

2.10 Grundwasserversalzung in Deutschland

SONJA MARTENS & KNUT WICHMANN

Groundwater salinization in Germany: 71% of the public water supply in Germany depends on natural groundwater resources. Fresh groundwater is often found only down to some 100 meters below ground surface. In about one third of the country, especially in low mountain range areas, freshwater is only found at the level of rivers. In greater depth the porous media is filled with salt water until depths of several kilometers. Low cost use of groundwater is only feasible when the salt concentration is below a certain limit. So it is very important to conduct complete surveys and continuous monitoring of salt water bodies. Geogenic groundwater salinization results from sea water intrusion in coastal areas, leaching from salt domes and upconing of deep salt water. These processes could be enhanced or initiated by anthropogenic activities.

Für die öffentliche Trinkwasserversorgung in Deutschland bildet das Grundwasser mit einem Anteil von 71% (Stand 2007) die wichtigste Ressource (BGR 2010). Das Vorkommen von Süßwasser ist häufig nur auf wenige 100 Meter Mächtigkeit beschränkt. In größeren Tiefen befindet sich Salzwasser, das nicht oder nur eingeschränkt am Wasserkreislauf teilnimmt. Eine wirtschaftliche Nutzung der Grundwasservorkommen sowohl für die öffentliche Wasserversorgung als auch für die Industrie und die Landwirtschaft ist nur dann möglich, wenn die Salzgehalte im Grundwasser bestimmte Werte nicht überschreiten.

Wasserwirtschaftliche Probleme resultieren aus der geogenen Grundwasserversalzung, wie dem Eindringen von Meerwasser in küstennahe Grundwasserleiter, der Ablaugung von Salzstrukturen im Untergrund und dem Aufstieg salzhaltiger Tiefenwässer sowie Versalzungerscheinungen, die durch den Eingriff des Menschen verstärkt bzw. hervorgerufen werden. Dabei kann es sich um lokal begrenzte, aber auch um regional flächenhaft auftretende Erscheinungen handeln. Durch Salzwasseraufstieg kann es zur Gefährdung von Brunnenfassungen bis hin zu deren Aufgabe kommen, da sich höhere Salzgehalte generell nur mit kostenintensiven und technologisch aufwändigen Aufbereitungsverfahren entfernen lassen. Die Grundwasserversalzung stellt daher ein wesentliches Problem für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung dar.

Zum Begriff der Grundwasserversalzung

Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers ist in erster Linie von dessen Genese abhängig. Weiterhin bestimmen chemisch-physikalische, mikrobielle und hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und porösen Medien die Konzentration von Chlorid, Natrium, Sulfat und weiteren Ionen im Grundwasser. Weiterhin prägen zusätzliche Senken und Quellen wie z.B. anthropogen eingetragene Stoffkonzentrationen die Grundwasserbeschaffenheit.

Die Begriffe »Grundwasserversalzung« bzw. »Versalzung« sind bisher nicht verbindlich definiert. Die Begriffe werden oftmals in Verbindung mit einer Überschreitung der menschlichen Geschmacksgrenze verwendet, deren Wert individuell abweichend empfunden wird und für Chlorid bei ca. 300 bis 400 mg/L liegt.

In Deutschland sind für eine Nutzung als Trinkwasser die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (2001) maßgebend. Diese betragen für Chlorid 250 mg/L, für Sulfat 240 mg/L und für Natrium 200 mg/L. Je mehr gelöstes Salz als Ionen im Wasser vorhanden ist, desto höher ist die elektrische Leitfähigkeit des Wassers. Daher gibt die Trinkwasserverordnung einen Grenzwert von 2.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (μS = Mikrosiemens) für die elektrische Leitfähigkeit bei 20°C an. Im November 2010 hat der Bundesrat die Novellierung der Trinkwasserverordnung beschlossen. Die angeführten Grenzwerte sind von den Änderungen nicht betroffen. Auch die EU-Richtlinie 11/1998 sieht mit Ausnahme von Sulfat gleiche Grenzwerte vor (Tab. 2.10-1).

GRUBE et al. (2000) empfehlen für wasserwirtschaftlich orientierte Fragestellungen, zur Festlegung der Süß-/Salzwassergrenze einen Chlorid- und/oder Sulfatgehalt über den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung, ggf. eine Gesamtmineralisation von 1.000 mg TDS/L (= total dissolved solids, Gesamt-Lösungsinhalt) oder einen Leitfähigkeitswert von ca. 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu verwenden.

Tab. 2.10-1: Für die Grundwasserversalzung relevante Grenzwerte für Trinkwasser nach der deutschen Trinkwasserverordnung (2001) und der EU-Richtlinie 11/1998.

Parameter	Trinkwasserverordnung (2001)	EU-Richtlinie (1998)
Chlorid	250 mg/L	250 mg/L
Sulfat	240 mg/L	250 mg/L
Natrium	200 mg/L	200 mg/L
Elektrische Leitfähigkeit $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei 20°C	2.500	2.500

Aus: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3.Auflage (2011)
- Hrsg. Lozán, J. L. H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

Ursachen der Grundwasserversalzung

Grundsätzlich lassen sich als Ursachen der Versalzung von Grundwasservorkommen geogene Quellen (Meerwasserintrusion in Küstenbereichen, Ablaugungsprozesse in der Umgebung von Salzstrukturen, Tiefenwasserantrieb) und anthropogene Quellen unterscheiden. *Abb. 2.10-1* zeigt schematisch die natürlichen Versalzungsvorgänge in Lockergesteinen nach HAHN (1982).

Meerwasserintrusion

Der durchschnittliche Salzgehalt des Meerwassers beträgt weltweit 35‰, d.h. 35 g/L. Seit langem ist die Versalzung küstennaher Grundwasservorkommen von See her bekannt (HERZBERG 1901). Dabei kommt es zu einem landwärts gerichteten Vordringen des Salzwassers und somit zu einer Unterschichtung des Süßwassers im Landesinneren. Dieser Prozess kann sich bis in größere Entfernungen vom Küstensaum erstrecken. Form und Reichweite der intrudierenden Wässer und folglich die Lage der Salz-/Süßwassergrenzfläche werden durch die Morphologie, die geologischen Verhältnisse, die Grundwasserneubildung und die Menge des binnenländischen Grundwasserstroms zur Küste beeinflusst (WICHMANN & GRUBE 2000). Erste Modellvorstellungen zur Berechnung der Salz-/Süßwassergrenze in küstennahen Grundwasserleitern wurden etwa zeitgleich von DRABBE & GHJIBEN (1888/89) und HERZBERG (1901) entwickelt. *Abb. 2.10-2* zeigt das idealisierte Ghjiben-Herzberg-Prinzip, das auf der Annahme eines

hydrostatischen Gleichgewichtes zwischen dem nicht gemischten Salz- und Süßwasser basiert und für die Grenzfläche einen scharfen Übergang annimmt. Tatsächlich handelt es sich um eine räumlich begrenzte Vermischungszone von meist wenigen Metern Stärke.

Z.B. ergibt sich mit einer Salzwasserdichte von 1.025 kg/m^3 und einer Süßwasserdichte von 1.000 kg/m^3 nach der Ghjiben-Herzberg-Gleichung $z = 40 \times h$ (vgl. *Abb. 2.10-2*). Die Lage der Salz-/Süßwassergrenze unter dem Meeresspiegel kann hier dem 40-fachen der Höhe des Süßwasserspiegels über dem Meeresspiegel entsprechen. Die Beziehung verdeutlicht, dass jeder Meter Absenkung bzw. Anhebung des Süßwasserspiegels im System einen entsprechenden Anstieg bzw. eine Erniedrigung der Salz-/Süßwassergrenze um 40 m nach sich zieht. Die natürlichen Vorgänge bei der Meerwasserintrusion werden durch den Eingriff des Menschen zusätzlich beeinflusst. So können Grundwasserentnahmen in küstennahen Bereichen das Vordringen der Salzwasserfront erheblich verstärken.

Salzstockablaugung

Im Binnenland auftretende Grundwasserversalzungen können auf Ablaugungsprozesse an hoch liegenden Salzstrukturen im Untergrund zurückgeführt werden. Diese gehen auf Ablagerungen aus dem Paläozoikum (Erdaltertum) und dem Mesozoikum (Erdmittelalter) zurück. Als potenzielle Salzquellen kommen insbesondere mächtige Salzvorkommen des Zechsteins und des Rotliegenden in Frage. Es sind Ablagerungen eines fla-

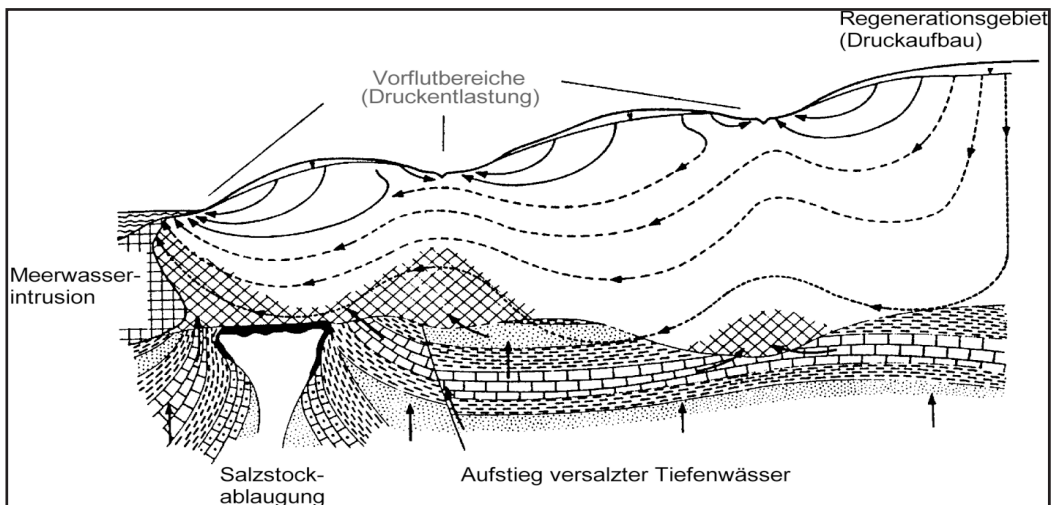


Abb. 2.10-1: Schema der natürlichen Grundwasserversalzungsvorgänge in Lockergesteinen (HAHN 1982). Dargestellt wird die Grundwasserströmung (generalisiert) und die Versalzung von Grundwasservorkommen durch Meerwasserintrusion, Aufsteigen von salzhaltigem Tiefenwasser und Salzstockablaugung.

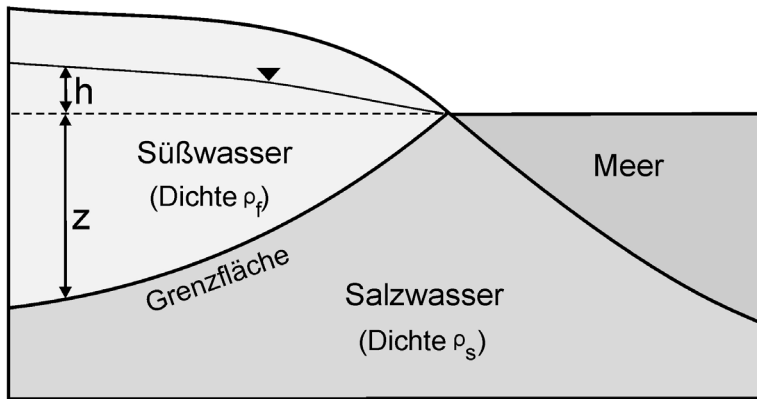
chen Meeresbeckens, das ehemals weite Teile Mitteleuropas bedeckte. In dem damaligen trockenen und heißen Klima verdunstete das Meerwasser allmählich, und die im Wasser gelösten Stoffe reichernten sich an. Mit zunehmender Verdunstung fielen zuerst die schwer löslichen Karbonate und Sulfate, anschließend das Steinsalz und zuletzt die leichter löslichen Kali- und Magnesiumsalze aus (SCHARF 1993). Im Laufe der Erdgeschichte wurden die Salzsichten durch hohe Deckschichten überlagert, und aufgrund der Erhöhung von Druck und Temperatur wurden die Evaporite (Eindampfungsgesteine) plastisch. Das Salz konnte die überlagernden Schichten durchbrechen und entlang von Störungszonen aufsteigen. Auf diese Weise gelangten die Salzstrukturen in den Wirkungsbereich oberflächennaher Grundwässer und unterliegen bis heute der allmählichen Ablaugung.

Die Salzkonzentration in der Umgebung von hoch aufragenden Salzstöcken kann bereits in einer Tiefe von 200 bis 300 m unter Gelände bei über 250 g/L liegen. Das bedeutet, dass in diesem Fall der Salzgehalt des Grundwassers bereits in mäßiger Tiefe höher konzentriert ist als im Meerwasser. Im direkten Kontaktbereich mit den Salzstöcken können sich sogar Gehalte bis zur Sättigung einstellen.

Tiefenwasseraufstieg

Eine weitere Ursache für binnenländische Versalzen stellt der Aufstieg von Tiefenwässern dar. Dabei handelt es sich um Wässer aus tiefen Grundwasserstockwerken, die nicht oder nur eingeschränkt am Wasserkreislauf teilnehmen. Ab einer Tiefe von einigen hundert Metern sind alle Grundwässer versalzt. Aufgrund der in größeren Tiefen auftretenden sehr kleinen hydraulischen Gradienten sind Tiefenwässer oftmals durch langsame Zirkulation und lange Verweilzeiten in der Größenordnung von mehreren 1.000 Jahren gekennzeichnet. Die Zusammensetzung der Tiefenwässer ist heterogen, und sie sind räumlich unterschiedlich verteilt, da sie nicht das Resultat eines einheitlichen Entstehungsprozesses sind. Es kann sich sowohl um im Porenraum eingeschlossenes, fossiles Meerwasser als auch um ursprünglich aus Niederschlagsinfiltration gespeiste Grundwasservorkommen handeln.

Die Grundwasserversalzung durch Tiefenwässer ist häufig eine flächenhafte Erscheinung, beispielsweise in den Lockergesteinen Norddeutschlands. Durch den Aufstieg und eine Zumischung von Tiefenwässern in Süßwässer in wasserwirtschaftlich genutzten Grundwasserleitern besitzen diese eine besondere Relevanz



Das Ghijben-Herzberg-Prinzip ermöglicht unter Annahme eines hydrostatischen Gleichgewichtes die Bestimmung der Höhenlage der Salz-/Süßwassergrenzfläche unterhalb des Meeresspiegels. Mit den Bezeichnungen aus der obigen Abbildung gilt:

$$z = \frac{\rho_f \cdot h}{\rho_s - \rho_f}$$

- z: Höhe der Salz-/Süßwassergrenzfläche unter dem Meeresspiegel (m)
- h: Höhe des Süßwasserspiegels über dem Meeresspiegel (m)
- ρ_f : Dichte des Süßwassers (kg/m³)
- ρ_s : Dichte des Salzwassers (kg/m³)

Abb. 2.10-2: Ghijben-Herzberg-Prinzip für die Salz-/Süßwassergrenze in einem freien küstennahen Grundwasserleiter.

für die Wasserversorgung. Wiederum können menschliche Aktivitäten den natürlichen Prozess beeinflussen. Beispielsweise kann es in Vorflutbereichen (vgl. *Abb. 2.10-1*) sowie im Absenkbereich von Entnahmebrunnen zum Upconing, einer kegelförmigen Aufwärtsbewegung der Salz-/Süßwassergrenze, kommen.

Anthropogene Quellen

Neben geogenen Grundwasserversalzungen kommt vielerorts auch anthropogen verstärkten bzw. hervorgerufenen Salzkonzentrationen eine große Bedeutung zu. Nach GRUBE et al. (2000) kommen als Quellen anthropogen erhöhter Salzgehalte im Grundwasser u.a. in Betracht:

- Altstandorte und Abtablagerungen
- Bergwerks- und Industriebalden
- Tiefen-Versenkung von Abwässern und Lagerstättenwässern
- Verrieselung von Abwässern und defekte Abwasseranlagen
- Uferfiltration von mit Salzwasser belasteten Vorflutern
- Land- und forstwirtschaftliche Nutzung
- Streusalzeinsatz auf Straßen
- Oxidation von künstlich entwässerten Torf- und Kohlevorkommen

Die anthropogenen Ursachen haben unterschiedliche Wirkungen auf das Ausmaß und die räumliche Verteilung der Salzkonzentrationen. Je nach Menge, Art und Dauer des Direkteintrages können die Salzgehalte im Grundwasser stark variieren. So lassen sich in vielen Stadtgebieten erhöhte Salzgehalte in flachen Grundwasserleitern auf den Einsatz von Streusalz in den Wintermonaten zurückführen. Dabei ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den höher mineralisierten Bereichen und den Haupttrouten der Streufahrzeuge in Stadtgebieten festzustellen (BESTER et al. 2006).

Salzwasservorkommen in Deutschland

Deutschland ist im europaweiten Vergleich zwar reich an Grundwasservorkommen, aber in mehr als einem Drittel des Landes, vorwiegend in Bereichen der Mittelgebirge, sind keine bedeutsamen Grundwasservorkommen vorhanden (BMU 2003).

CARLÉ (1975) gibt einen umfassenden Überblick zur regionalen Verteilung salzhaltiger Wässer: Demnach ist es durch eine Vielzahl von Bohrungen erwiesen, dass in einiger Tiefe unter der Oberfläche stets solche Wässer vorkommen. So ist der Untergrund der Norddeutschen Tiefebene durchgehend von stark bis hoch konzentrierten Salzwässern erfüllt. Der Buntsandstein in Mittel- und Süddeutschland enthält unter dem Niveau des Vorfluters fast ausnahmslos Salzwässer und die Keu-

per-Sandsteine Süddeutschlands enthalten vorwiegend Natrium-Sulfat-, aber auch Natrium-Chlorid-Wässer. Ebenso trifft man im Oberrhein-Graben mit tieferen Bohrungen stets Salzwässer an und solche Wässer sind auch in den alpinen Vortiefen oder Innenbecken nicht selten (CARLÉ 1975).

Für die Salzwasservorkommen in oberflächennahen Grundwassersystemen ist eine differenzierte Betrachtungsweise notwendig. Es existiert eine Vielzahl von regionalen und lokalen Übersichtskarten. Die einzige bundesweite Dokumentation von Versalzungs-zonen des oberflächennahen Grundwassers findet sich im großskaligen Maßstab (1:2.000.000) im Hydrologischen Atlas (BMU 2003). Nachfolgend sollen zwei Beispiele die überregionale Problematik der Grundwasserversalzung verdeutlichen.

Norddeutsche Tiefebene

GRUBE et al. (2000) geben eine Übersicht zur geogenen Grundwasserversalzung in genutzten Grundwasserleitern der Norddeutschen Tiefebene, dem größten zusammenhängenden Gebiet mit reichen Grundwasservorkommen in Deutschland. Die Kartendarstellung (*Abb. 2.10-3*) zeigt die relativ großflächige Verbreitung der geogenen Versalzungen sowie von geogener Grundwasserversalzung betroffene öffentliche Wasserwerke.

Küstenversalzungen treten hauptsächlich an der Nordsee, besonders ausgeprägt im Bereich der Flussmündungen von Elbe und Weser, auf. Ein bis zu 20 Kilometer breiter Küstenstreifen ins Landesinnere ist von der Meerwasserintrusion betroffen. Hauptursache für die großflächigen Versalzungen ist der allgemeine Meeresspiegelanstieg nach der letzten nordeuropäischen (Weichsel-)Vereisung. Nach dem Abschmelzen der skandinavischen Eismassen stieg der Nordseespiegel rasch an, wodurch auf breiter Front Salzwasser in die binnenländischen Grundwasserleiter drang. Außerdem wird die Meerwasserintrusion an der Nordsee durch die flache Morphologie, die Westwindvormacht und stärkere Sturmflutwirkung begünstigt (GRUBE et al. 2000). An der Ostseeküste besitzt die Küstenversalzung eine wesentlich geringere Ausdehnung. Ferner hat der durchschnittliche weltweite Salzgehalt des Meerwassers von 35‰ im Fall der Ostsee keine Gültigkeit. Die Ostsee zeigt von Westen nach Osten, d.h. mit wachsendem Abstand von den westlichen Zugängen zum Weltmeer, deutlich abnehmende Salzgehalte, z.B. in der Kieler Bucht 12 bis 15‰ und um Rügen mit 7 bis 9‰ (LIEDTKE & MARCINEK 1994).

Die binnenländischen Versalzungen sind in bestimmten Gebieten Norddeutschlands konzentriert, wobei überregionale Zusammenhänge festzustellen sind. Da der Aufstieg von Salzwässern oftmals an Ex-

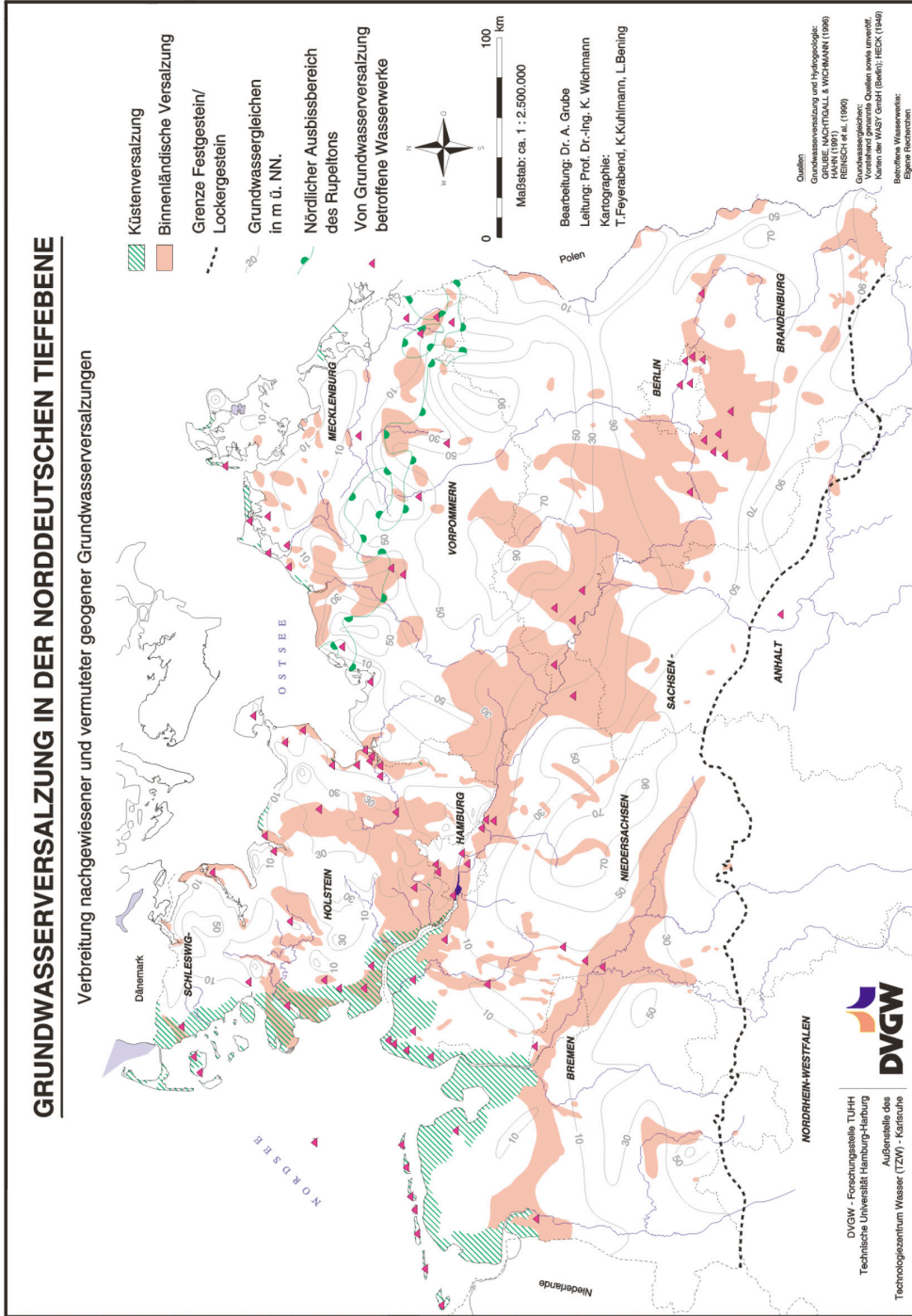


Abb. 2.10-3: Geogene Grundwasserversalzungen in der Norddeutschen Tiefebene (Grube et al. 2000) © DVGW-Forschungsstelle TUHH.

filtrationsbereiche gekoppelt ist, finden sich die Versalzungszone entsprechend häufig in Flussniederungen (Urstromtäler der Elbe und Weser) und größeren morphologischen Depressionen. Dagegen sind Salzwasservorkommen in den oftmals hoch gelegenen Neubildungsgebieten seltener und die Salz-/Süßwassergrenze liegt in diesen Gebieten deutlich tiefer.

Weitere entscheidende Ursache der geogenen Salzwasservorkommen sind die zahlreichen Salzstrukturen Norddeutschlands. Insgesamt sind in der Region mehrere Dutzend Salzstöcke vorhanden, deren Oberkanten weniger als 400 Meter unter Gelände liegen, und viele dieser Salzstöcke unterliegen ständigen Ablaugungsvorgängen. Beispielsweise ist im zentralen Elbe-Urstromtal der tiefere Grundwasserleiter aufgrund der Ablaugungen fast flächendeckend versalzen.

Vor allem in den östlichen Bundesländern spielen die Begrenzungen hydraulisch flächenhaft wirksamer Trennhorizonte (z.B. Rupelton) für die Verbreitung des Salzwassers eine Rolle. In Bereichen mit reduzierten oder fehlenden Rupelton-Mächtigkeiten bzw. im nördlichen Ausbissbereich des Rupeltons sind Versalzungszone feststellbar.

GRUBE et al. (2000) geben eine quantitative Abschätzung für die von geogenen Versalzungen betroffenen Flächen in der Norddeutschen Tiefebene (Tab. 2.10-2). Danach sind im gesamten Bilanzraum Flächen von etwa 5.200 km² durch die Küstenversalzung und etwa 28.000 km² bzw. 24,5% der gesamten Fläche des Bilanzgebietes durch binnenländische Versalzung betroffen (GRUBE et al. 2000).

Weser-/ Werra-Region

Als ein Beispiel für anthropogen verursachte bzw. verstärkte Versalzungen in Norddeutschland ist die Grund-

wasserversalzung durch Uferfiltration von versalztem Flusswasser aus Werra und Weser zu nennen. Die Flüsse sind seit je her durch einen natürlichen Salzstrom aus dem tiefen Untergrund der Zechsteinformation mit Salz belastet (LIERSCH 1993). Auch Uferfiltration ist generell ein natürlicher Vorgang, durch den bei entsprechenden hydraulischen Bedingungen ein Zutritt von Oberflächenwasser in die angrenzenden Grundwasserleiter erfolgt.

Aber erst durch anthropogen erhöhte Stofffrachten in Flüssen gewinnt die Uferfiltration ihre große Bedeutung für die Versalzung oberflächennaher Grundwasservorkommen. Im Fall der Werra und Weser gehen die Versalzungen hauptsächlich auf die seit Ende des 19. Jahrhunderts eingeleiteten Abwässer der Kali-Industrie zurück. Insbesondere nach 1968 stellten sich hohe Konzentrationen ein, da in der damaligen DDR die unterirdische Verpressung salzhaltiger Produktionswässer eingestellt wurde und eine verstärkte Entsorgung über die Flüsse begann (LIERSCH 1993). In der Werra wurde zeitweise unterhalb des Kalireviere eine maximale Chloridkonzentration von 40 g/L gemessen, also ein Salzgehalt über dem des Nordseewassers. Seit Ende der 1990er Jahre ist die Salzbelastung der Flüsse aufgrund von Betriebsstilllegungen und technischen Maßnahmen bedeutend zurückgegangen (LIERSCH 1993).

Schlussbetrachtung

Eine verlässliche Überwachung von Versalzungsercheinungen im Umfeld von Wasserfassungen und bekannten Salzwasseraufstiegsbereichen ist eine wichtige Voraussetzung, um im Sinne der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie Schäden zu vermeiden und bereits eingetretene Schäden zu regulieren. Hierzu werden

Tab. 2.10-2: Übersicht von durch geogene Grundwasserversalzung betroffenen Flächen in der Norddeutschen Tiefebene (GRUBE et al. 2000). Die Angaben beziehen sich auf die in der Karte (Abb. 2.10-3) dargestellten Lockergesteinsbereiche der jeweiligen Bundesländer.

<i>Bundesland</i>	<i>Fläche des Bilanzgebietes (km²)</i>	<i>Küstenversalzung</i>		<i>Binnenländische Versalzung</i>	
		<i>Fläche (km²)</i>	<i>Anteil (%)</i>	<i>Fläche (km²)</i>	<i>Anteil (%)</i>
<i>Brandenburg und Berlin</i>	29.279	0	0	8.498	29,0
<i>Hamburg</i>	754	0	0	338	44,8
<i>Mecklenburg-Vorpommern</i>	23.566	155	0,7	5.228	22,2
<i>Niedersachsen und Bremen</i>	37.735	3.156	8,4	7.333	9,4
<i>Sachsen-Anhalt</i>	8.481	0	0	2.183	25,7
<i>Schleswig-Holstein</i>	15.720	1.928	2,3	4.738	30,1
<i>Gesamt</i>	<i>115.535</i>	<i>5.239</i>	<i>4,5</i>	<i>28.318</i>	<i>24,5</i>

Messungen und Analysen in bzw. aus vorhandenen Messstellen und Brunnen sowie Pumpversuche durchgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass der Anstieg der Salzkonzentration in Förderbrunnen einer sorgfältigen Beobachtung bedarf, da die Fließgeschwindigkeiten im Salzwasser im Verhältnis zum Süßwasser verhältnismäßig klein sind. Damit ist auch die Umkehrung, d.h. ein Zurückdrängen einer näher gerückten Versalzungsfront in übersehbaren Zeiträumen kaum möglich. Daher sind Frühwarnmessstellen für die Beobachtung kritischer Bewegungen der Süß-/Salzwassergrenze sowie für hydrochemische Auswertungen sinnvoll zu positionieren und regelmäßig zu überwachen. Numerische Grundwassermodelle können bei der Entwicklung von Entscheidungsgrundlagen für eine optimale Bewirtschaftung eine große Hilfe darstellen. Dabei werden in der Regel dreidimensionale Strömungs- und Transportmodelle eingesetzt, die im Bedarfsfall durch dichteabhängige Modellierungen ergänzt werden. Eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung setzt die Betrachtung der regional zusammenhängenden Süßwasserkörper, d.h. Flusseinzugsgebiet mit zugehörigem süßen Grundwasserkörper, sowie die genaue Kenntnis der Lage der Süß-/ Salzwassergrenzschichten voraus. Von einer nachhaltigen Wassernutzung kann nur gesprochen werden, wenn ein Vordringen von Süß-/Salzwassergrenzen ausgeschlossen werden kann.

Literatur

- BMU (Hrsg.) (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland, Bonn.
- BESTER M.L., FRIND E.O., MOISON J.W. & RUDOLPH D.L. (2006): Numerical investigation of road salt. Impact on an urban wellfield. *Groundwater*, 44, 2: 165-175.
- BGR (2010): Grundwasseranteil an der öffentlichen Wasserversorgung der Bundesländer in 2007. http://www.bgr.bund.de/nn_322854/DE/Themen/Wasser/grundwasser_gewin_tab.html, Abruf 01.12.2010.
- CARLÉ W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa – Geologie, Chemismus, Genese. Wiss. Verl.-Ges., Stuttgart.
- DRABBE J. & GHIJZEN, W.B. (1888/89): Nota in Verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Kon. Inst. Ing. Tijdschr., Amsterdam, 8-22.
- GRUBE A., WICHMANN, K., HAHN, L & NACHTIGALL, K.H. (2000): Geogene Grundwasserversalzung in den Poren-Grundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft. TZW-Schriftenreihe, 9, Karlsruhe, 203 pp.
- HAHN J. (1982): Hydrochemische Probleme (Versalzung) bei natürlichen Grundwässern in Niedersachsen. Veröff. Inst. Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, 34, 111-129.
- HERZBERG B. (1901): Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *Journ. Gasbeleuchtung, Wasserversorgung*, 44, 815-819 u. 842-844.
- LIEDTKE H. & MARCINEK, J. (Hrsg.) (1994): Physische Geographie Deutschlands. Justus Perthes Verlag, Gotha, 559 pp.
- LIERSCH K.M. (1993): Die Entwicklung der Salzfrachten in Werra und Weser. In: DVWK (Hrsg.): Salz in Werra und Weser: Ursachen, Folgen, Abhilfe. DVWK-Mitteilungen, 24, Bonn, 69-82.
- SCHARF H.-J. (1993): Abwasser und Rückstand bei der Kaliproduktion. In: DVWK (Hrsg.). Salz in Werra und Weser: Ursachen, Folgen, Abhilfe. DVWK-Mitteilungen, 24, Bonn, 20-39.
- WICHMANN K. & GRUBE A. (2000): Wasserressourcen und Grundwasserversalzung in Norddeutschland. *gwf Wasser/Abwasser* 141 (13), 8-65.
- Dr.-Ing. Sonja Martens*
Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Zentrum für CO₂-Speicherung
Telegrafenberg - 14473 Potsdam
martens@gfz-potsdam.de
- Prof. Dr.-Ing. Knut Wichmann*
DVGW-Forschungsstelle TUHH
Institut für Wasserressourcen und Wasserversorgung
Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)
Schwarzenbergstraße 95 E - 21073 Hamburg
wichmann@tu-harburg.de