

Geophysikalische Untersuchungen zur Salz-Süßwasser-Grenze an der Westküste Schleswig-Holsteins

> Riewert Ketelsen

Salzwasserintrusionen in küstennahen Grundwasserleitern sind ein weit verbreitetes Problem für die Grundwasserversorgung, so auch an der schleswig-holsteinischen Westküste. Aus den holozänen Ablagerungen der Marschgebiete ist eine Trinkwasserentnahme kaum möglich. Früher sind für die Trinkwasserversorgung flache Brunnen in den pleistozänen Geestkern gegraben oder gebohrt worden. Auf Warften in der Marsch und auf den Halligen, die keinen Geestkern haben, ist Regenwasser aufgefangen und für den häuslichen Gebrauch genutzt worden.

Durch den erhöhten Eigenbedarf und den Tourismus ist der Wasserverbrauch in den letzten Jahrzehnten enorm angestiegen. Diese Gebiete werden heute von wenigen Wasserwerken auf der Geest versorgt. Folgende **Grundwassermengen** sind auf den Nordfriesischen Inseln im Jahre 2002 gefördert worden:

Sylt	2.750.000 m ³
Föhr	1.100.000 m ³
Amrum	330.000 m ³ (die Ortschaft Norddorf hat noch Einzelversorgung)

Während bei den hier beschriebenen Beispielen von den Inseln Föhr und Amrum noch keine Versalzungserscheinungen in den Brunnenfeldern aufgetreten sind, mussten auf Sylt zwei Brunnenfelder verlegt werden.

Grundwasserversalzung an der Westküste Schleswig-Holsteins

Die Oberflächengeologie der schleswig-holsteinischen Westküste wird - bis auf die Geestkerne der Nordseeinseln Sylt, Föhr und Amrum - von den holozänen Ablagerungen der Marschen bestimmt. Genutzt werden im Wesentlichen quartäre Grundwasserleiter, lediglich auf Sylt sind tertiäre Wasserleiter (Pliozäne Kaolinsande) vertreten.

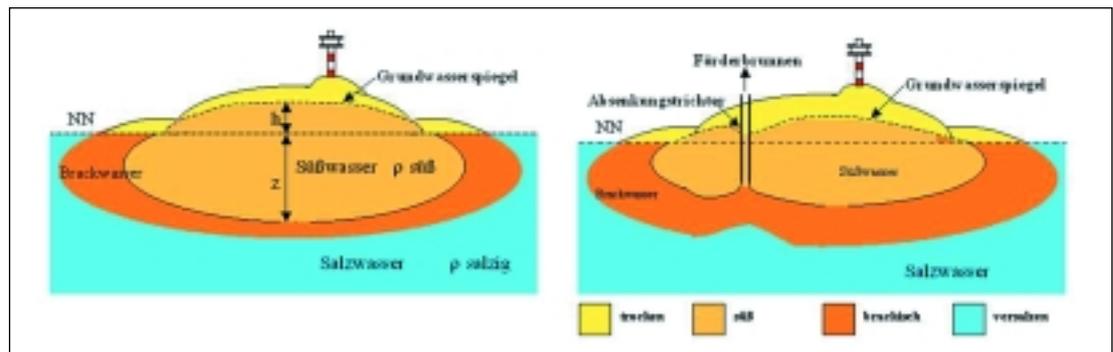
Meerwasserintrusionen in die Grundwasserleiter haben durch den Anstieg des Meeresspiegels nach der letzten Kaltzeit stattgefunden. Bedingt durch das größere spezifische Gewicht ist Salzwasser in die meisten Grundwassersysteme der Nordseeküste und in einige Bereiche der Ostseeküste eingedrungen.

Eine allmähliche Aussüßung konnte dort einsetzen, wo es durch Meeresablagerungen zur Bildung von Vorland kam. Durch den abgelagerten Klei konnte bei Überflutungen kaum noch Salzwasser in den Grundwasserleiter eindringen und es bildete sich eine Brackwasserzone. Grundwasser wird im Folgenden als **Brackwasser** bezeichnet, wenn der spezifische elektrische Widerstand auf 80 Prozent des Normalwertes abgesunken ist. Beträgt der spezifische elektrische Widerstand nur noch 20 Prozent des Normalwertes, wird die Bezeichnung **Salzwasser** gewählt. Nach Eindeichung des Vorlandes waren diese Gebiete vom Meer abgetrennt und die Aussüßung konnte verstärkt stattfinden. Auf den Nordseeinseln mit pleistozänen Ablagerungen, die um

einiges über NN liegen, kann sich eine Süßwasserlinse im Grundwasserleiter bilden. In der Praxis stellt sich keine starre Grenzschicht ein, durch Diffusion und durch den Tidenhub (periodische Schwankung im Stundenbereich) ergibt sich eine Übergangszone mit Brackwasser.

Wird durch intensive Wasserförderung der Grundwasserspiegel im Bereich des Förderbrunnens abgesenkt, so nimmt auch dort die Tiefe der Salz-Süßwassergrenze ab und es kann im Extremfall zur Förderung von Brack- oder sogar Salzwasser kommen (Abbildung 1). Zur Sicherstellung der Wasserversorgung muss daher der Verlauf der Salz-Süßwassergrenze bekannt sein.

Abbildung 1: Süßwasserlinse auf einer Insel im ungestörten Fall (links) und bei starker Grundwasserentnahme (rechts)



Geophysikalische Untersuchungen zur Kartierung der Salz-Süßwassergrenze an der Westküste Schleswig-Holsteins

In den letzten 30 Jahren wurden vom Geologischen Landesamt Schleswig-Holstein (seit 1996 Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Abteilung Geologie/Boden) Hunderte von geoelektrischen Messungen auf den Nordfriesischen Inseln mit Geestkern durchgeführt. Es handelte sich

hierbei sowohl um elektrische Bohrlochvermessungen als auch um geoelektrische Sondierungen in Schlumberger-Konfiguration. Zur Durchführung dieser Messungen wurde eine geoelektrische Messapparatur entwickelt, die in einem Messfahrzeug fest installiert ist. Das Messfahrzeug ist für die Durchführung geophysikalischer Bohrlochvermessungen und geoelektrischer Sondierungen konzipiert (Abbildung 2).

Abbildung 2: Messfahrzeug zur Durchführung geoelektrischer Sondierungen und geophysikalischer Bohrlochmessungen



Typische spezifische Widerstände für Grundwasserleiter mit starker Versalzung liegen deutlich unter 3 Ohmmeter (Ωm), während sie für unversalzene Grundwasserleiter im Bereich von 60 bis 200 Ωm und für die vermischten Brackwässer zwischen 3 Ωm und dem typischen Widerstand des jeweiligen Grundwasserleiters liegen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit - wenn der geologische Aufbau bekannt ist - Tiefenlage und Verlauf der Salz-Süßwassergrenze mit geophysikalischen, speziell geoelektrischen oder elektromagnetischen Verfahren zu kartieren.

Ergebnisse

Exemplarisch sollen die Ergebnisse an **drei Beispielen** gezeigt werden:

1. Tiefenlage und Einfallen des Salz-Süßwassergrenze auf der Insel Föhr
2. Vergleich der Grundwasserverhältnisse auf der Insel Amrum und auf der vorgelagerten Sandbank Kniepsand
3. Einfluss von Überflutungen und Wasserentnahmen auf die Salz-Süßwassergrenze auf der Insel Sylt

1. Föhr: Tiefenlage und Einfallen der Salz-Süßwassergrenze

Auf der Nordseeinsel Föhr wurden geoelektrische Messungen zur Abschätzung des verfügbaren Grundwasservolumens durchgeführt. Außerhalb des Grundwasserschutzgebietes wurde zusätzlich im westlichen Teil der Insel versucht, das Einfallen der Salz-Süßwassergrenze zu bestimmen. Hierzu wurden in der Nähe der Deichlinie längs eines Profils geoelektrische Sondierungen durchgeführt (Abbildung 3). Die Geländehöhe an den Messlokalisationen betrug circa zwei Meter über Normalnull (NN) bei einem Grundwasserflurabstand von etwa einem Meter.

Die Auswertung der Sondierungen ergab einen Süßwasser führenden Grundwasserleiter mit spezifischen elektrischen Widerständen von 130 bis 180 Ωm , in dem eine tonig-schluffige Lage eingebettet ist. Im Liegenden konnte die Salz-Süßwassergrenze erfasst werden, die mit zunehmender Entfernung von der Deichlinie von etwa 14 Meter auf etwa 28 Meter abtaucht.

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse einer Bohrung aus dem südöstlichen Teil der Insel, die 400 Meter vom Strand entfernt auf einer Höhe von 2,5 m über NN liegt und bei der der Grundwasserflurabstand 1,5 Meter beträgt. Eine geoelektrische Bohrlochvermessung hat bis zur Endteufe von 120 Metern kei-

ne Anzeichen auf Grundwasserversalzung ergeben.

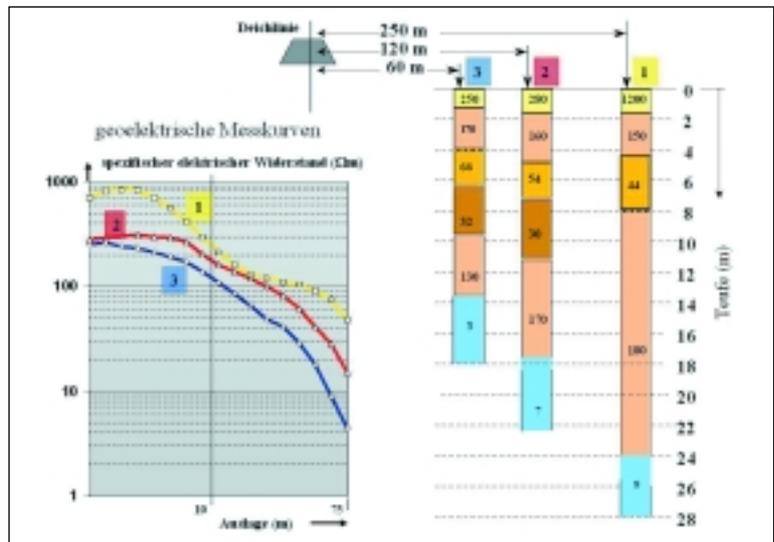


Abbildung 3: Geoelektrische Sondierungen zur Bestimmung von Tiefenlage und Einfallen der Salz-Süßwassergrenze auf der Insel Föhr

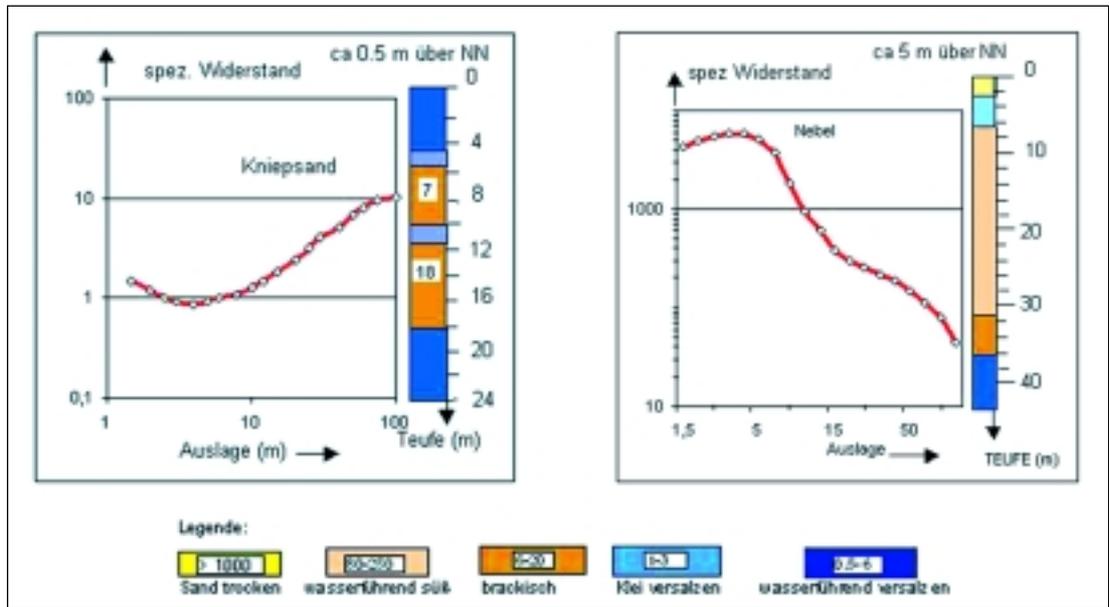
2. Amrum: Vergleich der Grundwasserverhältnisse auf der Insel und auf der vorgelagerten Sandbank Kniepsand

Zur Untersuchung der Grundwasserverhältnisse sind auf der Insel Amrum flächendeckend geoelektrische Sondierungen durchgeführt worden. Zum Vergleich wurde ebenso auf dem bis zu 900 Meter breiten vorgelagerten Kniepsand sondiert, der in der Regel mehrfach im Jahr überflutet wird.

Exemplarisch werden hier zwei Sondierungsergebnisse gezeigt (Abbildung 4). Die Sondierung westlich der Ortschaft Nebel hinter der ersten Dünenkette, die 700 Meter vom Flutsaum entfernt liegt, zeigt neben einer oberflächennahen Kleischicht einen gut ausgeprägten Grundwasserleiter im Tiefenbereich von 9 bis 30 Meter mit einem spezifischen Widerstand von 220 Ωm . Derartig hohe spezifische Widerstände sind typisch für Grundwasserleiter mit einer sandigen Überdeckung und werden oft in der schleswig-holsteinischen Geest angetroffen. Die hohe Infiltrationsgeschwindigkeit des Niederschlagswassers führt zu einer geringen Mineralisierung des Grundwassers.

Die Sondierung auf dem Kniepsand zeigt kein Süßwasser, wohl aber zwei Brackwasserzonen mit spezifischen Widerständen von 7 und 18 Ωm . Das bedeutet, dass der Grundwasserabstrom vom Geestkern der Insel zu einer Aussüßung im Vorland geführt hat. Außerdem wurden zwei Kleischichten erfasst, die auch im südlichen Teil der Nachbarinsel Sylt nachgewiesen wurden.

Abbildung 4:
Goelektrische
Sondierungen zur
Bestimmung der
Grundwasserver-
hältnisse auf der In-
sel Amrum und der
vorgelagerten
Sandbank Kniep-
sand



3. Sylt: Einfluss von Überflutungen und Wasserentnahmen auf die Salz-Süßwassergrenze

Das Trinkwasser für die Ortschaft Hörnum auf der schmalen Landzunge im Süden der Insel Sylt wird im Dünengürtel gewonnen. Im Bereich des Brunnenfeldes, dessen Lage nach geoelektrischen Sondierungen festgelegt wurde, sind sechs Beobachtungsbrunnen mit 5 bis 20 Meter langen Filterstrecken ausgebaut worden. Der Grundwasserspiegel schwankt zwischen 0,7 m bis 0,8 m über NN. Nach den geophysikalischen Bohrlochvermessungen lag die Salz-Süßwasser-Grenze in einer Tiefe von 40 Metern, mit einer deutlichen Brackwasserzone darüber.

Der am weitesten westlich gelegene Beobachtungsbrunnen wurde im Frühjahr 1983 bei einer Sturmflut überflutet. Da das Meerwasser über eine kleine Dünenkette eindrang, konnte das Wasser nicht zurückfließen und sickerte in den sandigen Boden ein. Bedingt durch das höhere spezifische Gewicht des Salzwassers fand eine Umschichtung der Wasser statt.

Der spezifische elektrische Widerstand des Grundwassers wurde mit einer elektrischen Leitfähigkeitssonde im Filterbereich regelmäßig gemessen (Abbildung 5). Am 4. August 1981, also vor der Überflutung, war unterhalb des Süßwassers mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von $23 \Omega\text{m}$ der Übergangsbereich zum Brackwasser zu erkennen. Nach der Überflutung war das Wasser im gesamten Filterbereich versalzen mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von etwa $1 \Omega\text{m}$. Ein Jahr später zeigte sich eine geringere Aussüßung im oberen Bereich. Im Sommer des gleichen Jahres ergab sich bereits eine

Brackwasserzone mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von $6 \Omega\text{m}$ in der gesamten Filterstrecke. Eine Umschichtung der Wasser durch den hydrostatischen Druck des Süßwassers im Grundwasserkörper fand bis zur nächsten Überflutung statt.

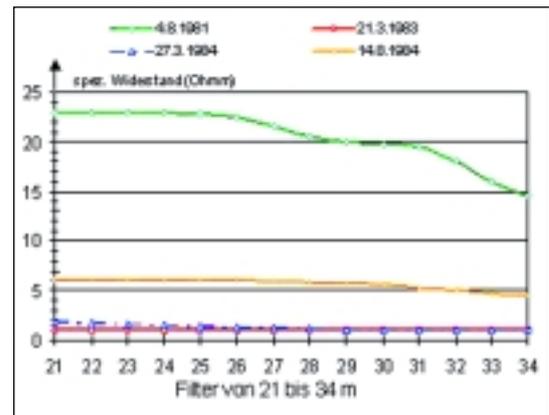


Abbildung 5: Spezifischer elektrischer Widerstand des Grundwassers, gemessen in einem Beobachtungsbrunnen nach einer Überflutung

Den Einfluss von Grundwasserentnahmen auf die Tiefe der Salz-Süßwasser-Grenze zeigt Abbildung 6. In Westerland wurde Anfang der 80er Jahre aufgrund hoher Grundwasserentnahme sowie der Grundwasserabsenkung für Baumaßnahmen ein Anstieg der Salz-Süßwasser-Grenze beobachtet. Daher wurde das Brunnenfeld für die Wasserversorgung aus dem Stadtgebiet in den Geestkern verlegt. Zur Beobachtung der Salz-Süßwasser-Grenze wurde im Herbst 1981 eine 110 Meter tiefe Bohrung abgeteuft und geophysikalisch vermessen. Nach der Interpretation des Widerstand-Logs lag die Versalzungsgrenze in einer Tiefe von circa 90 Metern. Daraufhin wurde der Tiefenbereich von 60 bis 90 Metern verfil-

tert. Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Salz-Süßwasser-Grenze. Mit Beginn der Förderung kann ein Anstieg der Salz-Süßwasser-Grenze sowie eine Verbreiterung der Brackwasserzone beobachtet werden. Seit Beginn des Dauerbetriebes im Jahre 1984 hat sich in den 7 Jahren bis zur letzten Kontrollmessung die Brackwasserzone nicht weiter

nach oben bewegt, es konnte sogar eine leichte Absenkung der Versalzungsgrenze beobachtet werden, die aber durch den höheren Grundwasserspiegel bei den Kontrollmessungen jeweils im Frühjahr 1988 und 1991 bedingt sein kann. Es hat sich also durch die Förderung ein neues stabiles Gleichgewicht eingestellt.

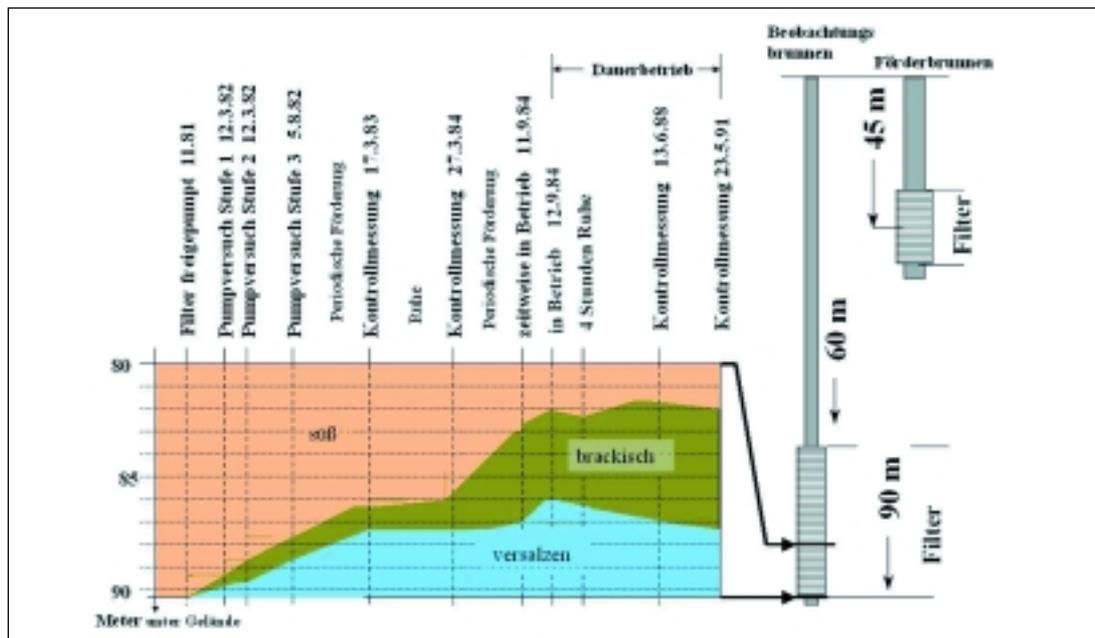


Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der Salz-Süßwasser-Grenze in einem Brunnenfeld bei Wasserentnahme

Ausblick

Die Grundwasserversalzung in Küstengebieten durch Meerwasserintrusion kann zum Beispiel für die Wasserversorgung der Nordseeinseln sowie küstennaher Bereiche zu einem Problem werden, insbesondere in Hinblick auf einen zu erwartenden Meeresspiegelanstieg sowie verstärkte Überflutungen bei Sturmflutereignissen. Zur langfristigen Sicherung der Wasserversorgung ist es daher erforderlich, den Verlauf der Salz-Süßwasser-Grenze zu beobachten. Hierzu haben sich geoelektrische Sondierungen sowie elektrische Bohrlochvermessungen als geeignete Instrumente erwiesen. Für eine großräumige Kartierung der Salz-Süßwasser-Grenze sowie eine eventuelle mittelfristige Verlagerung ergeben sich vielversprechende Ansätze durch die Hubschrauberelektromagnetik.

Summary

Saltwater intrusions into the aquifer are a wide spread problem in coastal areas affecting the water supply. As the electrical resistivity of the aquifer is reduced by the saltwater, geoelectrical and electromagnetic techniques can be applied for mapping and monitoring of the saltwater-freshwater boundary. Examples are shown for depth determination of the saltwater-freshwater boundary at the North Frisian islands and for the recovery of the freshwater lense after flooding and pumping.

➤ Riewert Ketelsen

Dezernat 50 – Geowissenschaftliche Grundlagen

Tel.: 0 43 47 / 704 – 548

rketelse@lanu.landsh.de