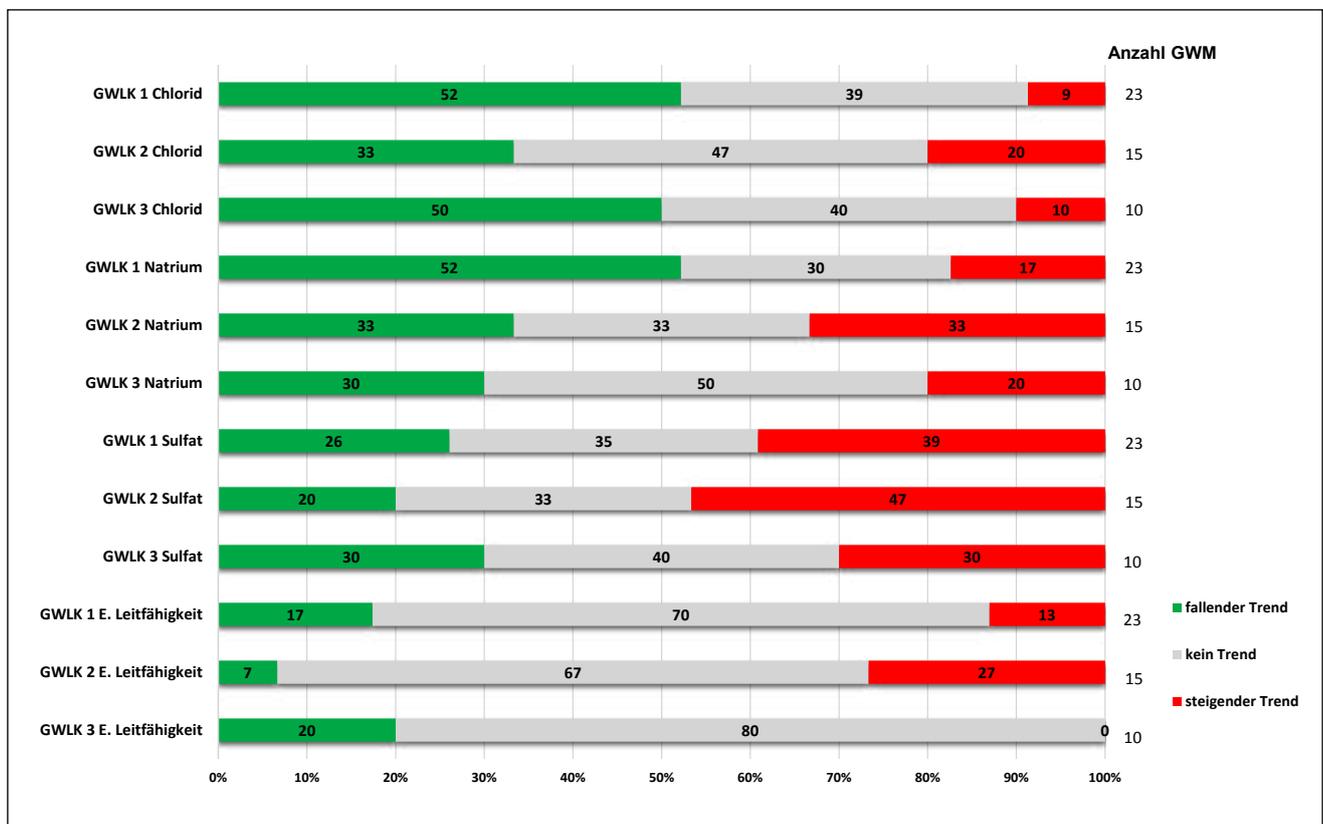


Abb. 8: Trendentwicklung der Konzentrationsganglinien ausgewählter Parameter (%)

Fig. 8: Trend development of the concentration hydrographs of selected parameters (%)

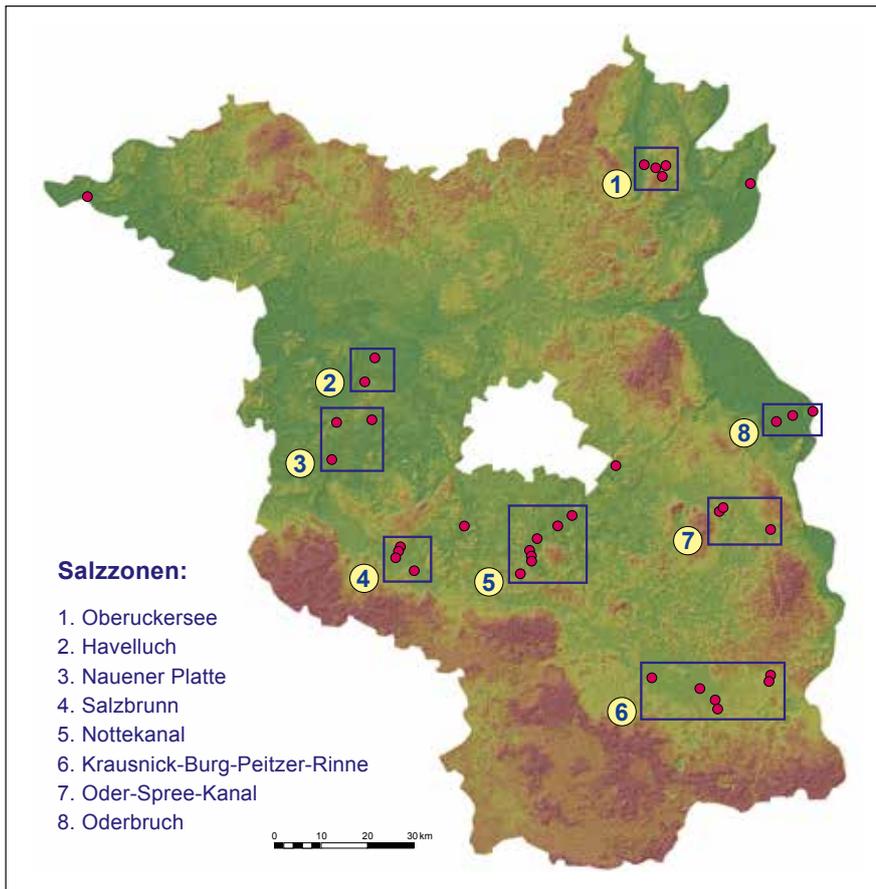


Abb. 9:
Salzzonen nach
HANNAPPEL et al. (2007) und
Grundwassermessstellen
(BRÜNING 2016, verändert
durch PYRITZ 2016)

Fig. 9:
Areas of saline intrusion with
monitoring wells from
HANNAPPEL et al. (2007) and
monitoring wells
(BRÜNING 2016,
changed by PYRITZ 2016)

5.1 Oberuckersee

Die Salzzone Oberuckersee (Abb. 9) liegt im Nordosten Brandenburgs im Landkreis Uckermark an der östlichen Uferseite des Oberuckersees bis zum großen Kuhsee. Mögliche Strukturen für Salzwasseraufstiegsbahnen ergeben sich aus einer tiefliegenden quartären Ausräumungszone (QAZ), die auf ca. -100 bis -200 m NHN abtaucht und aus der östlich gelegenen „Struktur Gramzow“. Insgesamt werden der Salzzone Oberuckersee vier tief ausgebaute Messstellen mit Filteroberkante (FOK) > 69 m unter Geländeoberkante (GOK) zugewiesen, welche in maximal 6 km Entfernung zueinander liegen. Hier ist die Möglichkeit des Aufstiegs salinärer Tiefenwässer in die Süßwasser führenden quartären GWL gegeben. Eine wasserwirtschaftliche Nutzung findet in Neuhof durch das gleichnamige Wasserwerk (WW) statt, wobei die GWM z. T. im gleichen GWL ausgebaut sind wie die Brunnen.

Die Auswertung der hydrogeochemischen Parameter zeigte insbesondere bei den Standorten GWM Gramzow Unterpegel (UP) und WW Neuhof hohe Konzentrationen an Cl^- und Na^+ (Tab. 3). Diese hohen Konzentrationen allein sind schon ein Beleg für das Vorhandensein salinärer Wässer aus dem tieferen Untergrund. Zudem zeigten die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit an allen Standorten Werte um bzw. über 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Trotz der bei den hypothetischen Salzen (Tab. 3) anteiligen Dominanz der für pleistozäne GWL prägenden Karbonat-Salze, erkennt man in GEBAH im Zusammenhang mit steigenden Anteilen der Chlorid-

Salze eine Zunahme des Intrusionspotentials von migrierend bis hin zu intrusiv. In tieferen GWL liegt die Verteilung in unbeeinflussten Grundwässern zwischen Karbonat-, Sulfat- und Chlorid-Salzen bei etwa > 85 : < 5 : < 10. Im Konsens mit dem GGV liefern die hypothetischen Salze standortbezogen bei der hydrogeochemisch-genetischen Bewertung des Grundwassers zusätzliche Informationen.

Die analysierten Grundwässer werden nach PIPER (1944) grundsätzlich in $\text{Na-Ca-HCO}_3\text{-Cl}$ und Na-Ca-HCO_3 -Wässer, also in Tiefenwässer bzw. Austauschwässer unterschieden (Abb. 10). Nach der Klassifizierung von FURTAK & LANGGUTH (1967) werden die Wässer zudem in erdalkalisch-alkalisch und in alkalische Wässer (GWM Meichow UP) differenziert.

Nach GEBAH (Abb. 11) sind alle GWM geogen salinar geprägt, wobei in den GWM Gramzow UP und WW Neuhof bereits intrusive Tiefenwässer auftreten. Das deutet daraufhin, dass hier eine unmittelbare Aufstiegsbahn salinärer Tiefenwässer existiert. In der GWM Seehausen werden hingegen „migrierende“ Wässer diagnostiziert. Verschiedene Ursachen wie eine geringere hydraulische Anbindung der GWM an die salinären Aufstiegsbahnen, eine größere Entfernung von diesen oder auftretende abdichtende Schichten im Untergrund könnten dafür verantwortlich sein. Die Wässer der GWM Meichow UP und Seehausen zeigen migrierende Salzwässer an. Insbesondere GWM Meichow UP mit Chlorid-Gehalten um 70 mg/l verhält sich als Austauschwasser wenig auffällig.

GWM	Typisiert nach:			Chemische Parameter				Hypothetische Salze in %		
	GEBAH/salinar (RECHLIN et al. 2010)	GGV	PIPER (1944)	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	Natrium [mg/l]	Karbonate	Chloride	Sulfate
Gramzow UP	Natrium-Typ/ intrusiv migrierend	0,041	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	1 107	157	39	132	63,00	32,00	5,00
WW Neuhof	Natrium-Typ/ intrusiv migrierend	0,023	Na-Ca-HCO ₃ -Cl	1 295	194	18	136	60,00	37,00	3,00
Seehausen	Natrium-Typ/ migrierend	0,062	Na-Ca-HCO ₃	946	85	15	79	75,00	22,00	3,00
Meichow UP	Natrium-Typ/ migrierend	0,060	Na-Ca-HCO ₃	940	72	5	120	80,00	19,00	1,00

Tab. 3: Hydrogeochemisch-genetische Auswertung Salzzone Oberuckersee

Tab. 3: Hydrogeochemical-genetic evaluation of the saline area Oberuckersee

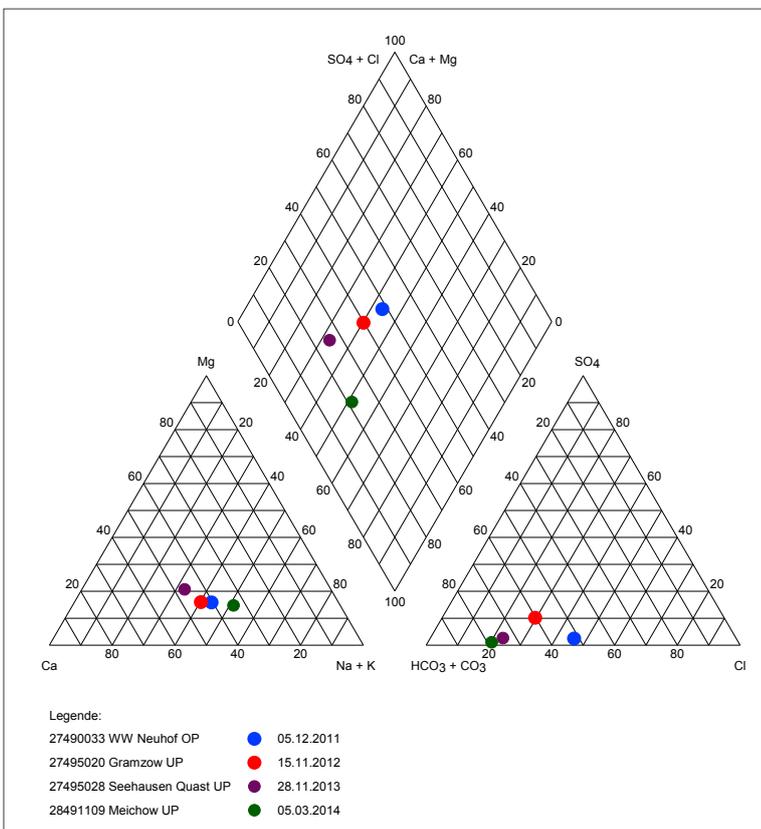


Abb. 10: Analysen der Grundwassermessstellen im PIPER-Diagramm der Salzzone Oberuckersee

Fig. 10: Analyzes of monitoring wells in the PIPER diagram of the area Oberuckersee

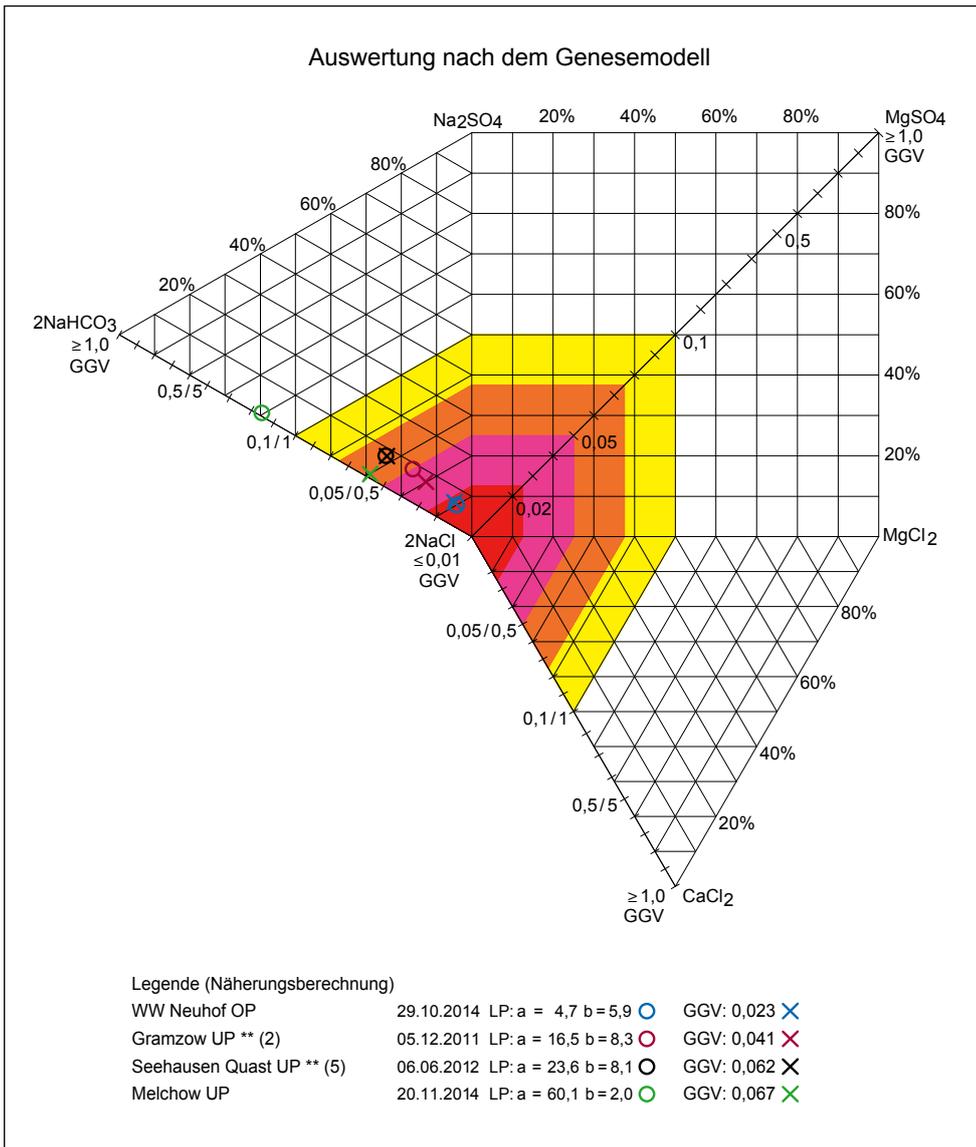


Abb. 11:
Lagepunkte (LP) der
Analysen und des Genetischen
Grundverhältnisses (GGV)
mit dem geringsten
Ionenbilanzfehler der
Salzzone Oberuckersee im
Genesemodell GEBAH

Fig. 11:
Position of analyzes (LP)
and GGV with low ion
balance error of the
monitoring area
Oberuckersee in GEBAH

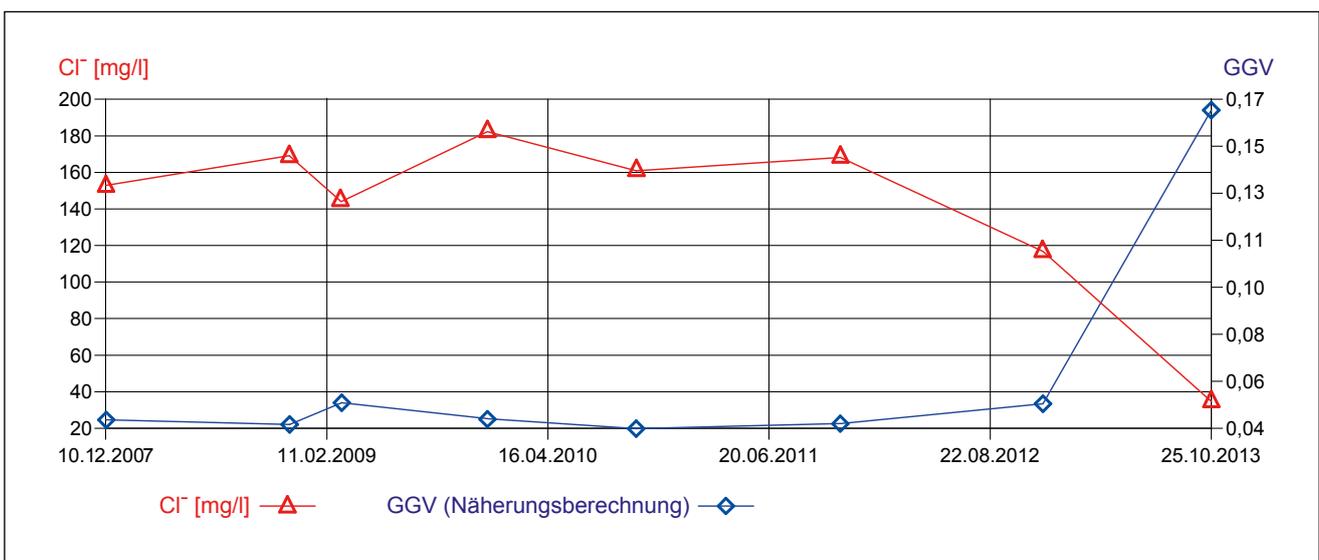


Abb. 12: Entwicklungen des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) und Chlorid-Konzentrationen (mg/l) am Standort Gramzow

Fig. 12: Development of GGV and chloride concentration (mg/l) at the monitoring area Gramzow

In GEBAH ist im Natrium-Typ (Abb. 11) eindeutig der Einfluss migrierender bis hin zu intrusiven Tiefenwässern erkennbar. Wie bereits in KABOTH et al. (2008) beschrieben, kann mit der Gegenüberstellung des GGV zu Chlorid die Variabilität salinärer Wässer beschrieben werden. Kommt es zur Aussüßung im GWL, z. B. durch erhöhte Niederschläge bzw. Aktivierung von Neubildungsanteilen, reagiert das GGV relativ schnell mit einem höheren Verhältniswert. In Abbildung 12 zeigt sich, dass die Chlorid-Konzentrationen ab dem Jahr 2011 bei gleichzeitigem Anstieg des GGV stark abnehmen. Mit dem Anstieg des GGV geht eine Verschiebung aus dem „intrusiv migrierenden“ zum „diffus migrierenden“ Bereich der Grundwässer einher. Es kommt also zu einer Verdünnung der aufsteigenden Tiefenwässer. An der GWM konnte ein Anstieg des Grundwasserspiegels um fast 1 m seit dem Jahr 2009 beobachtet werden.

Beim Vergleich der Aussagen aus den beiden hydrogeochemischen Modellen kann festgestellt werden, dass die Auswertung nach FURTAK & LANGGUTH (1967) im PIPER-Diagramm „sehr träge“ ist und erst bei Konzentrationen > 150 mg/l auf chloridische Einflüsse reagiert. Hingegen machen sich Veränderungen durch erhöhte Grundwasserstände und damit einhergehenden abnehmenden Konzen-

trationen durch Verdünnung relativ schnell im genetischen Verhalten des Grundwassers in GEBAH bemerkbar.

5.2 Salzbrunn

Der Name Salzbrunn ist historisch auf eine im 17. Jahrhundert betriebene Saline zurückzuführen. Auch wenn wasserwirtschaftlich nicht so interessant, wurde dieses Gebiet in das Salzwassermonitoring aufgenommen, um Transportwege und allgemeine Entwicklungen in Binnensalzstellen besser verstehen zu können. Die in der grundwasserentlastenden Nieplitz-Niederung innerhalb des Havel-Einzugsgebietes gelegene Salzzone (Abb. 9) umfasst fünf oberflächennah ausgebaute Messstellen im GWLK 1. In unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes befindet sich die Doppelstruktur Treuenbrietzen-Buchholz, die mit einer QAZ bis -200 m NHN in Verbindung steht. Im Bereich Alt Bork sind reduzierte Mächtigkeiten des Rupeltons bekannt, somit sind hydraulische Voraussetzungen für den Aufstieg geogen salinärer Tiefenwässer über geologische Fenster gegeben. In diesem Untersuchungsgebiet sind erhöhte Chlorid- und Sulfat-Konzentrationen sowie hohe Leitfähigkeiten prägend

GWM	Typisiert nach:			Chemische Parameter				Hypothetische Salze in %		
	GEBAH/salinar (RECHLIN et al. 2010)	GGV	PIPER (1944)	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	Natrium [mg/l]	Karbonate	Chloride	Sulfate
Alt Bork	Sulfat-Typ/ intrusiv	0,004	Na-Cl	1 120	207	37	127	15,00	70,00	15,00
Deutsch Bork Nord	Magnesium- Typ/ intrusiv	0,017	Ca-HCO ₃ -SO ₄	1 058	55	199	28	55,00	10,00	35,00
Deutsch Bork Süd	Magnesium- Typ/ intrusiv migrierend	0,040	Ca-HCO ₃ -SO ₄	954	49	223	29	45,00	10,00	45,00
Niebel	Sulfat-Typ/ intrusiv	0,018	Na-Ca-HCO ₃ -Cl- SO ₄	822	94	101	68	40,00	35,00	25,00
Schlalach OP	Magnesium- Typ/ migrierend	0,053	Ca-HCO ₃ -SO ₄ -Cl	1 131	112	211	54	40,00	25,00	35,00

Tab. 4: Hydrogeochemisch-genetische Auswertung Salzzone Salzbrunn

Tab. 4: Hydrogeochemical-genetic evaluation of the saline area Salzbrunn

(Tab. 4). Nach PIPER (1944) und FURTAK & LANGGUTH (1967) werden die analysierten Grundwässer z. T. sogar als Auslaugungswässer (Alt Bork) bzw. erdalkalisch und erdalkalisch-alkalisch klassifiziert (Abb. 13).

In GEBAH befinden sich alle Lagepunkte der Grundwässer dicht um den NaCl-Pol und werden durch das relativ niedrige GGK hauptsächlich als „intrusiv“ bis „intrusiv migrierend“ eingestuft (Abb. 14, Tab. 4).

Trotz eines oberflächennahen Ausbaus aller GWM sind die Neubildungsgeprägten Grundwässer an der GWM Alt Bork genetisch nicht mehr nachweisbar. Es kann bei einem GGK von 0,004 und der Summe der Chlorid-Salze von 70 % von tiefgreifenden Entlastungen hoch mineralisierter Tiefenwässer ausgegangen werden. Im Untersuchungszeitraum ist an allen GWM dieser Salzzone eine Zunahme des salinaren Gefährdungspotentials im Grundwasser beobachtet worden.

Die in Abbildung 15 dargestellte Gegenüberstellung der Chlorid-Konzentrationen mit dem GGK an der GWM Alt Bork zeigen ähnlich wie an der GWM Gramzow den disproportionalen Zusammenhang dieser Kennwerte. Nach

zunächst abnehmenden Chlorid-Gehalten kam es ab 2009 zu einer Zunahme, verbunden mit einem geringeren GGK bis in den intrusiven Bereich. Nach den niederschlagsreichen Jahren 2012/2013, die sich auch in den beobachteten Grundwasserständen widerspiegeln, erfolgte eine Umkehr der Entwicklung.

Stellt man hier die beiden methodischen Ansätze von PIPER (1944) und GEBAH gegenüber wird in diesem Gebiet klar, das nach PIPER erst bei über 200 mg/l Chlorid eine Zuordnung als Ablaugungswasser erfolgt. Im GEBAH werden diese Wässer bereits bei geringeren Konzentrationen dem intrusiven Salinar zugeordnet. Jegliche wasserwirtschaftlichen Nutzungen in diesem Gebiet erübrigen sich somit. Schließlich ist das Ziel, eine großflächige Verteilung des versalzten Grundwassers zu verhindern und damit ökologischen Veränderungen entgegen zu wirken.

5.3 Oder-Spree-Kanal

Die Salzzone 7 (Abb. 9) Oder-Spree-Kanal umfasst die beiden Standorte Briesen und Müllrose entlang des Kanals. Insgesamt werden sechs Messstellen aus dem Salinarmess-

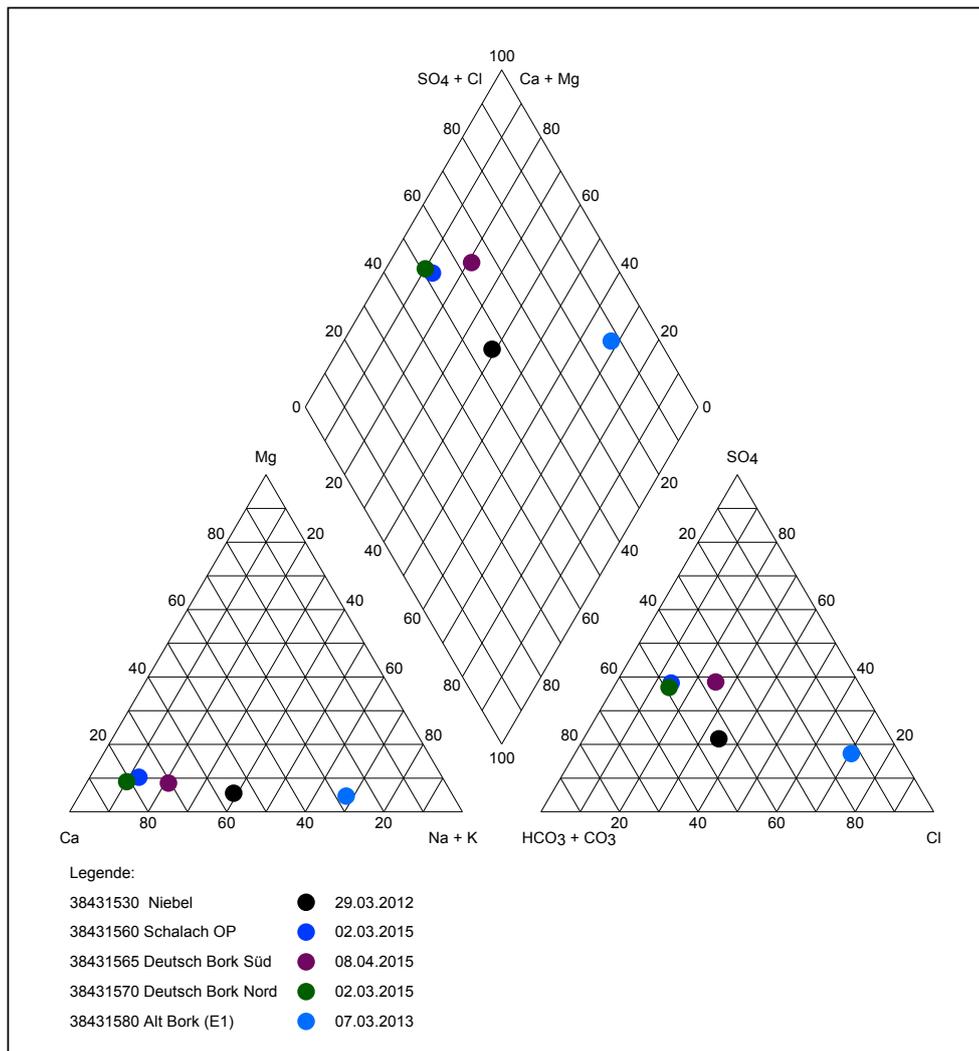


Abb. 13:
Analysen der
Grundwassermessstellen im
PIPER-Diagramm der
Salzzone Salzbrunn

Fig. 13:
Analyses of monitoring
wells in the PIPER diagram
of the area Salzbrunn

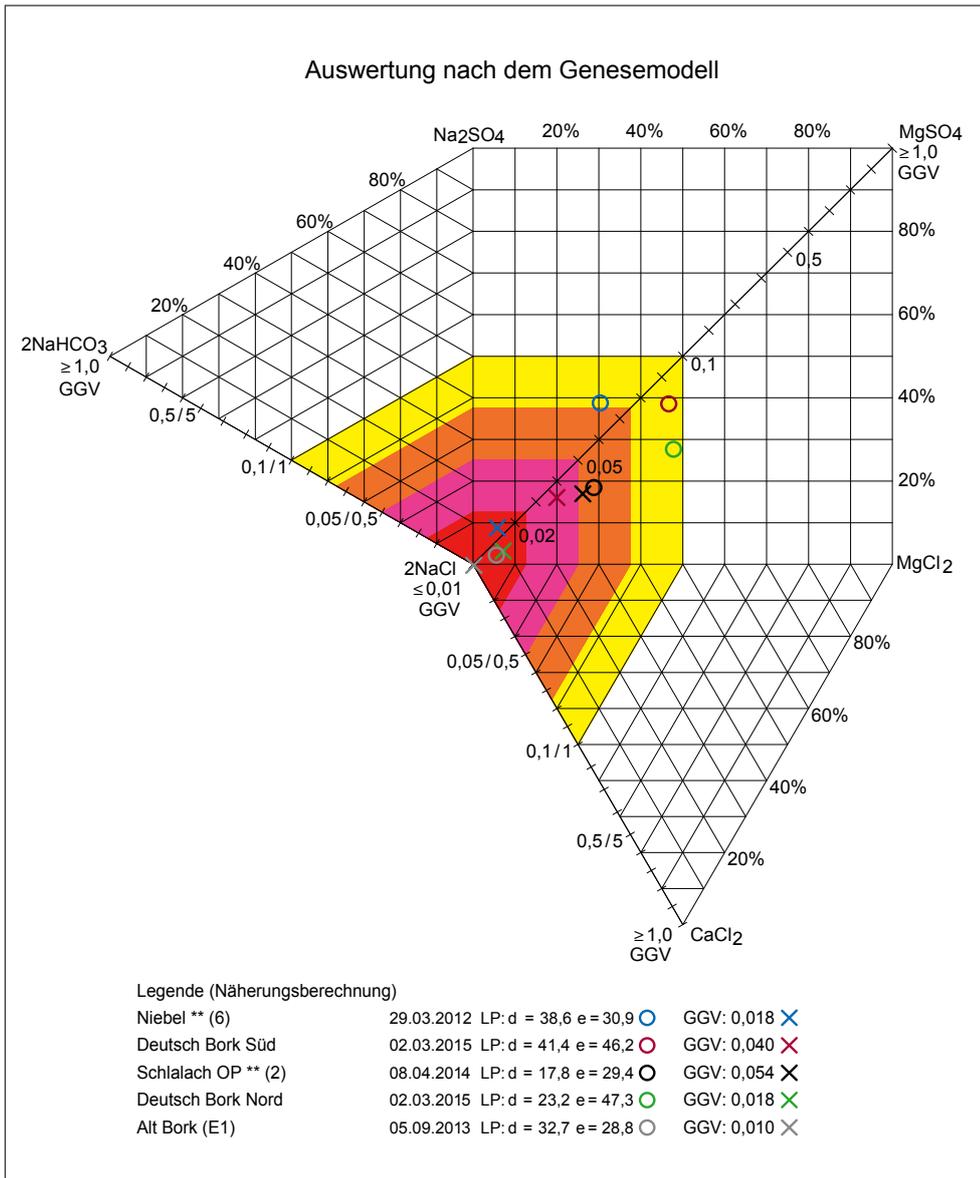


Abb. 14: Lagepunkte (LP) der Analysen und des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) mit dem geringsten Ionenbilanzfehler der Salzzone Salzbrunn im Genesemodell GEBAH

Fig. 14: Position of analyzes (LP) and GGV with low ion balance error of the monitoring area Salzbrunn in GEBAH

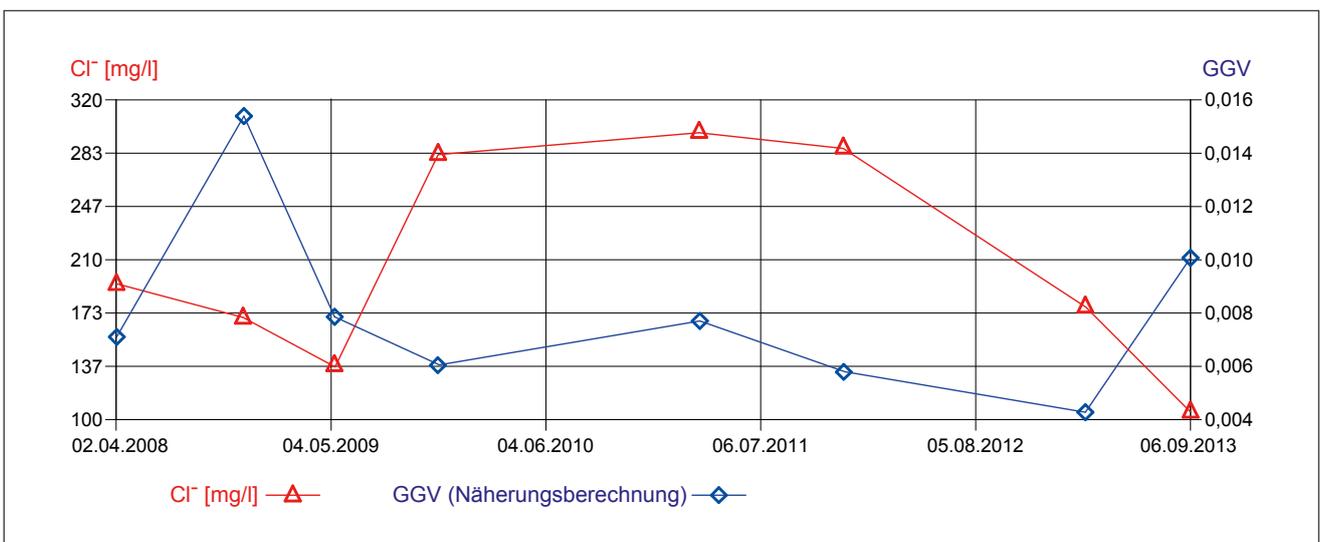


Abb. 15: Entwicklungen des Genetischen Grundverhältnisses (GGV) und der Chlorid-Konzentrationen (mg/l) am Standort Alt Bork

Fig. 15: Development of GGV and chloride concentration (mg/l) at the monitoring area Alt Bork

netz dieser Salzzone zugeordnet. Hier sollen die Entwicklungen der GWM Müllrose näher betrachtet werden, da diese einen vertikalen Blick in den GWL erlauben. Alle drei Filterlagen der GWM Müllrose sind in einem unbedeckten GWL mit relativ geringen vertikalen Versätzen (FOK 17 bis 28 m unter GOK) ausgebaut.

Als Ursache der Aufstiegsbahnen hoch mineralisierter Wasser fungieren die Rupelton-Fehlstellen, welche sich südlich von Müllrose bis nach Briesen erstrecken sowie die westlich von Müllrose verlaufende QAZ, die Neubrück-Merz-Rinne.

Die Auswertung der Beschaffenheitsparameter zeigt, dass die Grundwasserproben aller GWM durch elektrische Leitfähigkeiten im Bereich zwischen ca. 600 bis 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ charakterisiert sind (Tab. 5). Die Konzentrationen an Cl^- , SO_4^{2-} und Na^+ im Grundwasser sind nahezu unauffällig im Vergleich zu den vorher beschriebenen Gebieten. Lediglich die Chlorid-Konzentration an der GWM Müllrose Mittelpegel (MP) 2 überschreitet den für Brandenburg üblichen geogenen Hintergrundwert von 50 mg/l (LfU, 2015). Die analysierten Grundwässer lassen sich nach PIPER (1944) den Austauschwässern ($\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ - bzw. Ca-HCO_3) und nach FURTAK & LANGGUTH (1967) den alkalischen Wässern zuordnen (Abb. 16).

Sieht man sich hingegen die Bewertung im GEBAH an, belegt die Zunahme der Chlorid-Salze vom Hangenden zum Liegenden auch eine Veränderung im hydrogeochemischen Typ und zwar vom Magnesium-/Sulfat- zum Natrium-Typ. Diese Entwicklung kann mit einer zunehmenden Liegendenspeisung begründet werden. Betrachtet man die tieferen GWM von Müllrose, die jedoch nicht im LfU-Salzwassermessnetz integriert sind, trifft man intrusive Wässer an (HOTZAN 2010).

Am Standort Müllrose erfolgt die salinare Klassifizierung in GEBAH hauptsächlich in den „intrusiven“ bzw. „intrusiv migrierenden Typ“ (Tab. 5). Generell kann hier eine Abnahme des Einflusses salinärer Wässer vom Liegenden zum Hangenden festgestellt werden. Kennzeichnend sind zudem die Einflüsse der Grundwasserneubildung und die Lagepunkte der Analysen im Grenzbereich zwischen Sulfat- und Magnesium-Typ (Abb. 16; siehe auch HOTZAN 2010 und in diesem Band).

Bei der Gegenüberstellung der genannten Methoden wird deutlich, dass am Standort Müllrose salinare Tiefenwässer eine wasserwirtschaftliche Relevanz haben und dringend zu berücksichtigen sind. Diese relativ sichere Identifizierung der Wässer wird durch die Charakterisierung der genetischen Entwicklung in GEBAH ermöglicht.

6 Bewertung der Ergebnisse

In PYRITZ (2016) wurden die vorhandenen Analysen mittels der genannten hydrogeochemisch-genetischen Methoden, der Ionenbilanzen, Trendentwicklungen sowie Ionenverhältnisse allgemein wie standortbezogen bewertet und gegenübergestellt.

6.1 Hydrogeochemische Methoden

Bewusst wurde die allgemein in Deutschland verwendete hydrochemische Typisierung nach PIPER (1944) und FURTAK & LANGGUTH (1967) mit dem am LBGR entwickelten

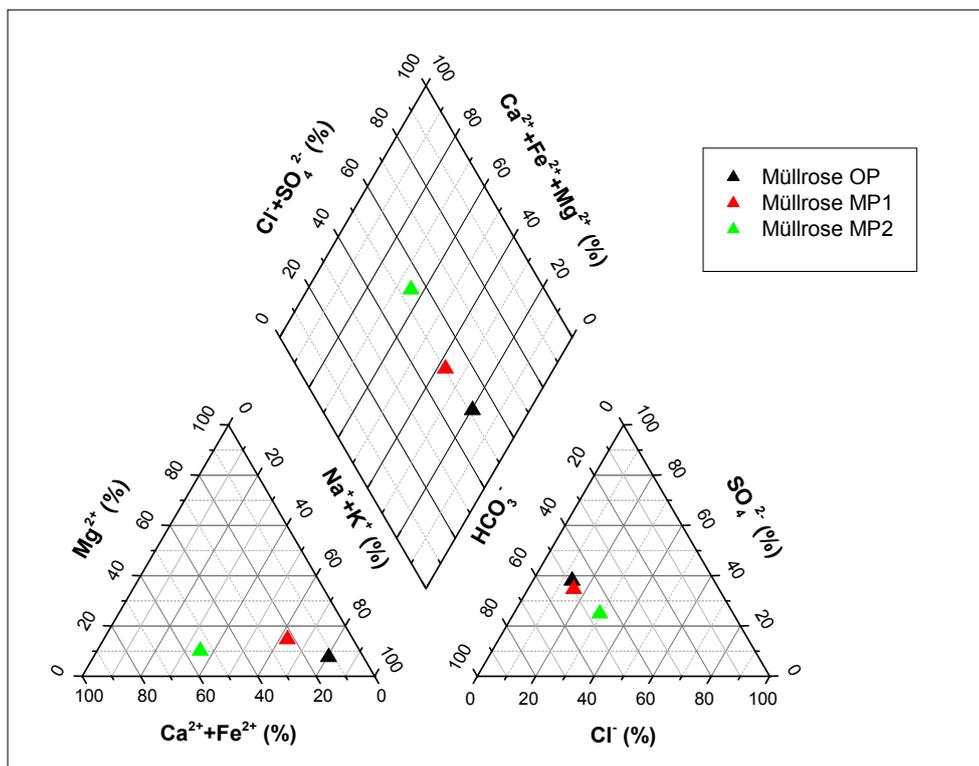


Abb.16:
Mittelwerte der
Grundwassermessstellen im
PIPER-Diagramm der
Salzzone Oder-Spree-Kanal
und deren Lage im
Land Brandenburg

Fig. 16:
Mean values of monitoring
wells in the PIPER diagram
of the area Oder-Spree-Kanal

GWM	Typisiert nach:			Chemische Parameter				Hypothetische Salze in %		
	GEBAH/salinar (RECHLIN et al. 2010)	GGV	PIPER (1944)	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	Chlorid [mg/l]	Sulfat [mg/l]	Natrium [mg/l]	Karbonate	Chloride	Sulfate
Müllrose OP	Magnesium- Typ/ intrusiv migrierend	0,046	Ca-HCO ₃ -SO ₄	621	31	118	17	50,00	12,00	38,00
Müllrose MP 1	Sulfat-Typ/ intrusiv migrierend	0,039	Ca-HCO ₃ -SO ₄	608	34	104	29	53,00	20,00	27,00
Müllrose MP 2	Sulfat-Typ / intrusiv	0,020	Ca-HCO ₃ -SO ₄	753	79	113	61	47,00	33,00	20,00

Tab. 5: Hydrogeochemisch-genetische Auswertung Salzzone Oder-Spree-Kanal

Tab. 5: Hydrogeochemical-genetic evaluation of the saline area Oder-Spree-Kanal

Genesemodell (RECHLIN 1997, 2008) mittels der Software GEBAH (RECHLIN et al. 2010) verglichen (PYRITZ 2016).

Beschäftigt sich PIPER (1944) u. a. mit der Verhältnisdarstellung und Charakterisierung der Grundwässer, geht GEBAH einen Schritt weiter und befasst sich mit der genetischen Herkunft der Wässer. Gegenüber dem konzentrationsabhängigen PIPER-Diagramm liegt der Vorteil von GEBAH in der konzentrationsunabhängigen Betrachtung der genetischen Entwicklung des Grundwassers. Letzteres erlangt insbesondere bei der Früherkennung salinärer Stoffeinträge aus dem tieferen Untergrund große Bedeutung, da in Brandenburg aufgrund der geologischen Strukturen und auch der relativ geringen Grundwasserneubildung die Nutzung der wasserwirtschaftlichen Ressourcen nur in einem sehr begrenzten Umfang möglich ist. Der regionale Vergleich in den Salzzonen verdeutlicht, dass das Modell relativer Ionen-Häufigkeitsverteilungen von PIPER (1944) gegenüber GEBAH wesentlich unempfindlicher reagiert. So verschieben sich die Lagepunkte der Wässer beispielsweise in der GWM Gramzow UP im PIPER-Diagramm erst ab über 150 mg/l Cl⁻ zu Wässern mit chloridischen Anteilen, hier als Na-Ca-HCO₃-Cl-Wässer bezeichnet. GEBAH charakterisiert die Wässer der GWM Gramzow UP dagegen bereits als „intrusiv migrierend“ bei geringerer Konzentration.

Das sensiblere Reagieren zeigt sich auch in dem Gebiet der Salzzone Oder-Spree-Kanal. Hier wurden Chlorid-Gehalte von ca. 30–80 mg/l vom OP bis zum unteren MP festgestellt. Nach FURTAK & LANGGUTH (1967) werden diese Wässer aufgrund der Ca-HCO₃-SO₄-Dominanz als alkalische Wässer eingestuft. In GEBAH werden trotz der Neubildungsanteile bereits „diffus migrierende“ bis „migrierende“ Salzwässer identifiziert.

6.2 Ionenverhältnisse

Die untersuchten Verhältnisse einzelner Ionen zueinander bringen keine bzw. nur bedingt Aussagen zu einer salinaren Beeinflussung. VENGOSH & ROSENTHAL (1993) wiesen Meerwasserintrusion mit dem Na⁺/Cl⁻-Verhältnis oder auch dem Cl⁻/Br⁻-Verhältnis nach. Insbesondere das Cl⁻/Br⁻-Verhältnis weist bei einer Verhältniszahl > 500 auf Salzlösungsprozesse im Untergrund hin.

Für Brandenburgische Verhältnisse könnte diese Untersuchung bei intrusiven Wässern mit hohen Chlorid-Gehalten hilfreich sein, um die Salzwassereinflüsse nach mesozoischer und paläozoischer Herkunft zu differenzieren. Vorher ist jedoch eine anthropogene Herkunft salinärer Stoffeinträge (z. B. durch Straßenlaugen) auszuschließen. In Auswertung von PYRITZ (2016) konnte an 18 GWM eine Verhältniszahl > 700 mg/l errechnet werden. Vorzugsweise treten in den betreffenden UP an den Standorten Lenzen, Paulinenaue und Wachow Verhältniszahlen > 2 000 auf.

6.3 Trendbetrachtungen

In Auswertung der Trendbetrachtung der Parameter Leitfähigkeit, Cl⁻ und Na⁺ im Grundwasser lässt sich derzeit noch keine Zunahme von salinaren Beeinflussungen in den süßwasserführenden GWL erkennen. Der Beobachtungszeitraum sollte sich über einen längeren Zeitraum von mindestens 20 Jahren erstrecken, um auch die hydrologischen Zeiträume der Entwicklungen des Grundwasserstands mit zu erfassen. Die ausgewerteten Ganglinien der GWM des

Salinarmessnetzes weisen derzeit zu kurze Zeiträume und dazu meistens zu wenige Messungen im Jahr auf.

7 Ausblick

In Auswertung der statistischen und hydrogeochemischen Ergebnisse von PYRITZ (2016) sowie der weiterführenden Arbeiten ist das saline Grundwassermonitoring des LfU den neuen Ergebnissen anzupassen.

Die Auswertung (PYRITZ 2016) hat gezeigt, dass derzeit ein latentes Gefährdungspotential bezüglich der Grundwasserversalzung in exponierten Gebieten Brandenburgs besteht. An 10 Standorten, wie u. a. Lenzen oder Paulinen-*au*, konnte mit Hilfe der durchgeführten Verfahren ein besonders hohes Gefährdungspotential bezüglich der Intrusion salinärer Tiefenwässer nachgewiesen werden. Vier der aktuell beobachteten 48 GWM wurden nach jetzigem Kenntnisstand als nicht salinar eingestuft, welche nach einer weiteren Überprüfung durch das LfU vermutlich aus dem Salinarmessnetz ausgegliedert werden können. Grundsätzlich empfiehlt sich aber eine fortschreibende Überwachung der Entwicklung salinärer Wässer im wasserwirtschaftlich genutzten GWL für die nächsten Jahrzehnte. An den Standorten mit diffus migrierenden und migrierenden Wässern salinärer Herkunft sollten weiterhin die Grundwasseruntersuchungen mindestens zweimal jährlich durchgeführt werden, um frühzeitig signifikante negative geogene Veränderungen zu erkennen und darauf reagieren zu können.

In den klassifizierten Salzzonen insbesondere im Oderbruch, Havelluch, im Abschnitt Lübbenau bis Burg der Krausnick-Burg-Peitzer-Rinne sowie am Oberuckersee, empfiehlt sich ein Ausbau bzw. Verdichtung des Salinarmessnetzes, um großflächige Versalzungstendenzen besser erkennen bzw. eingrenzen zu können.

Die methodische Auswertung erfolgt dabei vorrangig mit der Software GEBAH des LBGR (RECHLIN et al. 2010).

Um die vorliegenden Ergebnisse in den jeweiligen Gebieten besser verifizieren zu können, sollten sowohl stabile als auch radiogene Isotopenuntersuchungen ergänzend zur bisherigen Analytik hinzugezogen werden. Hierzu zählen vor allem Sauerstoff-, Wasserstoff-, Kohlenstoff- und Schwefel-Isotope. Diese eignen sich besonders, um den Ursprung, die Verteilung und das Alter salinärer Wässer zu bestimmen (siehe Beitrag von BEDNORZ & BROSE in diesem Band).

Zusammenfassung

Im Ergebnis der Untersuchungen an 48 GWM liegt eine erste Bewertung des Salzwassermessnetzes Brandenburgs vor. In der statistischen Auswertung konnte eine Differenzierung der Medianwerte gegenüber den Ergebnissen des

Güteberichtes (LfU 2015) insbesondere bei den Parametern Leitfähigkeit, Cl^- und Na^+ festgestellt werden. Diese Unterschiede in den Konzentrationen zeigen sich vor allem im GWL 3.

Der methodische Vergleich zwischen dem weit verbreitet genutzten PIPER-Diagramm (PIPER 1944) und dem Genesemodell des LBGR (GEBAH) stellt mit der Früherkennung der Anteile salinärer Tiefenwässer die Vorteile des konzentrationsunabhängigen Genesemodells heraus. Schon bei geringer Gesamtmineralisation ($< 300 \text{ mg/l}$) ist es somit möglich, Aussagen zu salinaren Einflüssen vorzunehmen. Hingegen ist die Anwendung nach PIPER (1944) für eine Identifizierung von salinaren Stoffeinträgen für zu betrachtende Gebiete im Lockergesteinsbereich erst ab einer Chlorid-Konzentration von 150 mg/l möglich. Diese liegt zwar unterhalb des Grenzwertes nach TrinkwV (2013) von 250 mg/l , jedoch weit über dem geogenen Hintergrundwert von 50 mg/l in Brandenburg.

Für die langfristige wasserwirtschaftliche Nutzung der Grundwasservorkommen auch im Hinblick auf die Daseinsvorsorge für die Trinkwasserversorgung ist es notwendig, die Prozesse und Beeinflussung der nicht nur in Brandenburg auftretenden Binnenversalzung weiterhin zu untersuchen und ein entsprechendes Grundwassermonitoring im Land vorzuhalten.

Summary

As a result of the investigations of 48 groundwater observation wells, an initial assessment of the salt water measurement network in Brandenburg is available. In the statistical evaluation a differentiation of the median values compared to the results of the quality report (LfU 2015) could be determined, especially for the parameters conductivity, chloride and sodium. These differences in concentrations mainly appear in lower aquifer GWL 3.

The methodical comparison between the widely used PIPER diagram (PIPER 1944) and the genesis model of Brandenburg (GEBAH; RECHLIN et al. 2010) emphasizes the advantages of the concentration-independent genesis model with the early detection of migrating saline water. Even at low total mineralization ($< 300 \text{ mg/l}$), it is possible to make statements on saline influences. On the other hand, the application according to PIPER (1944) for the identification of salinary influences is only possible from a minimum concentration of 150 mg/l chloride. Although this is below the limit value according to TrinkwV (2013) of 250 mg/l , it is but far above the geogenic background value of 50 mg/l in Brandenburg.

In order to ensure the long-term use of groundwater resources for water management purposes, also with regard to the provision of services of general interest for the supply of drinking water, it is necessary to continue to investigate

the processes and effects of inland salting, which does not only occur in Brandenburg, and to maintain a appropriate groundwater monitoring in the country.

Literatur

- BRÜNING, T. (2017): Entwicklung eines hydrogeologischen 3D-Geodatenbankmodells am Beispiel von Quillow und Strom“. – Masterarbeit FU Berlin, 120 S. (unveröff.)
- FUGRO (2013): Erfassung belastungsrelevanter Parameter in Rohwasserproben von Wasserwerken im Land Brandenburg für die Jahre 2009–2010. – Bericht zum Teilprojekt 7a, Zeitraum 2009–2010, 73 S., Berlin (unveröff.)
- FURTAK, H. & H. R. LANGGUTH (1967): Zur hydrochemischen Kennzeichnung von Grundwässern und Grundwassertypen mittels Kennzahlen. – IAH-Congress, Hannover, S. 89–96
- GERSTENGABE, F.-W., BADECK, F., HATTERMANN, F., KRYSANOVA, V., LAHMER, W., LASCH, P., STOCK, M., SUCKOW, F., WECHSUNG, F. & P. C. WERNER (2003): PIK-Report Nr. 83 – Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft, sowie die Ableitung erster Perspektiven. – 78 S., PIK, Potsdam
- HANNAPPEL, S., HERMSDORF, A., POHL, S., RIETZ, C. & R. KOSECK (2007): Aufbau von Sondermessnetzen zur Überwachung der geogenen Grundwasserversalzung in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **14**, 1, S. 5–14
- HANNAPPEL, S., DUSCHER, K., REJMANN-RASINSKA, E., REINHARDT, S. & A. HERMSDORF (2009): Auswertung und Fortschreibung der Konzeption des Messnetzes „Geogene Grundwassersalzung“ in Brandenburg. – 80 S., Berlin, Potsdam (unveröff.)
- HOTZAN, G. (2010): Genetische Grundwassertypen der Binnenversalzung, ihre Klassifikation und Erscheinungsformen. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **17**, 1/2, S.39–53
- HYDOR (2015): Erfassung belastungsrelevanter Parameter in Rohwasserproben von Wasserwerken im Land Brandenburg. – Bericht zum Teilprojekt 8a, Zeitraum 2011–2013, 87 S., Berlin (unveröff.)
- JAHNKE, C. (2011): Genetische Interpretation erhöhter Ammonium-Konzentrationen zur Überprüfung der Grundwassergüte und der Analyse anthropogener und geogener Einflüsse in den Grundwasserkörpern Oderbruch, Prenzlau, Schwedt und Schlepzig – Teil A. – Abschlussbericht Brandenburgische Technische Universität Cottbus, AG Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, 123 S. (unveröff.)
- KABOTH, U., RECHLIN, B. & G. GINZEL (2008): Besteht für unsere Seen eine geogene Versalzungsgefahr? Hydrochemisch-genetische Untersuchungen von Speisungsgebieten an Seen im Naturpark Stechlin. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **15**, 1/2, S. 69–79
- LfU (2015): Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit im Land Brandenburg 2006–2012. – Veröffentlichung basierend auf internem Bericht der GCI GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, 122 S., Potsdam
- OTTOW, J. C. G. (1981): Mechanism of bacterial iron-reduction in flooded soils. – Proceedings of Symposium on Paddy Soils, Institute of Soil Science, Academia Sinica, Science Press, S. 331–343, Beijing, Berlin (Springer)
- RECHLIN, B. (1997): Zur Anwendung des Hydrogeochemischen Genesemodells der Wässer in den GWLK des Landes Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **4**, 1, S. 67–71
- RECHLIN, B. (2008): Eine Methode zur konzentrationsunabhängigen Früherkennung von Salzwasserintrusionen in süßwasserführenden Grundwasserleitern und Oberflächengewässern. – 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
- PIPER, A. M. (1944): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. – Trans. Amer. Geophys. Union **25**, 6, S. 914–928
- PFÜTZNER, B. (2012): Aktualisierung der Abflussspendenkarte der mittleren Abflüsse im Land Brandenburg bis zum Jahr 2010. – Digitale Karte AG des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, Abteilung Ökologie, Naturschutz und Wasser
- PYRITZ, N. (2016): Gefährdung des oberflächennahen Grundwasserstockwerkes durch Salzwasserintrusion – Das Salzmessnetz des Landes Brandenburg. – Masterarbeit FU Berlin, 130. S. (unveröff.)
- SCHIRRMEISTER, W. (1996): Aus der Literatur überlieferte Angaben über natürliche Salzwasseraustritte an der Grundwasseroberfläche/Geländeoberfläche in Brandenburg. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **3**, 1, S. 94–96
- STACKEBRANDT, W. & V. MANHENKE (Hrsg.) (2002): Grundwasserversalzung. – Atlas zur Geologie von Brandenburg 1 : 1 000 000. – Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, 142 S.

STACKEBRANDT, W. (Hrsg.) (2010): Atlas zur Geologie von Brandenburg im Maßstab 1 : 1 000 000. – 4. aktualis. Aufl., Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe, 157 S.

TRINKWV (2013): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Trinkwasserverordnung (TrinkwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), geändert durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154)

VENGOSH, A. & E. ROSENTHAL (1993): Saline groundwater in Israel: its bearing on the water crisis in the country. – *Journal of Hydrology* **156**, S. 389–430

Anschriften der Autoren:

Angela Hermsdorf
Landesamt für Umwelt Brandenburg
Ref. W15 Altlasten, Bodenschutz, Grundwassergüte
Postfach 60 10 61
14410 Potsdam
angela.hermsdorf@lfu.brandenburg.de

Norman Pyritz
Pestalozzistraße 10
16278 Angermünde
norman16278@yahoo.de

Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge

Autorenhinweise

Die Zeitschrift „Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge“ widmet sich geologischen, lagerstättenkundlichen und bergbaulichen Themen von Brandenburg und Berlin sowie dem neuesten Forschungsstand in den geowissenschaftlichen Disziplinen. Die eingereichten Beiträge sollen diesem Profil entsprechen. Es werden Originalarbeiten und wissenschaftliche Informationen veröffentlicht, die noch nicht andernorts publiziert wurden. Die Redaktion behält sich das Recht vor, Manuskripte zur Überarbeitung an die Autoren zurückzusenden.

Ihre Manuskripte senden Sie bitte in digitaler Form (e-mail, CD) an das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, Redaktion z. Hd. Frau Dr. Jaqueline Strahl (Tel.: 0355-48640-156), PSF 10 09 93, 03009 Cottbus oder per e-mail an: jaqueline.strahl@lbgr.brandenburg.de. Weitere Anfragen richten Sie bitte ebenfalls an die obige Adresse.

Manuskript

- Der **Umfang** des Manuskripts sollte **zehn Seiten (A4, 1,5 zeilig)** nicht überschreiten. Wissenschaftliche **Kurzinformationen** sind einschließlich der Abbildungen auf maximal **fünf Seiten** zu bemessen.
- Jedem Beitrag ist eine kurze **deutsche und englische Zusammenfassung** beizufügen.
- Bitte **übersetzen** Sie den **Titel** des Beitrags, die **Unterschriften der Abbildungen, Tafeln und Tabellen** ebenfalls **ins Englische**.
- Die Textdateien sollten unformatiert sein und in Word abgefasst werden (Schrift: Times New Roman 10 pt).
- Absätze bitte mit einer Leerzeile trennen.
- **Word-Dokumente** bitte **nicht mit integrierten Abbildungen** liefern, d. h. Text und Abbildungen immer in separaten Dateien einschicken!

Abbildungen

- Wir empfehlen, die Anzahl von bis zu 7 Abbildungen je Beitrag nicht zu überschreiten.
- Zur Beschriftung in den Abbildungen verwenden Sie bitte den Schriftsatz „Arial“.
- Jede Abbildung ist separat mit Nummer und Autorennamen zu kennzeichnen und als einzelne Datei zu liefern.
- Die Abbildungsunterschriften sind in einer gesonderten Datei beizugeben.
- Digital hergestellte **Zeichnungen und Abbildungen** sollten die **Formate Adobe Illustrator (.ai), Corel-Draw (.cdr) oder .pdf und .eps aus vorgenannten Programmen** haben, **Fotos** hochauflösendes (**mindestens 300 dpi!**) **TIFF (.tif)- bzw. JPG (.jpg)-Format**, andere nach Absprache. Das Originalformat bitte immer mitschicken!

Tabellen

- Tabellen bitte mit einem Tabellenprogramm schreiben (Word, Excel).

Zitierweise

Im Text:

- WUNDERLICH (1974) bzw. (WUNDERLICH 1974) oder
- PILGER & STADLER (1971) sowie NÖLDEKE et al. (1977) bei mehr als zwei Autoren

Im Literaturverzeichnis:

- BUBNOFF, S. v. (1953): Über die Småländer „Erdnaht“. – Geol. Rdsch. **41**, S. 78–90
- NIESCHE, H. & F. KRÜGER (1998): Das Oder-Hochwasser 1997 - Verlauf, Deichschäden und Deichverteidigung. – Brandenburg. geowiss. Beitr. **5**, 1, S. 15–22
- FAUTH, H., HINDEL, R., SIEWERS, U. & J. ZINNER (1985): Geochemischer Atlas Bundesrepublik Deutschland 1 : 200 000. – 79 S., Hannover (Schweizerbart)
- KRONBERG, P. (1976): Photogeologie, eine Einführung in die Grundlagen und Methoden der geologischen Auswertung von Luftbildern. – 268 S., Stuttgart (Enke)

Autorennamen bitte in **Kapitalchen** schreiben, **nicht in Großbuchstaben**.

Autorenname(n): Akademischer Titel, Vorname, Name, und Anschrift der Institution oder gegebenenfalls die Privatanschrift, wenn gewünscht, auch e-mail-Adresse

Grundsätze zu Rechtschreibung und Zeichensetzung

Datum: Entweder 1. März 2011 oder 01.03.2011; **Einheiten**: 2 km, 50 % – Einheitszeichen mit Zwischenraum zwischen Zahl und Zeichen verwenden; **Euro**: ausschreiben; **Rechenzeichen**: 6 + 2 = 8 – mit Zwischenraum zwischen Zahl und Rechenzeichen, ebenso </> mit festem Leerzeichen vor der Zahl **ABER** -2 – Vorzeichen vor der Zahl ohne Zwischenraum; **mehrstellige Zahlen**: 5 350 Gliederung von der Endziffer aus durch Zwischenraum in dreistellige Gruppen; **Schrägstrich**: 2010/11 – ohne Zwischenraum; **Gedankenstrich**: 1999–2011 Gedankenstrich für „gegen“ und „bis“; **Festabstände**: z. B., u. a. – Abkürzungen mit Zwischenraum; **Telefonnummern**: (03 31) 12 34 56 78 – Gliederung der Zahlen von rechts beginnend in zweistellige Gruppen

Die Zeitschrift „Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge“ des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg wird seit 1994 herausgegeben

Bisher sind erschienen:

1994,	Heft 1,	128 S.,	51 Abb.,	14 Tab.	Zur Quartärgliederung
1995,	Heft 1,	144 S.,	83 Abb.,	15 Tab.	
1995,	Heft 2,	96 S.,	37 Abb.,	5 Tab.	Neotektonik in Mitteleuropa
1996,	Heft 1,	160 S.,	100 Abb.,	9 Tab.	Geotope
1997,	Heft 1,	96 S.,	57 Abb.,	2 Tab.	Ehrenkolloquium für Dr. G. Schwab
1997,	Heft 2,	96 S.,	61 Abb.,	14 Tab.	
1998,	Heft 1,	84 S.,	74 Abb.,	4 Tab.	Standsicherheit Flußdeiche
1998,	Heft 2,	84 S.,	35 Abb.,	10 Tab.	
1999,	Heft 1,	116 S.,	55 Abb.,	15 Tab.	Geopotentiale
1999,	Heft 2,	80 S.,	34 Abb.,	5 Tab.	Lithofazieskartenwerk Quartär (DDR)
2000,	Heft 1/2,	196 S.,	121 Abb.,	23 Tab.	Quartär, Inlandeisttheorie
2001,	Heft 1,	48 S.,	6 Abb.,	8 Kt.	Neogeodynamica Baltica
2002,	Heft 1/2,	156 S.,	77 Abb.,	29 Tab.	
2003,	Heft 1/2,	202 S.,	157 Abb.,	22 Tab.	Airborne Laserscanning
2004,	Heft 1/2,	184 S.,	82 Abb.,	17 Tab.	Geothermie, Stratigraphie des Känozoikums
2005,	Heft 1/2,	180 S.,	120 Abb.,	15 Tab.	
2006,	Heft 1/2,	176 S.,	118 Abb.,	19 Tab.	Regionalgeologie, ausgewählte Geopotenziale
2007,	Heft 1	98 S.,	59 Abb.,	11 Tab.	
2007,	Heft 2	112 S.,	83 Abb.,	25 Tab.	Sonderheft: Rohstoffbericht Brandenburg
2008,	Heft 1/2	170 S.,	108 Abb.,	27 Tab.	
2009,	Heft 1/2	111 S.,	61 Abb.,	9 Tab.	
2010,	Heft 1/2	130 S.,	86 Abb.,	9 Tab.	
2011,	Heft 1/2	134 S.,	178 Abb.,	3 Tab.	
2012,	Heft 1	120 S.,	77 Abb.,	16 Tab.	
2012,	Heft 2	116 S.,	188 Abb.,	7 Tab.	Sonderheft: Braunkohlentiefbau in Ostbrandenburg
2013,	Heft 1/2	158 S.,	127 Abb.,	16 Tab.,	2 Taf.
2014,	Heft 1/2	150 S.,	124 Abb.,	14 Tab.,	1 Einlegeblatt
2015,	Heft 1	154 S.,	50 Abb.,	8 Tab.,	93 S. Anh.
2015,	Heft 2	Sonderband 2016 mit Arbeitsberichten zur Bodendenkmalpflege in Brandenburg 28,			
		245 S.,	132 Abb.,	12 Tab.,	13 S. Anh.

Geologische Karten zum Land Brandenburg (Auswahl)

Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000

- Geologische Grundkarte (GÜK 300); 14,00 €
- Tiefenlinienkarte der Zechsteinoberfläche (GK 300 Z-OK); 14,00 €

Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000, Bodengeologische Grundkarte (BÜK 300); 14,00 €

Karte der oberflächennahen Rohstoffe Steine und Erden des Landes Brandenburg 1 : 300 000 (KOR 300), 2. überarb. Aufl.; 15,00 €

Übersichtskarte Bergbau in den Ländern Brandenburg und Berlin 1 : 300 000 mit Beiheft; 5,00 €

Geologische Übersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 100 000 mit Beiheft (Kreiskarten); je 10,00 €

Geologische Karte von Berlin und Umgebung 1 : 100 000

- Geologische Grundkarte (GÜK 100); 8,00 €
- Karte ohne Quartär mit Darstellung der Tiefenlage der Quartärbasis (GKoQ); 12,00 €

Geologische Karte des Landes Brandenburg 1 : 50 000

Doppelblatt L 3952/3954 Eisenhüttenstadt – Eisenhüttenstadt-Ost/Cybinka; 15,00 €

Bodengeologische Karte 1 : 50 000 (BK 50), Blatt L 3744 Potsdam; 10,00 €

Hydrogeologische Karte 1 : 50 000 (HYK 50), je Blatt-Nr. 4 Teilkarten:

- Karte der oberflächennahen Hydrogeologie (HYK 50-1)
- Karte des weitgehend bedeckten Grundwasserleiterkomplexes GWLK 2 (HYK 50-2)
- Karte der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung (HYK 50-3)
- Hydrogeologische Schnitttafel (HYK 50-S)

Alle Blatt-Nr. werden als Kartenplots, je Teilkarte zu einer Gebühr von 10,00 € herausgegeben.

Rohstoffgeologische Karte 1 : 50 000, Karte der oberflächennahen Rohstoffe (KOR 50), flächendeckend für das Land Brandenburg, je Kartenplot 15,00 €

Atlas zur Geologie von Brandenburg 1 : 1 000 000, 4. Aufl.; 25,00 €

Weitere thematische Karten sowie ältere Unterlagen sind im Archiv des LBGR auf Anfrage und/oder unter www.geo.brandenburg.de/lbgr/bergbau verfügbar. Ein vollständiges Vertriebsverzeichnis können Sie im LBGR anfordern.

Zu beziehen über:

Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg,

Vertrieb: Telefon: (0355) 48640-177, Telefax: (0355) 48640-510

e-mail: lbgr@lbgr.brandenburg.de, Internet: www.lbgr.brandenburg.de

