

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

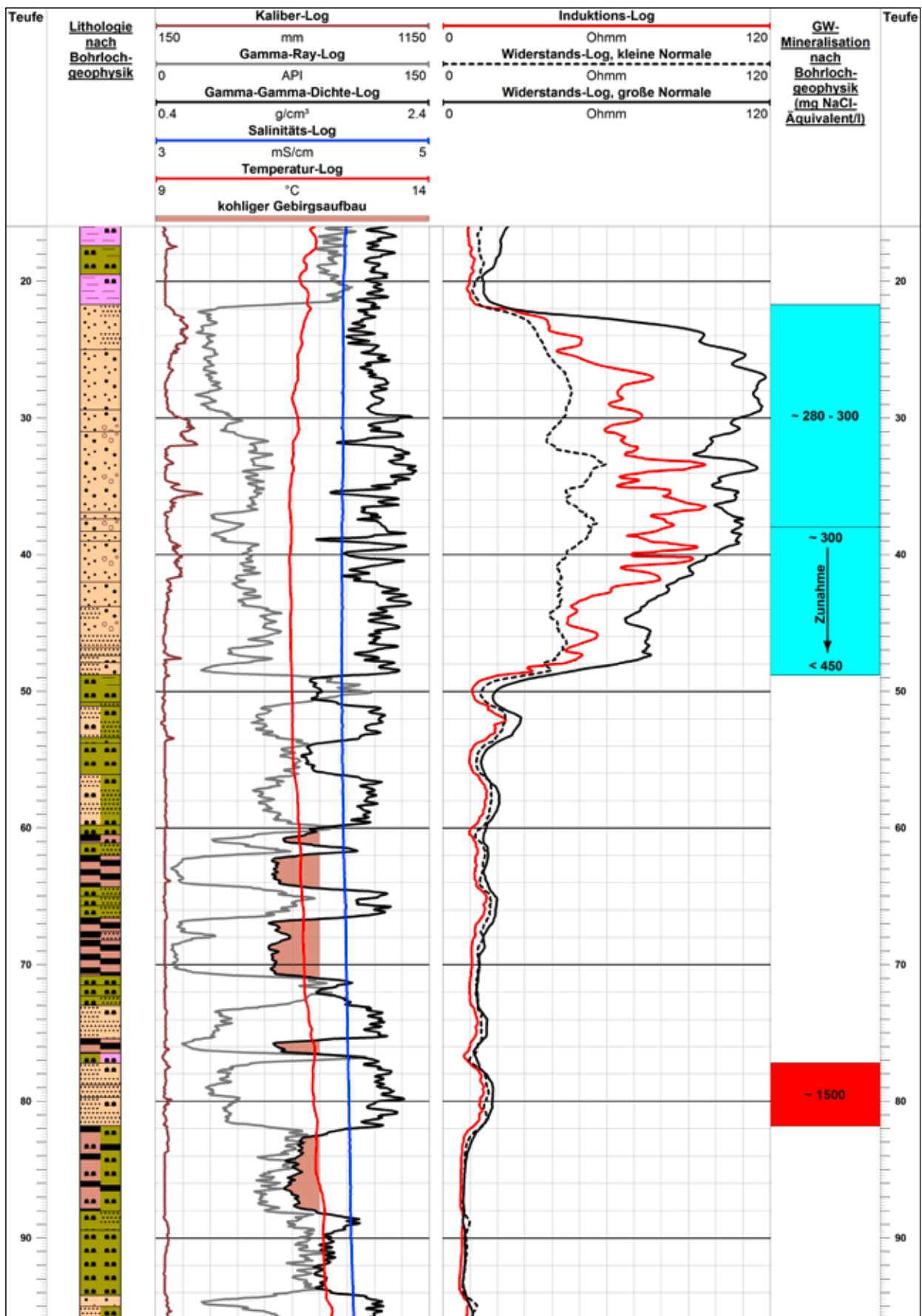


Abb. 2: Aufschlussmessung mit „Hydro-Standardprogramm“ im offenen Bohrloch
 Fig. 2: Standard open hole well-logging

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.

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

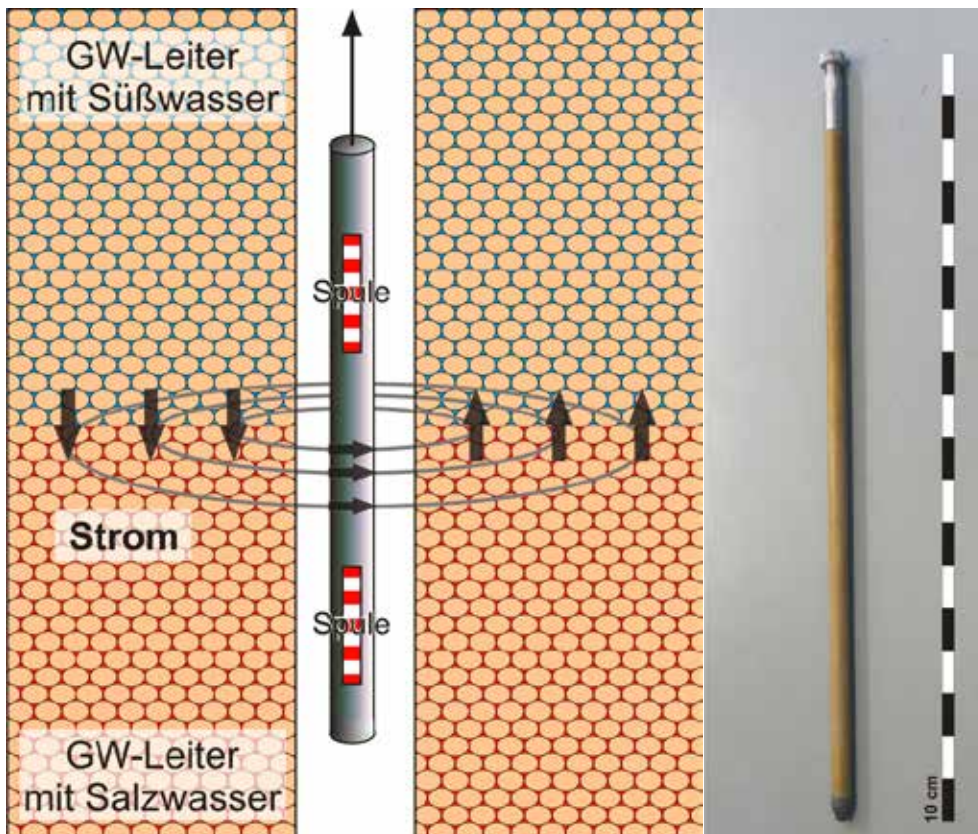


Abb. 4: Messprinzip der induktiven Widerstandsmessung und Foto einer IL-Sonde; GW = Grundwasser

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, Quillon 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.

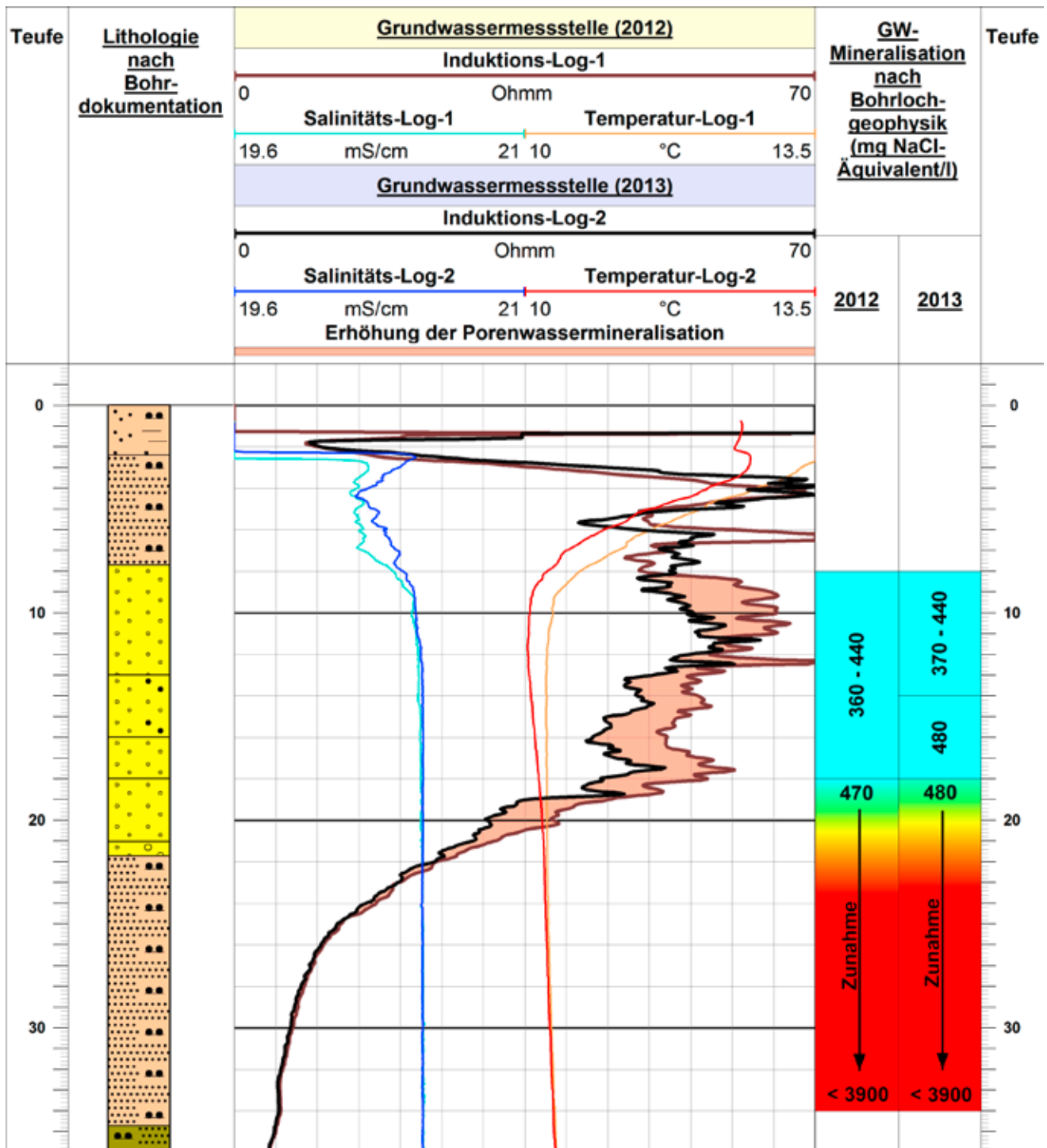


Abb. 5: Erhöhung der Porenwassermineralisation im oberen Grundwasserleiter in der Grundwassermessstelle in Lenzen (Elbe)

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 Tiefe.

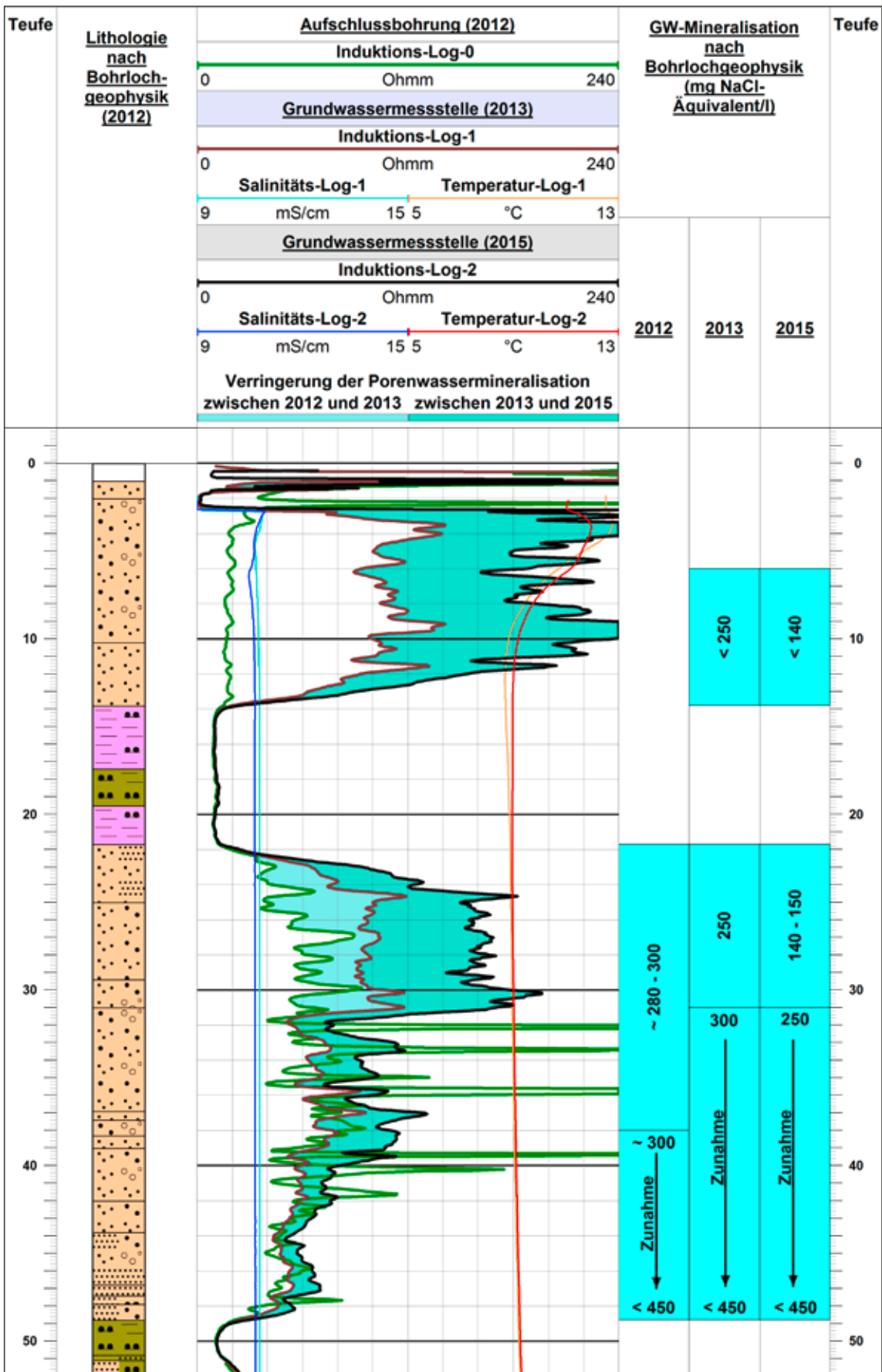


Abb. 6: Verringerung der Grundwassermineralisation in der Grundwassermessstelle in Biegenbrück
 Fig. 6: Decrease of pore water mineralisation in the groundwater observation point at Biegenbrück

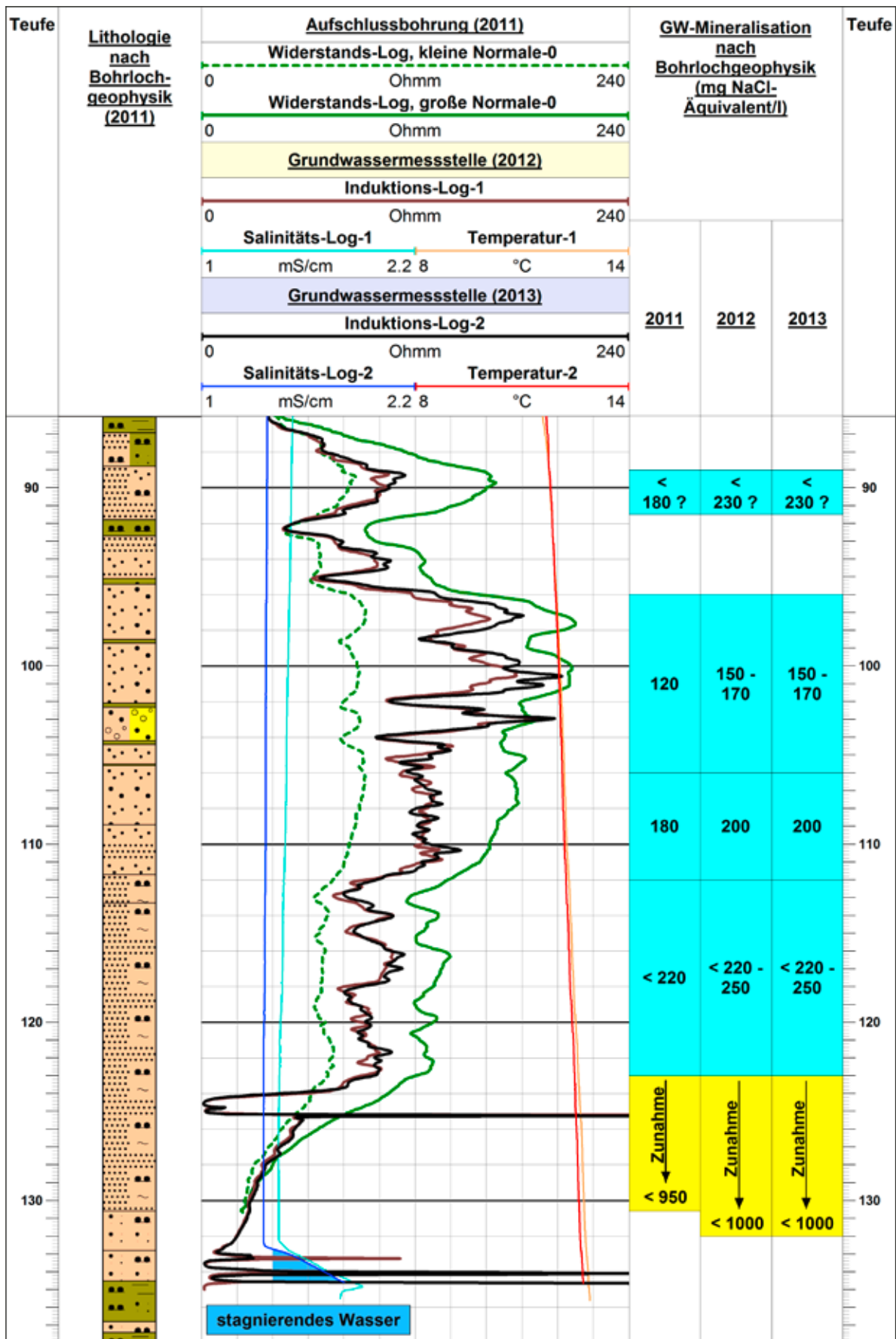


Abb. 7: Unveränderte Porenwassermineralisation in der Grundwassermessstelle in Spreenhagen
 Fig. 7: Unchanged pore water mineralisation at the groundwater observation point at Spreenhagen

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.

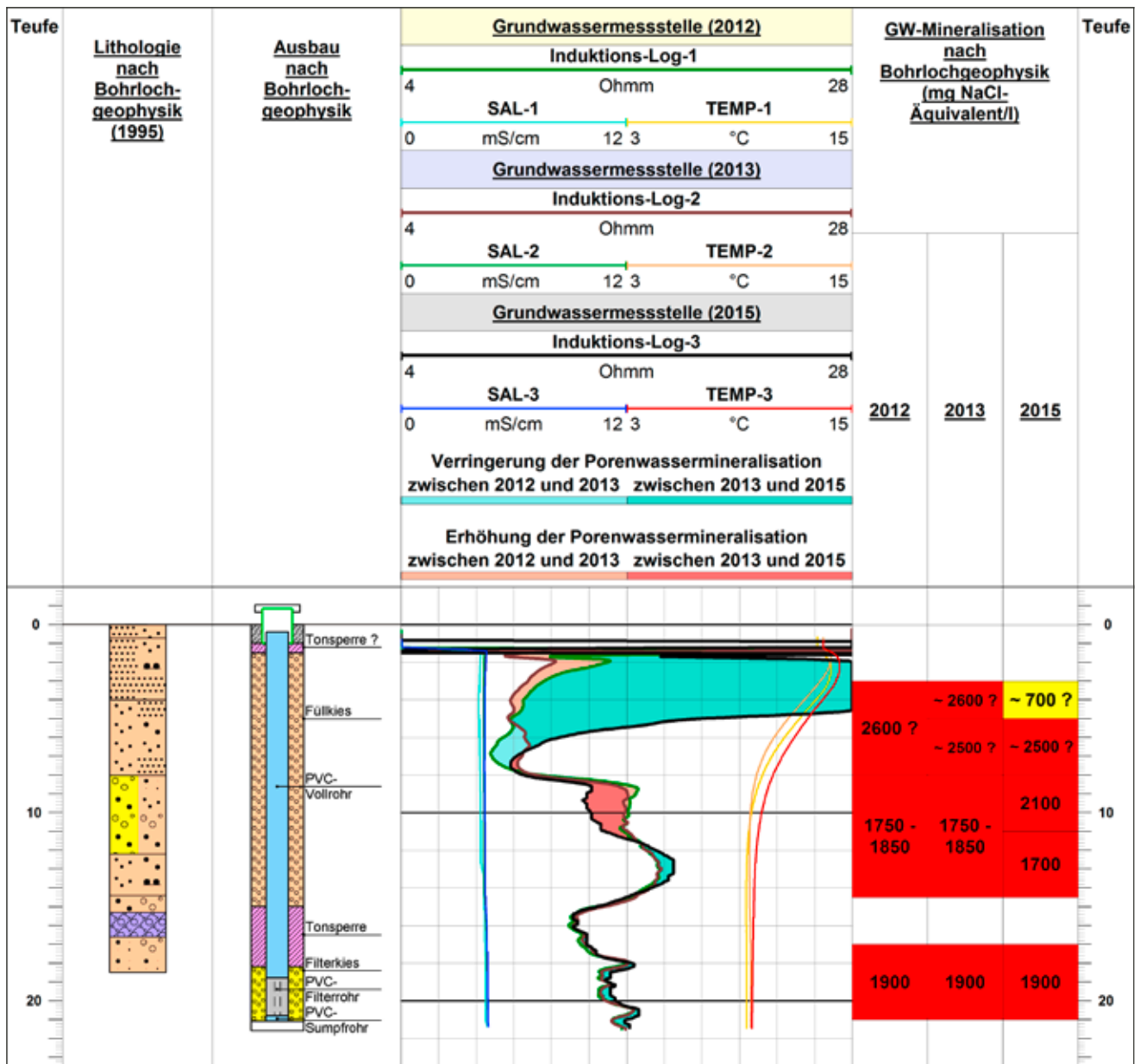


Abb. 8: Veränderung der Porenwassermineralisation im oberflächennahen Bereich in Paulinenaue

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