

Salzwassermonitoring mit Hilfe von Wächtermessstellen

Versalzungserscheinungen des Grundwassers sind aus verschiedenen Regionen Deutschlands bekannt, in einigen Bereichen sogar Salzwasseranstiege bis an die Erdoberfläche, beispielsweise im Naturschutzgebiet Storkower Luchwiesen in Brandenburg. Derartige Binnensalzstellen sind insbesondere für Naturfreunde ein Fundus, zeichnen sie sich doch durch eine sehr spezielle Flora aus, wobei Halophyten eine besondere Rolle spielen.

Versalzungserscheinungen an Wasserwerksstandorten sind dagegen eine meist sehr unerfreuliche Angelegenheit, können sie doch dazu führen, dass ganze Brunnen und sogar Wasserwerksstandorte aufgegeben werden müssen. Sofern bekannt ist, dass einzelne Brunnen oder Wasserwerksstandorte durch Salzwasser gefährdet sind, ist ein belastbares Monitoring der Salzwasserdynamik des Untergrundes eine unabdingbare Voraussetzung für den sicheren Betrieb der Anlagen. Nachfolgend sollen einige Methoden des Salzwassermonitorings beschrieben werden, dabei auch auf die Vor- und Nachteile eingegangen werden.

Ursachen für Versalzung des Grundwassers

Versalzungen des Grundwasser können sowohl geogener Natur als auch anthropogen bedingt sein. Zu den geogen bedingten Ursachen zählen unter anderem:

- Meerwasserintrusionen
- Lösungsvorgänge an Salzstöcken
- tiefreichende pleistozäne Erosionsrinnen, die „Fenster“ im Rupelton (Lauenburger Ton) geschaffen haben, der in weiten Teilen Mittel- und Norddeutschlands eine natürliche Barriere für saline Tiefenwässer bildet
- tektonische Störungen

Anthropogen bedingte Grundwasserversalzungen können entstehen durch:

- Untergrundverpressung von Solen
- Lösungsvorgänge an Salzhalden
- ungenügend verwahrte Tiefbohrungen

Als Mischform kann man einen Salzwasseraufstieg bezeichnen, der primär geogen bedingt ist, aber anthropogen forciert wird. Hierzu zählt die Grundwasserförderung in Gebieten mit einer erhöhten Salzwassergefährdung, aber auch ein Niederschlagsdefizit, wie es in Folge der Erderwärmung für einige Regionen vorausgesagt wird. Im Idealfall befinden sich das Salzwasser des Untergrundes und das aufliegende Süßwasser in einem Gleichgewicht, was bedeutet, dass die Süß-Salzwasser-Grenze bei unveränderten Druckverhältnissen lagestabil bleibt.

Kommt es jedoch zu Veränderungen der Druckverhältnisse, zum Beispiel durch eine die Grundwasserneubildung übersteigende Grundwasserförderung, so verschiebt sich diese Grenze. Wendet man hier die Ghyben-Herzberg-Formel in vereinfachter Form an, so gilt als Faustregel, dass die Absenkung des Grundwasserspiegels um 1 m dazu führt, dass die Süß-Salzwasser-Grenze um 40 m ansteigt. Dies leitet sich aus den unterschiedlichen Dichten von Süß- und Salzwasser ab.

Notwendigkeit des Salzwassermonitorings

Nachdem in der Vergangenheit an verschiedenen Orten in Deutschland ein Anstieg der Mineralisation festgestellt wurde, kamen Forderungen nach einer effektiven Methode zur Überwachung der Salzwasserdynamik auf. Entscheidend ist hierbei, ein System einzusetzen, das schon die Gefahr einer möglichen Versalzung erkennen lässt, bevor diese eingetreten ist. Es geht also um eine effektive Methode, ein Vorwarnsystem zu etablieren, das etwa den Brunnenbetreibern erlaubt, sich rechtzeitig auf den Anstieg

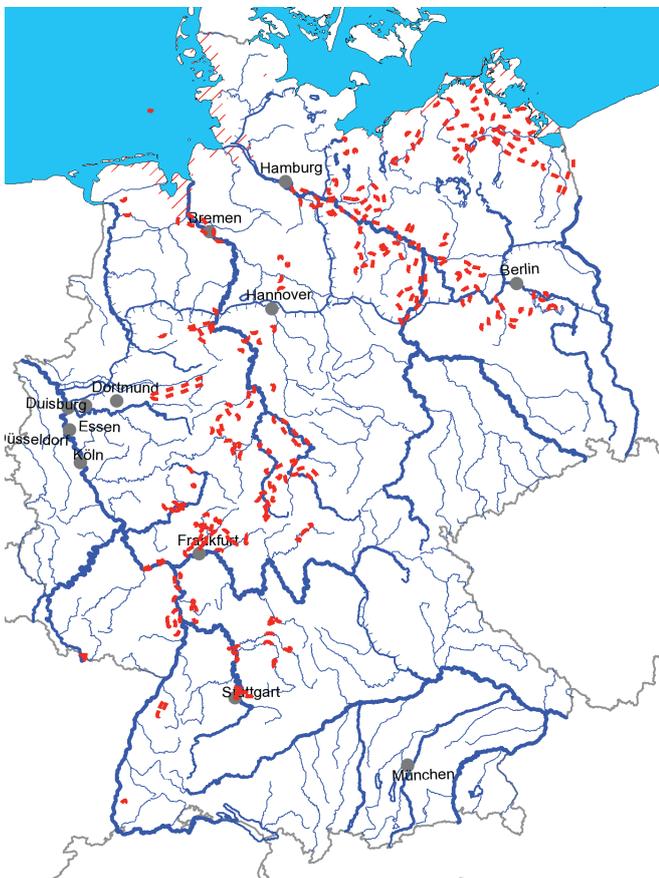


Bild 1: Grundwasserversalzung [1]

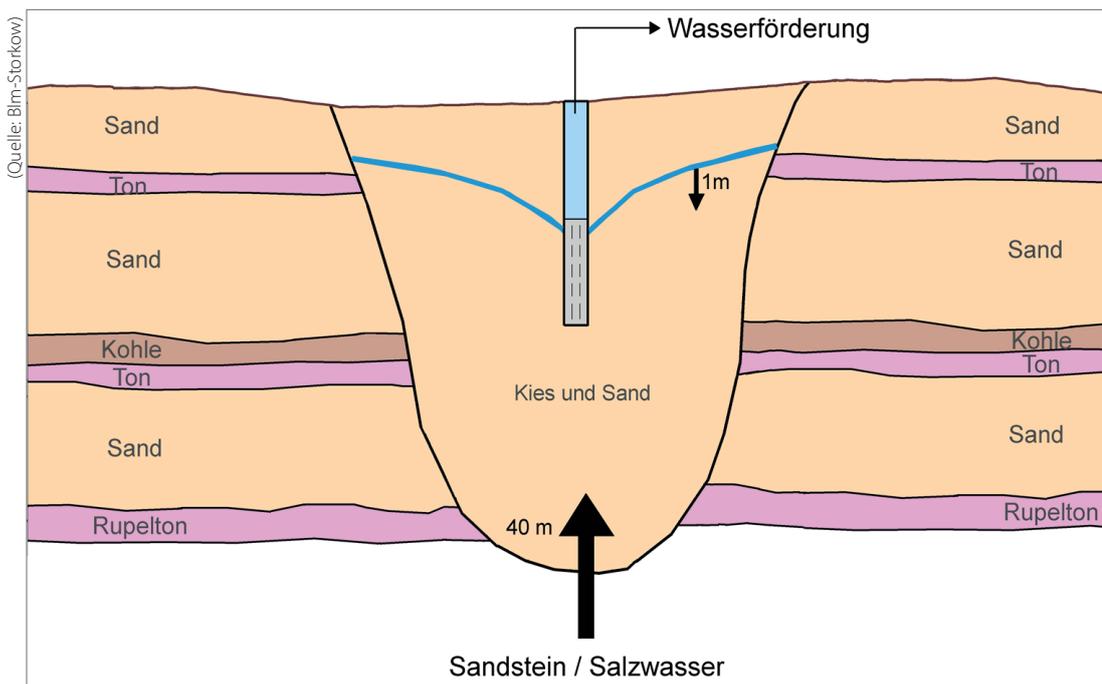


Bild 2: Salzwateranstieg durch Grundwasserförderung

der Salzfracht des Förderwassers einzustellen, besser noch, den weiteren Anstieg gänzlich zu verhindern.

Das Mittel der Wahl ist dabei, die Förderung eines Brunnens oder ganzer Brunnenstandorte so weit zu drosseln oder zu modifizieren, dass dadurch ein weiterer Anstieg möglichst verhindert wird. Zu beachten ist dabei auch, dass ein einmal versalzener Brunnen sich in der Dimension menschlicher Generationen nicht mehr regenerieren wird. Dies geschieht nur, wenn die Entnahme entsprechend geringer ist als die Neubildung des Grundwassers, so dass die Auflast auf die Salzwaterfront wieder erhöht wird. Es handelt sich somit um einen sehr langsam verlaufenden Vorgang.

Methoden

Für das Monitoring eignen sich prinzipiell verschiedene Methoden, die in der Zuverlässigkeit und den Kosten voneinander abweichen. Einige dieser Methoden sollen nachfolgend vorgestellt werden. Ziel muss es dabei immer sein, die Süß-Salzwater-Grenze, die sich meist als sehr scharfe Grenze abbildet – der Umschlag von Süß- zu Salzwater erfolgt oft innerhalb weniger Meter – in ihrer Lage und Dynamik verfolgen zu können. Die Feststellung der Dynamik hat dabei eine ganz besondere Bedeutung, kann sie doch ins Verhältnis zum Förderregime der umliegenden Brunnen gebracht werden. Hieraus lässt sich dann ableiten, welche Fördermengen, verteilt auf welche Brunnen zu einer Veränderung der Süß-Salzwater-Grenze führen. Die Verfolgung dieser Grenze muss sowohl in der Vertikalen als auch in der Horizontalen möglich sein. Das Vordringen von salinaren Wässern kann sowohl aus dem Liegenden eines Brunnens als auch seitlich erfolgen. Hierzu ist eine detaillierte Kenntnis der geologischen Situation notwendig, um entsprechende Monitoringmaßnahmen planen zu können. Die Wasserprobenahme aus Grundwassermessstellen erscheint auf den ersten Blick als

Methode der Wahl, stellt sich aber bei genauerer Betrachtung als weitestgehend ungeeignet heraus. Hierzu die nachfolgende Abbildung (**Bild 3**), die verdeutlicht, dass allein anhand einer Wasserprobe der Anstieg der Süß-Salzwater-Grenze nicht verfolgt werden kann.

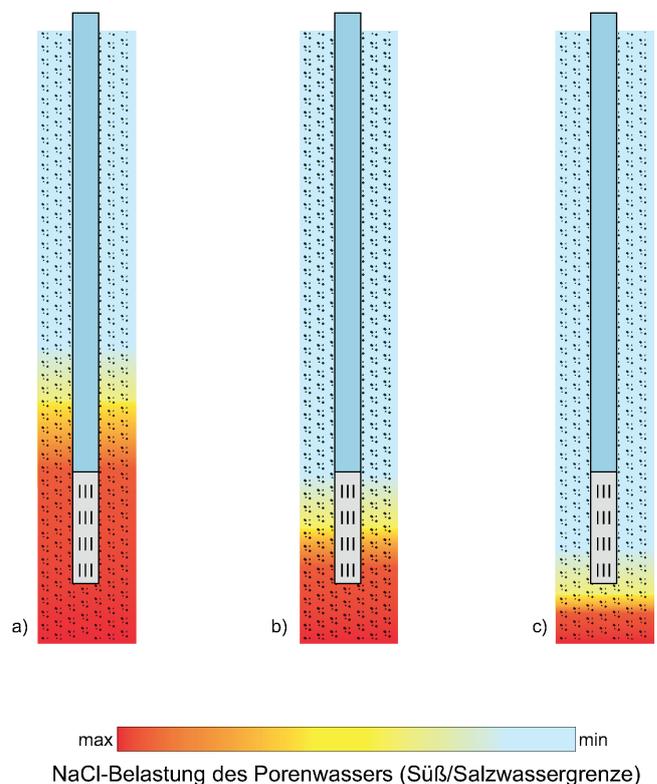


Bild 3: Schema der Wasserprobenahme aus Grundwassermessstellen [2]

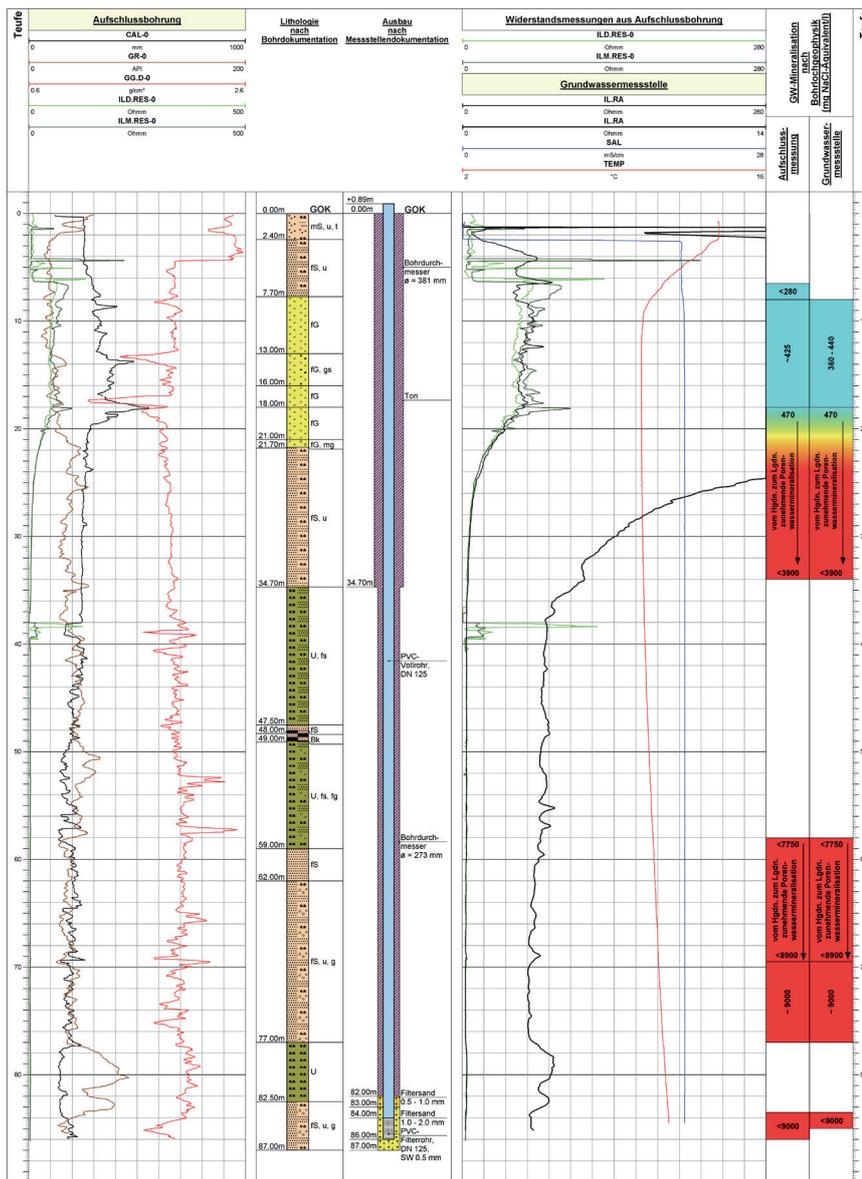


Bild 4: Vergleich der Leitfähigkeit innerhalb einer Messstelle mit der Leitfähigkeit im Gebirge

Entnahme von Grundwasserproben

Im Fall a) liegt die Süß-Salzwasser-Grenzlinie über der Filteroberkante. Man würde aus dieser Messstelle nur eine Salzwasserprobe bekommen, ohne wirklich zu wissen, wie hoch das Salzwasser schon gestiegen ist. Im Fall b), bei dem die Süß-Salzwasser-Grenzlinie im Bereich des Filters liegt, würde eine Mischprobe entnommen werden, also geringer versalzene Wasser. Auch hier ist eine genaue Bestimmung der Süß-Salzwasser-Grenzlinie nicht möglich. Im Fall c) würde die Probe nur Süßwasser erbringen. Auch hier ist keine Aussage möglich.

Nun könnte man annehmen, dass eine längere Filterstrecke hier Abhilfe schaffen könnte. Da Filterstrecken jedoch so gut wie nie gleichmäßig angeströmt werden, ist eine Probenahme umso weniger repräsentativ für die Charakterisierung des Grundwasserkörpers, je länger der Filter ist. Die Idee, gleich mehrere Bereiche eines Grundwasserleiters oder gar mehrere Grundwas-

serleiter mit einer Messstelle zu erfassen, verbietet sich hierbei von selbst.

Leitfähigkeit und Temperatur

Die Messung eines temperaturnormierten Leitfähigkeitsprofils (SAL/TEMP) in einer Grundwassermessstelle wird vielfach noch immer als Methode des Salzwassermonitorings angewendet. Dies liegt sicher nicht zuletzt an den relativ geringen Kosten für eine SAL/TEMP-Messsonde und an der einfachen Handhabung dieses Messsystems. Vergessen wird dabei jedoch, dass die Wassersichtung in der Messstelle in den seltensten Fällen mit der im anstehenden Gebirge korrespondiert. Oftmals kann man dabei feststellen, dass die Wassersäule der entspricht, die sich nach dem letzten Abpumpen, etwa zur Probenahme, eingestellt hat. Eine signifikante Veränderung ist danach nicht mehr eingetreten.

In **Bild 4** zeigt sich der markante Unterschied der Leitfähigkeit in der Messstelle (SAL-Messung) zur Leitfähigkeit und daraus berechneten Versalzung im Gebirge (IL). Die Leitfähigkeit in der Messstelle reagiert auf die hohe Mineralisation des Gebirges nicht einmal in unmittelbarer Filternähe bei 64 m.

Salzwassermonitoring mit langen Elektroden (SAMOLEG)

Dieser Methode liegt die Idee zugrunde, dass sich beim Anstieg von Salzwasser der elektrische Widerstand zwischen zwei tiefreichenden Elektroden verringern muss. Als tiefe Elektroden können dabei Brunnen oder Grundwassermessstellen aus Stahl

oder Kunststoffmessstellen, die zum Beispiel mit einem Kupferdraht versehen werden, genutzt werden.

Der Vorteil des Verfahrens ist, dass Veränderungen der Süß-Salzwasser-Grenzlinie flächenhaft erfasst werden. Hierzu sind jedoch mehrere lange Elektroden notwendig. Nachdem einmal ein solches System eingerichtet wurde, können die Daten auch mit geringem Aufwand ermittelt werden (permanente Messmethode). Nachteilig ist jedoch die relativ geringe Auflösung dieses Verfahrens.

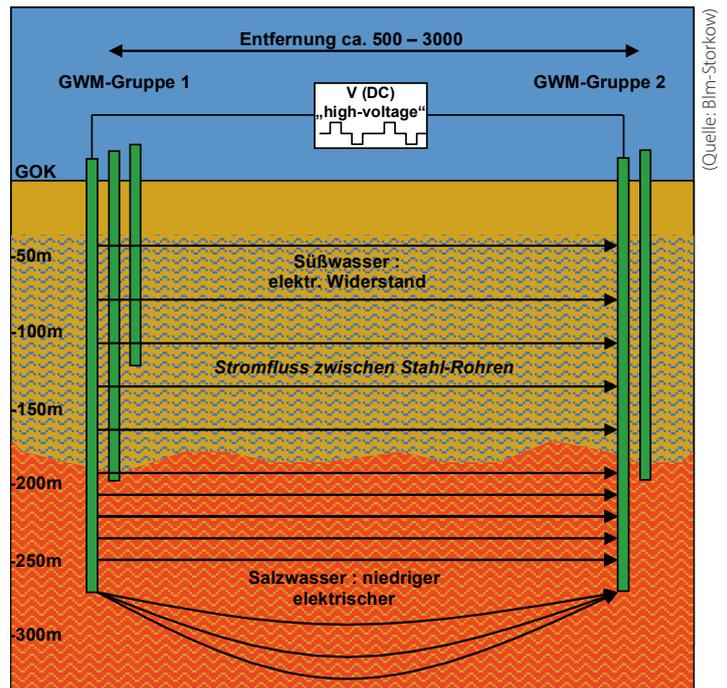
Induktive Messung der Leitfähigkeit

Als praktikable Lösung für das Salzwassermonitoring hat sich die Induktive Bohrlochgeophysikalische Leitfähigkeitsmessung (IL-Induktions-Log) herausgestellt. In einer Aufschlussbohrung (Rotary- oder Lufthebebohrung) werden dabei mittels Bohrlochgeophysikalischer Messungen die genaue geologische

Schichtenfolge, die Porosität und die Versalzung des Grundwassers in so genannten „NaCl-Äquivalent-Gehalten“ bestimmt. Die Bohrung sollte immer bis deutlich unter die Ausbauteufe der umliegenden Brunnen, am besten bis direkt in das anstehende Salzwasser, verteuft werden. Um solche Angaben aus den Messungen berechnen zu können, braucht man ein Messprogramm, das folgende Verfahren enthält, auch als „erweitertes Hydro-Standardmessprogramm“ bekannt:

- CAL (Kaliber-Log)
- EL (Widerstands-Log)
- IL (Induktions-Log)
- FEL (Fokussiertes Elektro-Log)
- SAL (elektrische Leitfähigkeits-Log der Bohrspülung)
- TEMP (Temperatur-Log der Bohrspülung)
- GR (Gamma-Ray-Log)
- GG.D (Gamma-Gamma-Dichte)
- NN (Neutron-Neutron-Log)

Grundlage für die Berechnung ist dabei die Tatsache, dass in wassergesättigten tonfreien Sedimenten (z. B. Sandstein, Sande, Kies) der spezifische elektrische Gesamt Widerstand nur vom



(Quelle: Birm-Storkow)

Bild 5: Prinzip des SAMOLEG-Verfahrens

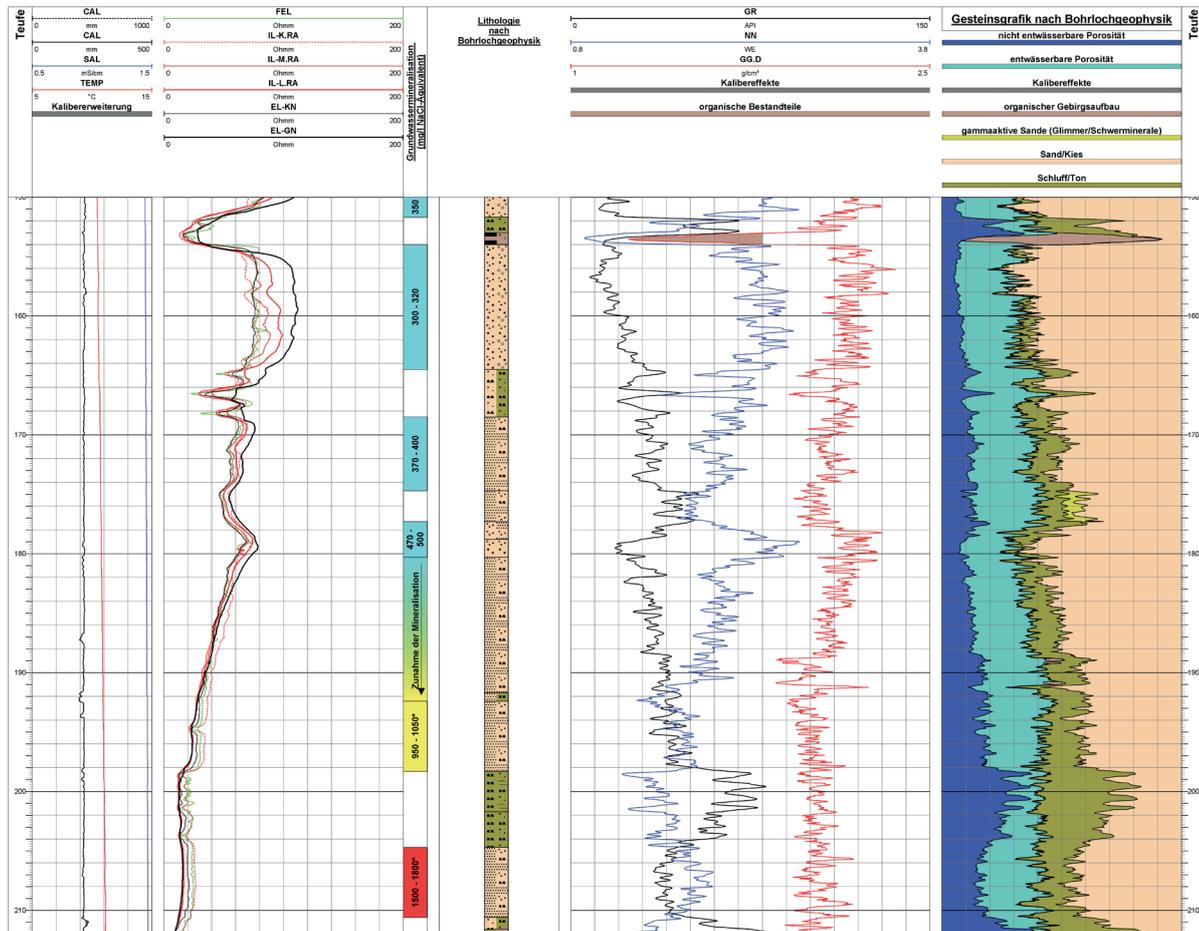


Bild 6: Ausschnitt der bohrlochgeophysikalischen Vermessung einer unverrohrten Aufschlussbohrung mit Mineralisationsberechnung (mg/kg NaCl – Äquivalent)

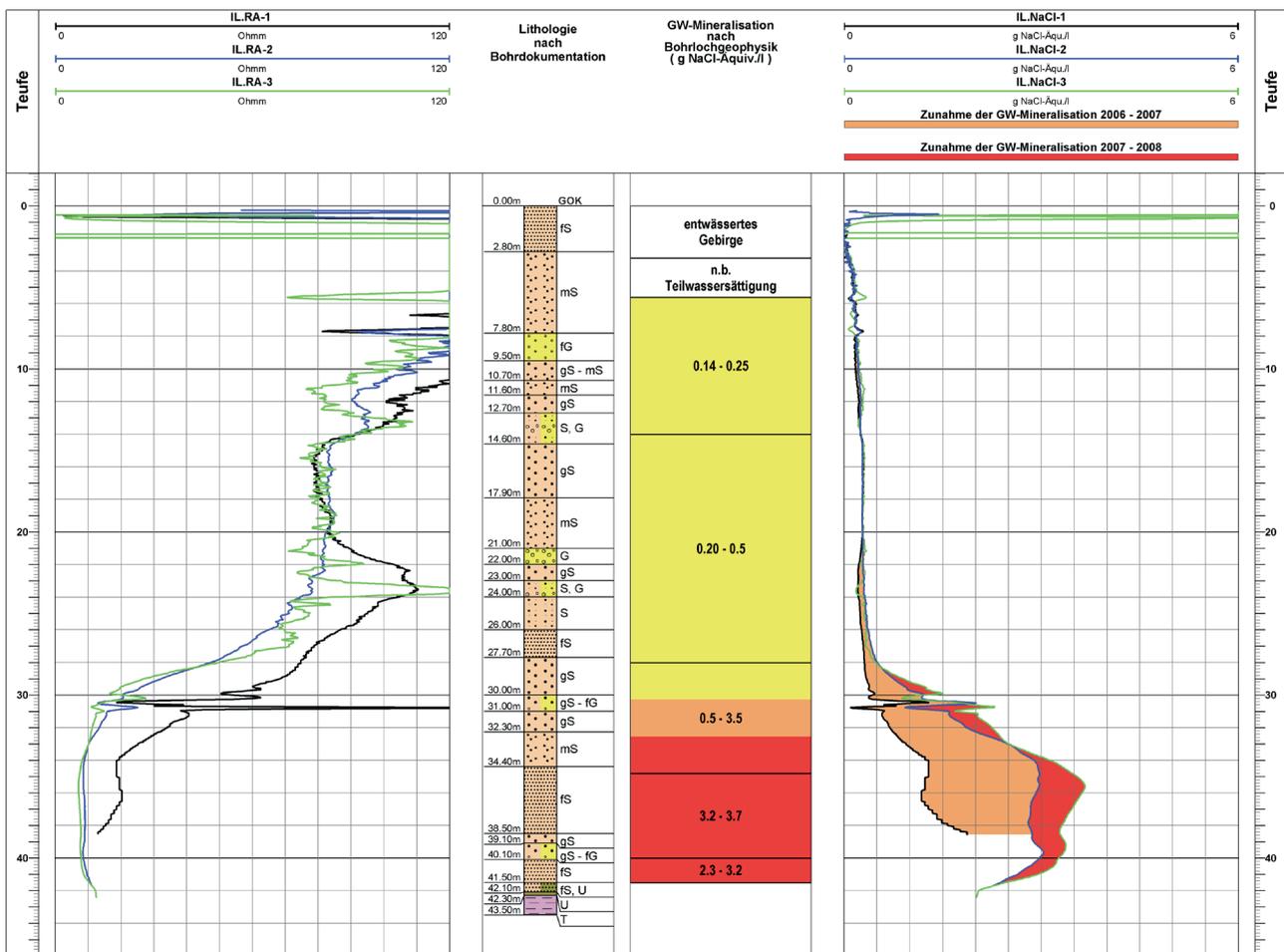


Bild 7: Salzwassermonitoring an einem Wasserwerksstandort

Wasseranteil, entsprechend der Porosität und dem Salzgehalt des Wassers abhängt. In **Bild 6** ist ein Ausschnitt der bohrlochgeophysikalischen Vermessung einer Aufschlussbohrung aus dem Umfeld eines Wasserwerksstandortes dargestellt. Wie auch in diesem Beispiel ersichtlich und in der Praxis fast immer zu finden, erfolgt der Wechsel von Süß- zu Salzwasser in der Regel innerhalb weniger Teufenmeter, im unteren Beispiel innerhalb des Teufenabschnitts von 180 bis 190 m. Das zeigt auch, welche Gefahr dies für Wasserwerksstandorte bedeuten kann. Es ist denkbar, dass quasi „über Nacht“ aus einem Süßwasser fördern den Brunnen ein Salzwasserbrunnen wird.

Anschließend wird die Bohrung zu einer Grundwassermessstelle, auch als „Wächtermessstelle“ bezeichnet, ausgebaut. Als Ausbaudurchmesser sollten dabei minimal 3“, besser 4“-PVC-Rohre verwendet werden. Für die nachfolgenden induktiven Messungen durch die Kunststoffverrohrung hindurch ist es dabei unerheblich, ob überhaupt eine Filterstrecke eingebaut wurde oder wie lang diese ist. Auch ist die Lage der Filterstrecke ohne Bedeutung. Es wurden schon Wächtermessstellen errichtet, die unter der Filterstrecke nochmals 30 bis 40 m Vollrohr haben. So ist es möglich, Messungen bis weit unter die Filterstrecke ausführen zu können. Wichtig ist nur, dass keine metalli-

schen Teile für den Ausbau verwendet werden. Selbst Madenschrauben für die Befestigung von Rohrzentralisatoren verursachen erhebliche Störungen bei den Induktions-Log-Messungen. Auch der Einsatz magnetisch markierter Tone oder Ton-Zement-Suspensionen muss tunlichst unterbleiben.

Mit dem Induktions-Log lassen sich die Leitfähigkeit und damit die Mineralisation des die Messstelle umgebenden Gebirges ermitteln. Vorzugsweise werden hierfür IL-Sonden eingesetzt, die in drei verschiedenen Eindringtiefen messen. So kann der Einfluss des Rohres und der Ringraumverfüllung auf die Messwerte weitestgehend eliminiert werden. Weiterhin wird zu Korrekturzwecken eine SAL/TEMP-Messung in der Messstelle durchgeführt. Durch zeitlich gestaffelte Wiederholungsmessungen wird die Dynamik der Süß-Salzwasser-Grenze mit einer hohen Genauigkeit ermittelt. Voraussetzung für eine zuverlässige Messung ist natürlich auch, dass die Grundwassermessstelle technisch einwandfrei ist. Dazu ist es erforderlich, diese Messstelle mittels der Bohrlochgeophysik mindestens hinsichtlich des Vorhandenseins notwendiger Ringraumabdichtungen und der Dichtheit der Rohrverbindungen zu prüfen. In **Bild 7** sind die Ergebnisse induktiver Messungen in einer Grundwassermessstelle in der Nähe eines Wasserwerksstandortes dargestellt.

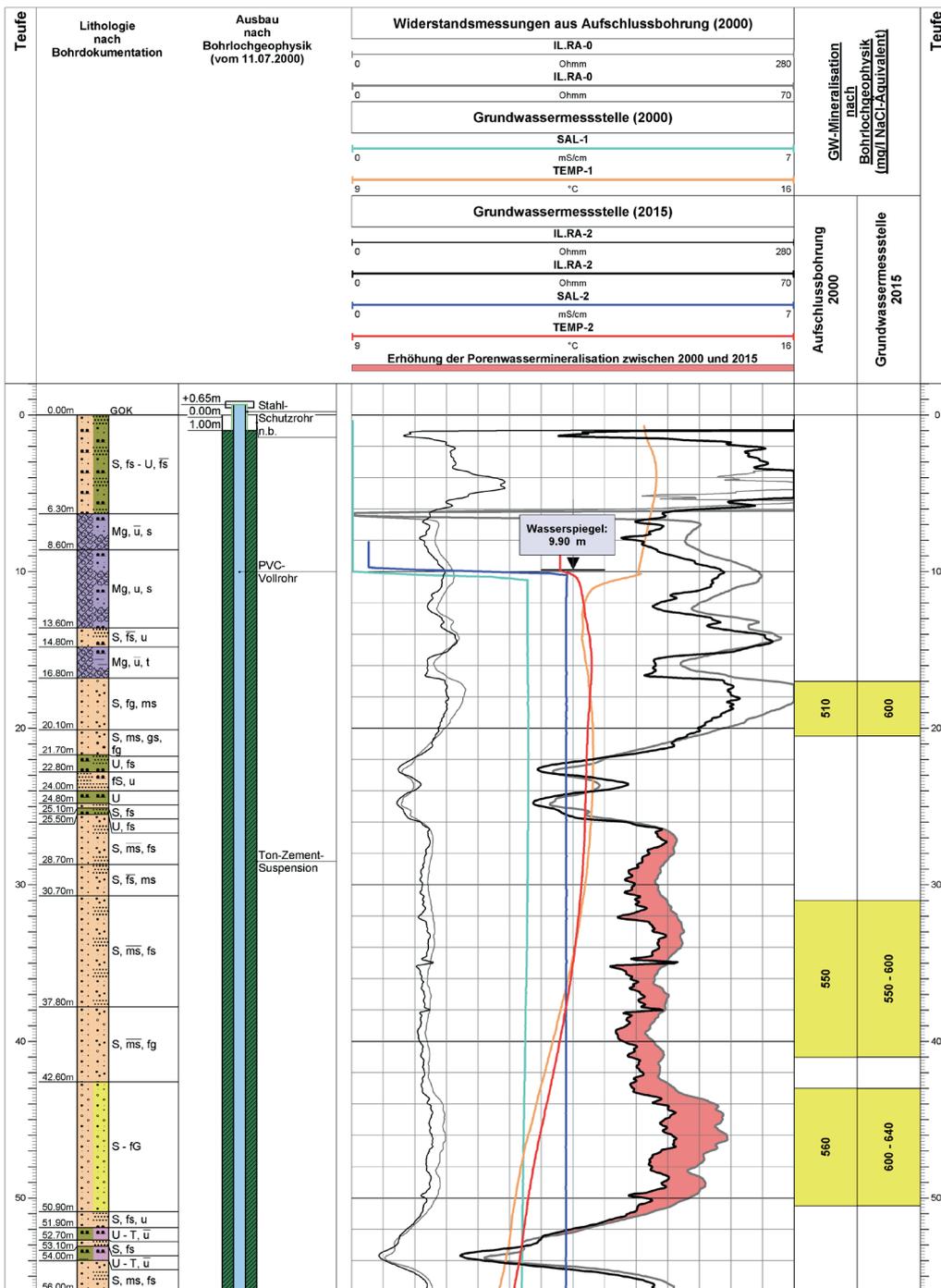


Bild 8: Lateraler Salzwassereintrag

Die Messungen erfolgten in den Jahren 2006, 2007 und 2008. Dabei zeigt es sich, dass es selbst über diesen recht kurzen Zeitraum zu einem deutlichen Anstieg der Süß-Salzwasser-Grenze gekommen ist.

In der in **Bild 8** dargestellten Messung erfolgt der Salzwassereintrag offensichtlich lateral. Eine Erhöhung der Mineralisation des Wassers ist nur im Bereich von 26 m bis 52 m nachweisbar. Unterhalb von 52 m ist die Mineralisation unverändert. Dies bedeutet, dass der Zustrom des Salzwassers horizontal erfolgt. Hieraus ergeben sich für die Planung von Monitoringmaßnah-

men erhebliche Konsequenzen. Insbesondere die Anordnung von Wächtermessstellen ist anders zu gestalten als bei einem Salzwasseraufstieg aus der Tiefe.

Ein relativ neues Verfahren ist die Messung des Huminstoffeintrags (SAK436). Hierbei wird der spektrale Absorptionskoeffizient im Wellenlängenbereich von 436 nm gemessen. Licht in diesem Wellenlängenbereich wird besonders stark durch Huminstoffe absorbiert. Etliche Wasserversorger in Deutschland haben mit hohen Huminstoffgehalten im Rohwasser Probleme. Für die Aufbereitung von huminstoffreichen Wäs-

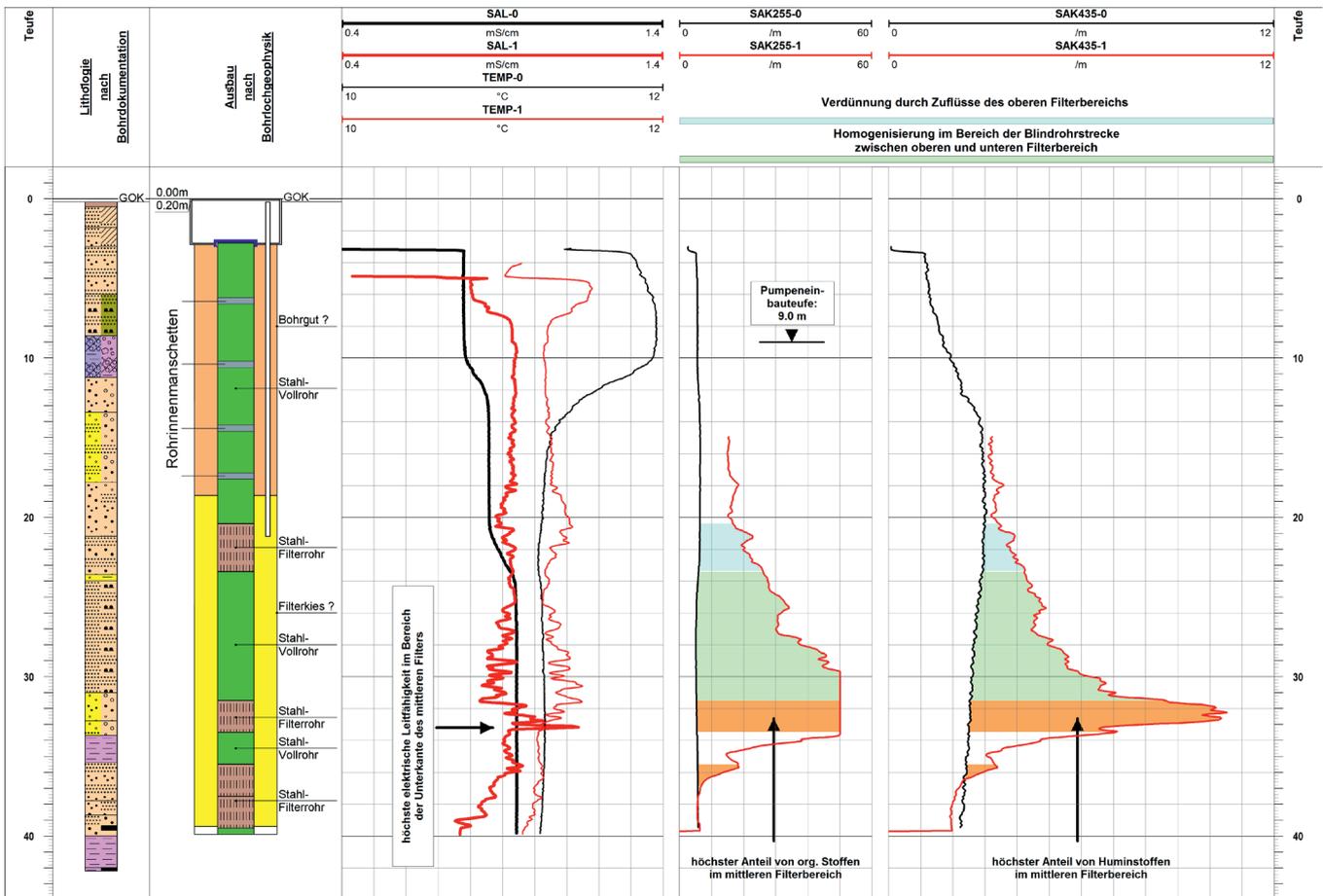


Bild 9: Huminstoffeintrag und Salzwasser

sern gibt es nach Kenntnis des Autors bisher auch keine praktikable Lösung. Mittels dieser Messung lassen sich die Zutrittszonen dieser Wässer genau bestimmen, dies auch weit unterhalb der optischen Wahrnehmung (Kamera). Im Idealfall ist es dann möglich, entsprechende Filterbereiche zu verschließen. Mindestens jedoch beim Neubau weiterer Brunnen können diese Erkenntnisse genutzt werden, um zukünftig die Huminstoffeinträge zu minimieren.

Bei den Huminstoffmessungen wurde an verschiedene Stellen festgestellt, dass diese Einträge mit einer erhöhten Mineralisation des Wassers einhergehen, man auch davon sprechen kann, dass Huminstoffeinträge ein „Vorbote“ für eine mögliche Versalzung von Brunnen sein können.

In Bild 8 wurden die Absorptionsspektren im Wellenbereich von 255 und 436 nm gemessen. Bei einer Wellenlänge von 255 nm wird der im Wasser gelöste Gesamtkohlenstoffgehalt (DOC) gemessen. In diesem Fall deckt sich der Eintrag von gelöstem Kohlenstoff mit dem Eintrag von Huminstoffen (SAK436). Auffällig ist jedoch, dass unmittelbar an der Filterunterkante der mittleren Filterstellung Wasser mit einer deutlich erhöhten Leitfähigkeit in den Brunnen eintritt, was für eine Mineralisationserhöhung spricht. Der genaue physikoche-

mische Zusammenhang zwischen Huminstoffeinträgen und erhöhter Mineralisation ist bisher noch nicht abschließend geklärt.

Literatur

- [1] Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD), Herausgeber Bundesanstalt für Gewässerkunde (www.bafg.de), Teil 1: Grundlage Hydrogeologie, Versalzung Binnenland und Meerwasser Intrusion.
- [2] Baumann, K., Burde, B., Liebau, Ch.: Monitoringmethoden für Wasserwerksstandorte mit Salzwassergefährdung; bbr Wasser, Kanal- & Rohrleitungsbau, Nr. 11 und 12/2004, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 2004

Kontakt:

Dr.-Ing. Gunther Baumann
 Bohrlochmessung-Storkow GmbH
 Storkow
 Tel. 033678 43630
 g.baumann@blm-storkow.de
 www.blm-storkow.de