



Modellierung der küstennahen Grundwasserversalzung in Niedersachsen abgeleitet aus aeroelektromagnetischen Daten

Eva González¹ · Nico Deus¹ · Jörg Elbracht¹ · Bernhard Siemon² · Annika Steuer² · Helga Wiederhold³

Eingegangen: 4. Mai 2020 / Überarbeitet: 21. September 2020 / Angenommen: 21. Dezember 2020 / Online publiziert: 24. Februar 2021
© Der/die Autor(en) 2021

Zusammenfassung

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) führte in den Jahren 2000–2014 umfangreiche (etwa 5900 km²) aerogeophysikalische Erkundungen an der niedersächsischen Nordseeküste durch. Die Aeroelektromagnetik liefert Informationen über die elektrisch leitfähigen Strukturen im Erduntergrund und ermöglicht die Unterscheidung von Süß- und Salzwasser wie auch von Tonen und Sanden. Im Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) sowie am Leibniz Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) wurden diese Daten zur Kartierung der Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze genutzt. Dadurch ist unter anderem eine detaillierte Karte der Grundwasserversalzung innerhalb der küstennahen Aquifere entlang der niedersächsischen Nordseeküste im Maßstab 1:50.000 entstanden. Diese zeigt den aktuellen Stand der Grundwasserversalzung, abgeleitet aus den gewonnenen Elektromagnetik-Modellen. Die Modelle waren auch Grundlage für eine hydraulische Modellierung der Süßwasserlinse der Nordseeinsel Borkum. Darauf aufbauende Simulationen zeigen die Entwicklung der Grundwassersituation für den Zeitraum bis 2100.

Schlüsselwörter Grundwasserversalzung · Modellierung · Aeroelektromagnetik · Klimawandel · Süßwasserlinse

✉ Eva González
eva.gonzalez@lbeg.niedersachsen.de

Nico Deus
nico.deus@lbeg.niedersachsen.de

Jörg Elbracht
joerg.elbracht@lbeg.niedersachsen.de

Bernhard Siemon
bernhard.siemon@bgr.de

Annika Steuer
annika.steuer@bgr.de

Helga Wiederhold
helga.wiederhold@leibniz-liag.de

¹ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Deutschland

² Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Deutschland

³ Leibniz Institut für Angewandte Geophysik, Stilleweg 2, 30655 Hannover, Deutschland

Modelling of the groundwater salinization in the coastal aquifers of Lower Saxony derived by airborne electromagnetics

Abstract

The Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) conducted large-scale airborne geophysical surveys (about 5900 km²) at the North Sea coast of Lower Saxony in the years 2000–2014. Airborne electromagnetics provided information about electrically conductive structures in the subsurface and enabled the discrimination between saline and fresh water, as well as between clays and sands. The State Authority for Mining, Energy and Geology (LBEG) and the Leibniz Institute for Applied Geophysics (LIAG) used these data to map the depth of the fresh-saline groundwater interface. As one result, a detailed groundwater salinization map of the coastal aquifers of Lower Saxony was produced at a scale of 1:50,000. This map shows the current state of groundwater salinization as provided by resistivity models derived from airborne electromagnetic data. Such models also served as baseline data for a hydraulic modelling of the freshwater lenses of the North Sea island of Borkum, and the fresh-saline groundwater interface at the coastal aquifer of Lower Saxony. Subsequent simulations show the development of the groundwater situation until the year 2100.

Keywords Fresh-saline groundwater Interface · Climate change · Airborne electromagnetics · Freshwater lenses

Einleitung

Der Grundwasseranteil in Niedersachsen an der öffentlichen Wasserversorgung beträgt im Jahr 2016 87 % und liegt damit deutlich über dem Bundesdurchschnitt von 69 % (<https://www.bgr.bund.de/>; Zugriff: April 2020). Die Qualität des Grundwassers in Niedersachsen ist somit für die öffentliche Trinkwasserversorgung von besonderer Bedeutung und unterliegt den Richtlinien der deutschen Trinkwasserversorgung (TrinkwV 2016). Dabei spricht man von einer Grundwasserversalzung, also einem Anstieg der Salinität hervorgerufen durch natürliche oder anthropogene Einflüsse (Zimmermann-Timm 2011), im Sinne der deutschen Trinkwasserverordnung bei einem Chloridgehalt ≥ 250 mg/l (TrinkwV 2016). Entlang der niedersächsischen Nordseeküste sowie auf den Ostfriesischen Inseln ist die Qualität des Grundwassers durch eine großflächige Versalzung der oberflächennahen Grundwasserleiter stark vermindert (NIBIS® Kartenserver 2014d). Betroffen sind der gesamte niedersächsische Nordseeraum bzw. die Nordseemarschen von Emden im Westen bis Stade im Osten. Davon ausgenommen sind die Bereiche der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest zwischen Aurich und Wilhelmshaven sowie der Bederkesaer Geest in der Elbe-Weser Region zwischen Cuxhaven und Stade. Die versalzten Gebiete sind aufgrund ihrer Bedeutung für die Wasserwirtschaft bereits seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Untersuchungen (Repsold 1990; Hahn 1991; Martens und Wichmann 2011; NIBIS® Kartenserver 2014d). Auch in Zukunft, mit Blick auf den Klimawandel und dessen Folgen, wird dies für die Wassergewinnung durch Wasserversorger, Industrie und Landwirtschaft eine entscheidende Rolle spielen.

Aerogeophysikalische Messungen werden seit mehr als einem halben Jahrhundert durchgeführt, um den Erduntergrund zu erkunden. Sie bieten die Möglichkeit, große Flä-

chen in relativ kurzer Zeit zu erfassen. Während zunächst die Mineralexploration im Vordergrund stand, begann in den 1980er-Jahren die aerogeophysikalische Grundwassererkundung. Hierfür werden überwiegend aerelektromagnetische Verfahren eingesetzt, da der untersuchte Parameter – die elektrische Leitfähigkeit – sowohl mit der Qualität des Grundwassers (Salinität) als auch mit dessen Wegsamkeit (Grundwasserleiter bzw. -stauer) verknüpft ist (Kirsch 2006; Siemon et al. 2009).

In den Jahren 2000 bis 2014 hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) an der niedersächsischen Nordseeküste 13 Messkampagnen mit ihrem Hubschraubermesssystem durchgeführt (Siemon et al. 2014b), mit dem gleichzeitig elektromagnetische, magnetische und radiometrische Daten erfasst werden können. Die Datenerhebung und -interpretation erfolgte meist in Zusammenarbeit mit dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) und dem Leibniz Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) sowie mit Universitäten und Wasserverbänden. Die Daten und Produkte (Karten und Schnitte) werden durch die BGR über das *Produktcenter* zur weiteren Nutzung angeboten und sind über den *Geoviewer* einzusehen.

Die aerogeophysikalischen Daten – insbesondere die der Elektromagnetik – bieten vielfältige Informationen über den Erduntergrund. So wurden die Daten an der Nordseeküste bereits genutzt, um quartäre Rinnen zu erkunden (Gabriel et al. 2003; Eberle und Siemon 2006; Wiederhold et al. 2005, 2008; Rumpel et al. 2009; Steinmetz et al. 2015), unterirdische Süßwasseraustritte ins Wattenmeer zu kartieren (Rodemann et al. 2005; Siemon et al. 2004, 2015, 2018), Süßwasserlinsen von Borkum (Siemon et al. 2009; Sulzbacher et al. 2012; Wiederhold et al. 2013, 2015) und Langeoog (Siemon et al. 2015; Costabel et al. 2017) zu erfassen und das Volumen eines Moores zu bestimmen

(Siemon et al. 2020a). Einen zusammenfassenden Überblick dazu bieten Siemon et al. (2020b). In diesem Beitrag steht die küstennahe Grundwasserversalzung (Siemon et al. 2004; Deus et al. 2015; González et al. 2021b; Rahman et al. 2018) im Vordergrund.

Allen bisherigen Darstellungen der Versalzung (z. B. NIBIS® Kartenserver 2014d) fehlen allerdings genaue Tiefenangaben der Süß-/Salzwassergrenze. Um flächendeckende Informationen darüber zu erlangen, werden zusätzlich zu den bisher zur Verfügung stehenden Informationen (Wasseranalysen, geoelektrische Sondierungen und Bohrlochgeophysik) die Ergebnisse der Aeroelektromagnetik der BGR verwendet. Daraus ergibt sich ein Modell des Ist-Zustandes der Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze. Im NIBIS Kartenserver kann sowohl das Modell, als auch die daraus abgeleitete Karte „Versalzung des Grundwassers (Salz-Süßwassergrenze)“ im Maßstab 1:50.000 eingesehen werden.

Die Daten der Hubschrauber-Elektromagnetik (HEM) sind auch eine wertvolle Grundlage für die hydraulische Modellierung. Die Bedeutung der HEM-Ergebnisse für die Grundwasserbewirtschaftung soll am Beispiel der Nordseeinsel Borkum aufgezeigt werden. Die Insel wurde im März 2008 während einer 2-tägigen Befliegung aerogeophysikalisch vermessen. Die Wasserversorgung der ca. 5500 Einwohner sowie der zahlreichen Touristen liegt in der Verantwortung der Stadtwerke Borkum und erfolgt autark durch zwei Wasserwerke. Über mehrere Brunnen wird das Wasser aus der Süßwasserlinse der Insel gefördert. Das erste Wasserwerk ging bereits im Jahr 1900 in Betrieb. Es ist aber nicht nur die aktuelle Bestandsaufnahme der Süßwasserlinse von Interesse, sondern besonders bewegt die Frage, wie sich die Süßwasserlinse in Zukunft mit den zu erwartenden Klimaänderungen entwickelt. Zur Beantwortung ist ein Grundwassermodell notwendig, mit dem unter angepasster Grundwasserneubildung und Grundwasserentnahme die zukünftige Entwicklung der Linse simuliert werden kann.

Geologie und Hydrogeologie

Die hydrogeologischen Gegebenheiten entlang der niedersächsischen Nordseeküste sind vor allem geprägt durch die quartärzeitlichen Vereisungsphasen und den darauffolgenden holozänen Meeresspiegelanstieg. Während der elsterzeitlichen und saalezeitlichen Glaziale haben sich im gesamten Nordseeraum mächtige glazifluviale Sedimentkörper gebildet. Diese sind aufgebaut aus hauptsächlich Mittel-Grobsand und im Schnitt 30–60 m mächtig (Elbracht et al. 2016), wobei innerhalb der elsterzeitlichen Rinnen Mächtigkeiten von weit über 200 m erreicht werden können (González et al. 2021a; Kuster und Meyer 1979). Die-

se haben sich im Elbe-Weser-Gebiet bis zu 500 m tief und im Bereich der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest bis zu 100 m tief durch Schmelzwassererosion in die darunterliegenden tertiärzeitlichen Schichtfolgen eingeschnitten (Kuster und Meyer 1979; Janszen et al. 2013; Meyer 2017). Die Füllung der Rinnen erfolgte in Abhängigkeit zur Entfernung des Eisrandes (Janszen et al. 2013), sodass im unteren Bereich gröberes Material abgelagert wurde und eine Verfeinerung nach oben hin zu verfolgen ist. Abgedeckt sind die Rinnen oft durch den Lauenburger Ton-Komplex (Kuster und Meyer 1979; Janszen et al. 2013). Im Bereich der Marschen werden die pleistozänen Schichten durch bindige tonig-schluffige Sedimente des Holozäns überlagert. Die Nordseeinsel Borkum ist wie alle Ostfriesischen Inseln als Barriereinsel ausgeprägt. Durch morphodynamische Prozesse und nacheiszeitliche Überflutungen ist sie aus einem ehemaligen Geestkern hervorgegangen. Im heutigen Inselkern ist ein bogenförmiges Dünengebiet entstanden (Elbracht et al. 2016).

Entwickelt haben sich die zwei topographisch und hydrogeologisch voneinander zu unterscheidenden Landschaftsformen der flachen Nordseemarschen und der höher gelegenen Geest (Abb. 1). Die Grundwasseroberfläche liegt in den Marschen bei 0–1 m NHN und ist zudem in weiten Bereichen durch die flächendeckende Entwässerung anthropogen beeinflusst. In der Geest liegt sie weiträumig bei etwa 10 m NHN (NIBIS® Kartenserver 2014c). Die Grundwasserneubildung liegt bei deutlich unterhalb 200 mm/a innerhalb der Nordseemarschen und in der Geest bei bis zu 550 mm/a (NIBIS® Kartenserver 2014b). Ausgebildet sind in beiden Landschaftsformen zumeist zwei Grundwasserstockwerke. Ein höheres in den pleistozänen Schmelzwassersanden und ein tieferes in den pliozänen und miozänen Sanden des Tertiärs (Elbracht et al. 2016). Als Trennschicht zwischen den Grundwasserstockwerken fungieren pleistozäne und pliozäne Schluffe und Tone, beispielsweise die tonige Fazies des Lauenburger Komplexes (Elbracht et al. 2016). Der obere Aquifer in den Nordseemarschen ist mit Chloridgehalten >250 mg/l im Sinne der deutschen Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2016) flächendeckend und oberflächennah versalzt (NIBIS® Kartenserver 2014d). Einen Überblick über die versalzten Gebiete entlang der niedersächsischen Nordseeküste bietet die Abb. 1. Die Süßwasserlinse von Borkum bildet sich allein aus der Versickerung von Niederschlagswasser (Elbracht et al. 2016). Aufgrund seiner geringeren Dichte gegenüber Salzwasser schwimmt dieser Süßwasserkörper wie ein Eisberg auf dem versalzten Grundwasser im tieferen Untergrund der Insel. Für ein im Gleichgewicht befindliches System gilt das Ghijben-Herzberg-Prinzip, nach dem die Mächtigkeit der Linse proportional zur Höhe des Grundwasserspiegels über dem Meeresspiegel ist (Herzberg 1901).

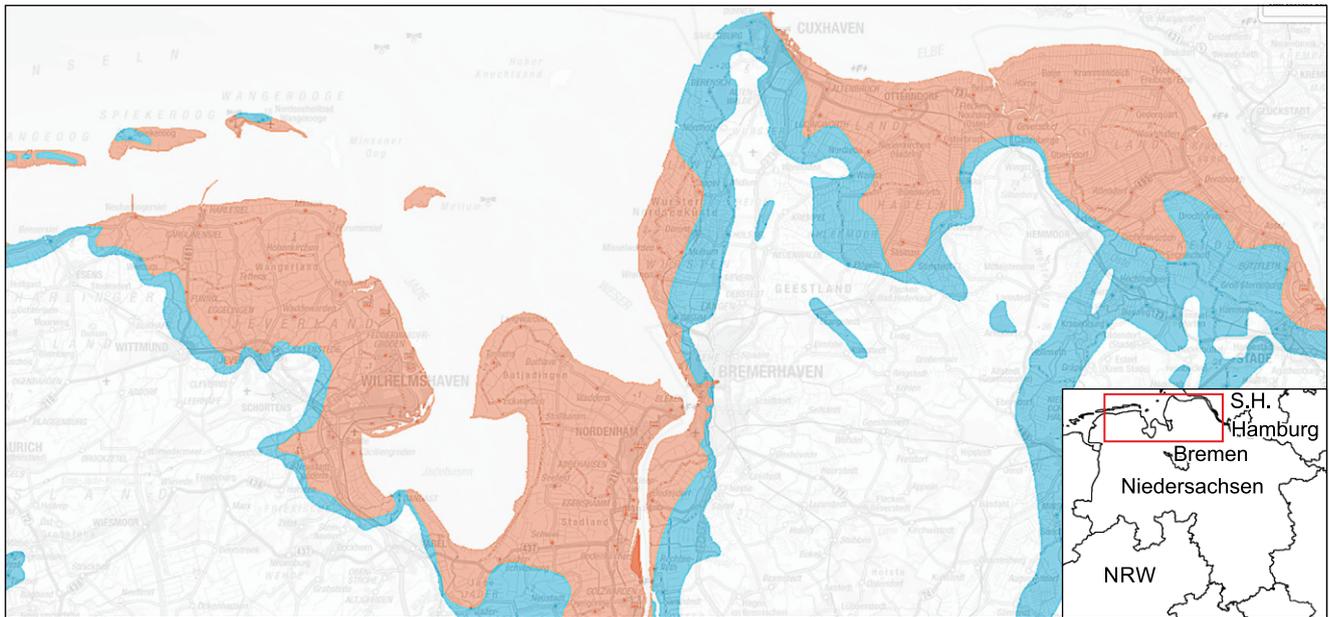


Abb. 1 Ausmaß der bekannten Grundwasserversalzung an der niedersächsischen Nordseeküste. *Blaue* Bereiche: Unterer Teil des Grundwasserleiters versalzt (>250 mg/l Chlorid); *Rote* Bereiche: Grundwasserleiter vollständig oder fast vollständig versalzt (>250 mg/l Chlorid) (NIBIS® Kartenserver 2014d)

Fig. 1 Extent of the groundwater salinization in the coastal area of Lower Saxony, Germany. *Blue*: Salinization of the lower part of the aquifer (>250 mg/l chloride); *Red*: Salinization of the whole aquifer (>250 mg/l chloride) (NIBIS® Kartenserver 2014d)

Methodik

Aeroelektromagnetische Erkundung

Die hier verwendete Hubschrauberelektromagnetik (HEM) basiert auf einem Zweispul-Verfahren, bei dem Sender und Empfänger gemeinsam bewegt werden. Die Sendespule wird von einem variablen Strom durchflossen, sodass als Folge ein variierendes Magnetfeld (Primärfeld) entsteht, das in einem elektrisch leitenden Erduntergrund Ströme fließen lässt. Da diese induzierten Ströme auch variieren, erzeugen sie wieder ein Magnetfeld (Sekundärfeld), das mit dem Empfänger registriert werden kann. Die Variation des Sendestromes kann kontinuierlich (Wechselstrom) oder abrupt (Ein-/Ausschaltvorgänge) sein. Daher unterscheidet man zwischen Frequenz- und Zeitbereichsverfahren. Die unterschiedlichen Verfahren sind beispielsweise in Nabighian (1988) ausführlich und in Siemon et al. (2009) speziell für Hubschraubermesssysteme beschrieben. Hier wird die Frequenzelektromagnetik verwendet.

Das aerogeophysikalische Messsystem der BGR ist mit einer Flugsonde bestückt, die etwa 40 m unterhalb eines Hubschraubers 30–50 m über Grund geschleppt wird. In der Flugsonde befinden sich fünf oder sechs Spulenpaare im Abstand von etwa 8 m, die jeweils Wechselströme zu festen Frequenzen f im Bereich von etwa $f = 380$ Hz bis $f = 130$ kHz verwenden. Zusätzlich werden weitere Spulen genutzt, die näher am Sender verbaut sind, um das direkte Primärfeld

vom Sender zum Empfänger zu kompensieren. Schließlich sorgen Kalibrierspulen bei den Empfängern dafür, dass das Messsystem im Fluge kalibriert bzw. kontrolliert werden kann.

Die Stärke der im Erdboden induzierten Wirbelströme hängt von Systemparametern (Dipolmoment, Frequenz), der Geometrie (Vertikal- bzw. Horizontalspulen, Höhe des Messsystems über der Erdoberfläche) und von den physikalischen Eigenschaften des Erduntergrundes ab. Hier dominiert die elektrische Leitfähigkeit σ [S/m] bzw. deren Kehrwert, der spezifische Widerstand ρ [Ω m)]. Da der Erduntergrund nicht ideal leitend ist, entsteht eine geringfügige Verzögerung des gemessenen gegenüber dem gesendeten Signal (Phasenverschiebung). Daher ist die Messgröße, d. h. das Verhältnis von Sekundärfeld zum Primärfeld am Empfänger, eine komplexe Größe mit Real- und Imaginärteil (in-phase I und quadrature Q), die in ppm (parts per million) angegeben wird.

Die Messungen werden meist auf parallelen Fluglinien durchgeführt. Der Messpunktabstand hängt längs der Fluglinie von der Fluggeschwindigkeit (etwa 130–160 km/h) und der Registrierungstaktrate (10 Hz) ab und liegt somit bei etwa 4 m. Der laterale Abstand der Fluglinien wird vorgegeben. Bei den Messungen an der Nordseeküste lag er meist bei etwa 250 m. Die Erkundungstiefe wird durch die Messfrequenz und die Leitfähigkeit des Erduntergrundes bestimmt, wobei jeweils niedrigere Werte ein höheres Eindringen bewirken.

Zur Bestimmung der physikalischen Parameter des Erduntergrundes werden die relativen Sekundärfelder durch Modelle des spezifischen Widerstandes erklärt, wobei zwei grundlegende Ansätze verwendet werden. Zum einen werden die beiden Messparameter (I und Q) für jede Messfrequenz individuell in die Parameter eines homogenen Halbraums transformiert: Abstand des Messsystems zur Modelloberfläche und Halbraumwiderstand ρ_a [Ωm]. Daraus wird die Schwerpunktstiefe z^* [m], die das Zentrum des Halbraums repräsentiert, abgeleitet (Siemon 2001). Zum anderen werden die Messdaten aller Frequenzen gleichzeitig in die Parameter eines Halbraums mit N -Schichten invertiert: Schichtwiderstand ρ_i und -mächtigkeit d_i , $i = 1, \dots, N$, mit $d_N = \infty$. Das hier verwendete Inversionsverfahren nach Levenberg-Marquardt (Sengpiel und Siemon 2000) benötigt ein Startmodell, das an jedem Messpunkt aus den $\rho_a - z^*$ -Werten unter Vorgabe der Schichtzahl N und mit zur Tiefe

hin zunehmender Schichtmächtigkeit abgeleitet wird (Siemon 2006).

Die Messkampagnen an der niedersächsischen Nordseeküste wurden mit ähnlichen, aber nicht identischen Messsystemen durchgeführt. Während die ersten Messungen in 2000/01 im Zentrum des Gesamtgebietes bei Cuxhaven und Bremerhaven noch ein analoges EM-Messsystem (DIGHEM^{V-BGR}) mit fünf Messfrequenzen verwendeten (Siemon et al. 2004, 2017), sind alle weiteren Messungen mit zwei nahezu identischen digitalen Systemen (Resolve) mit fünf bzw. ab 2007 mit sechs Messfrequenzen durchgeführt worden (Siemon et al. 2012). Die Befliegungen mit dem BGR-Hubschrauber (Sikorsky S-76B) erstreckten sich von Hamburg im Osten bis nach Aurich im Westen und schlossen die Ostfriesischen Inseln Borkum, Baltrum, Langeoog und den Westteil von Spiekeroog mit ein. Insgesamt wurde eine Fläche von 5900 km² überdeckt und etwa

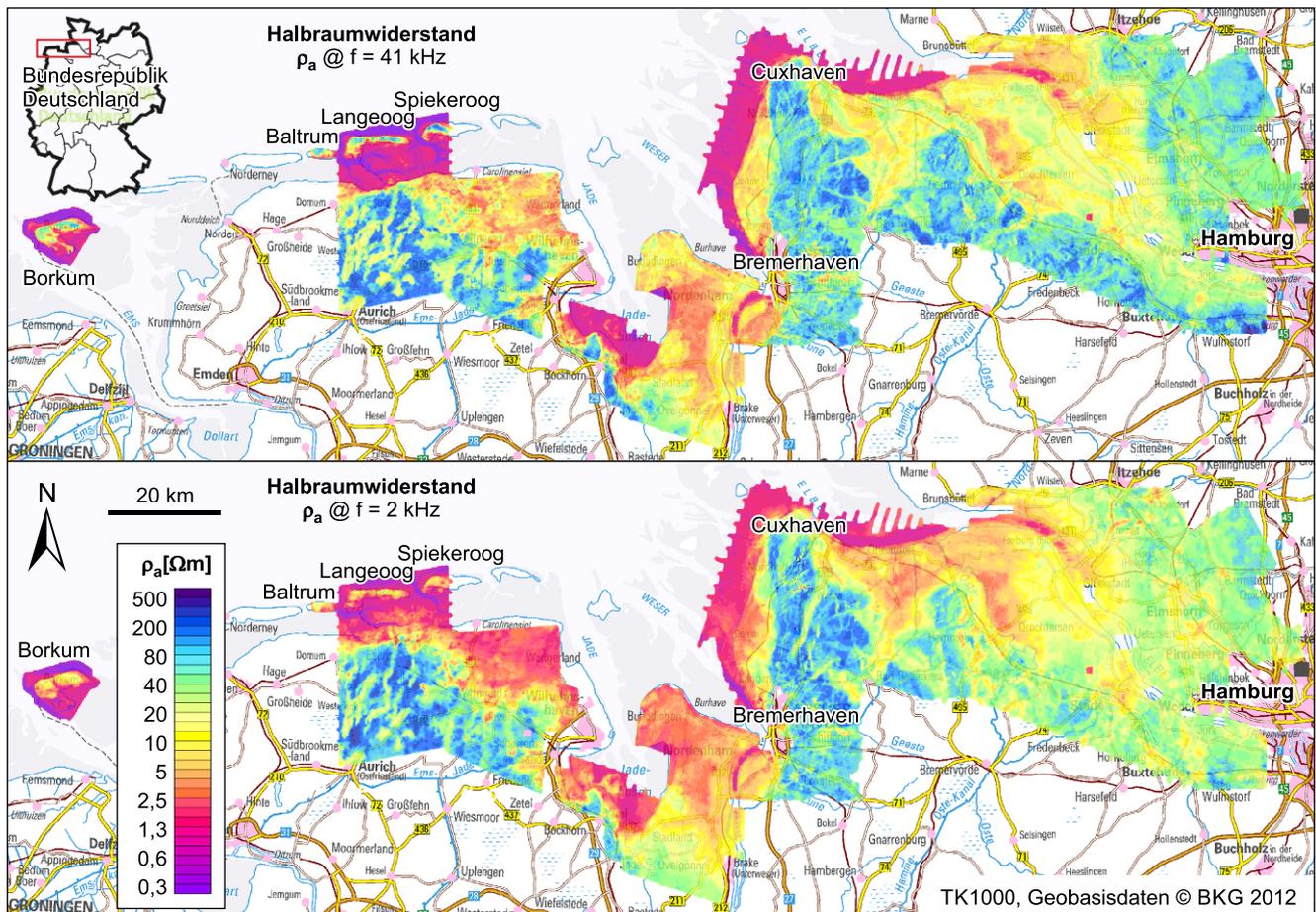


Abb. 2 Halbraumwiderstände ρ_a an der niedersächsischen Nordseeküste (siehe Kartenausschnitt), abgeleitet aus HEM-Daten bei $f = 41$ kHz (oben) und $f = 2$ kHz (unten). Die Zunahme der Rotfärbung korreliert mit zunehmendem Salzgehalt im Grundwasser (Meerwasser: violett); die Zunahme der Blaufärbung korreliert mit abnehmendem Tongehalt in den Sedimenten. Die zugehörigen Schwerpunktstiefen z^* liegen in den roten/gelben/blauen Bereichen für $f = 41$ kHz bei etwa $<2\text{ m} / 7\text{ m} / >13\text{ m}$ bzw. für $f = 2$ kHz bei etwa $<10\text{ m} / 30\text{ m} / >60\text{ m}$

Fig. 2 Apparent resistivities ρ_a at the North Sea coast of Lower Saxony (insight map) derived from HEM data at frequencies of $f = 41$ kHz (above) and $f = 2$ kHz (below). The increase in reddening correlates with an increase of groundwater salinity (seawater: purple); the increase in blue coloration correlates with a decrease of the clay content in the sediments. The corresponding centroid depths z^* for the red/yellow/blue areas are about $<2\text{ m} / 7\text{ m} / >13\text{ m}$ at $f = 41$ kHz and $<10\text{ m} / 30\text{ m} / >60\text{ m}$ at $f = 2$ kHz

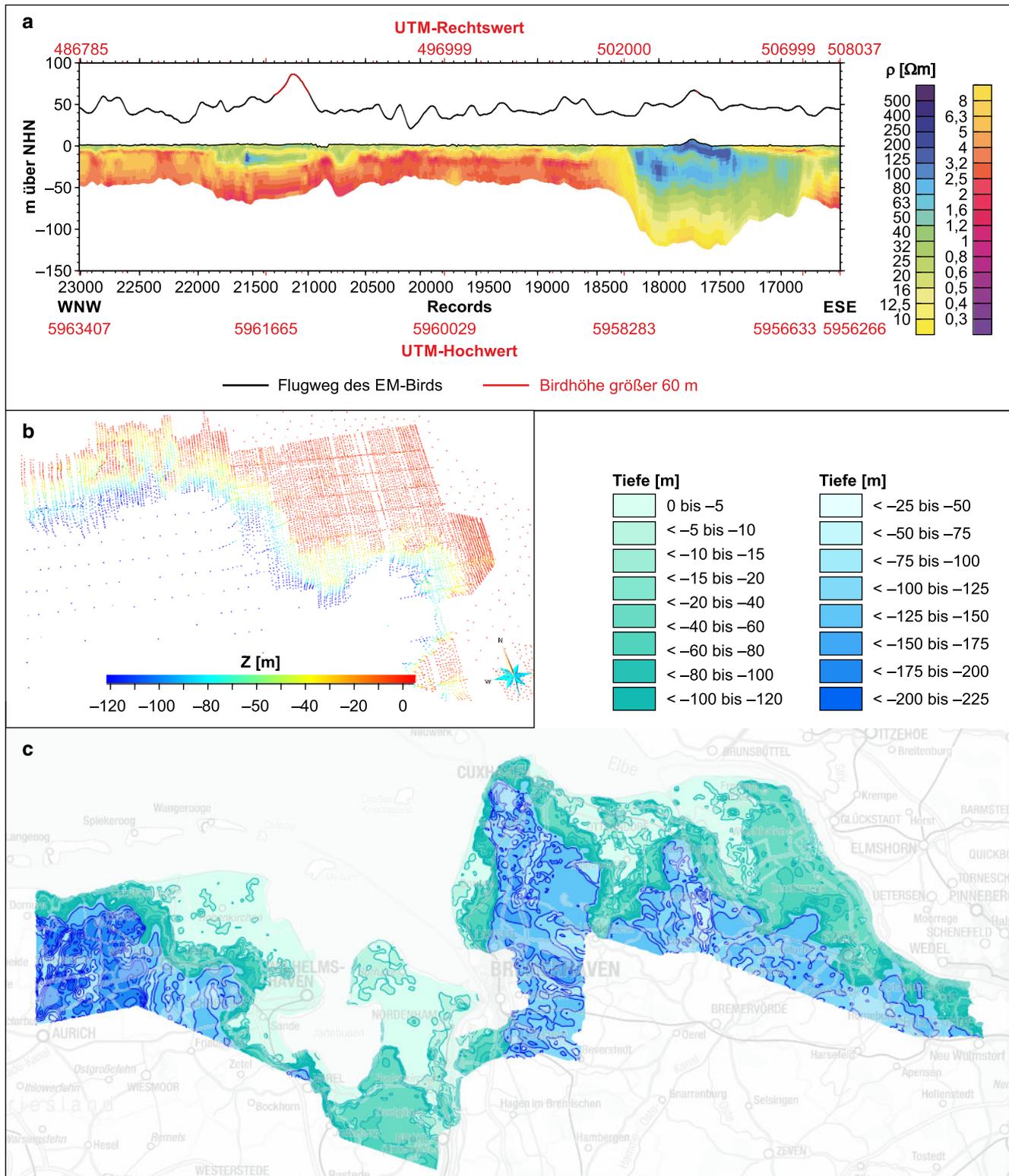


Abb. 3 **a** Der Übergang von Blau-/Grüntönen zu Gelb-/Rottönen markiert die Süß-/Salzwassergrenze. **b** Auszug aus dem Punktdatensatz, der in GOCAD durch die Auswertung der Vertikalschnitte erstellt wird; **c** fertig modellierte Süß-/Salzwassergrenze (türkis) und die Mindesttiefe der Süßwasservorkommen (blau) unterhalb der Geest (NIBIS Kartenserver)

Fig. 3 **a** The transition vom blue/green to yellow/red marks the fresh-saline groundwater interface. **b** Extract from the data point set, which results from the interpretation of the vertical resistivity sections in GOCAD. **c** new modelled fresh-/saltwater interface (turquoise) and minimum of the freshwater body (blue) beneath geest areas (NIBIS Kartenserver)

25.000 Profil-km erfolgen, was zu etwa 6 Mio. Messpunkten führte. Die Ergebnisse der Hubschrauberelektromagnetik werden entlang der Fluglinien eines Messgebietes erzeugt. Die Darstellung erfolgt in Form von Karten (Abb. 2) und Vertikalschnitten (Abb. 3a).

Modellierung des Ist-Zustandes der Süß-/Salzwassergrenze

Um flächendeckende Informationen zur Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze für den niedersächsischen Nordseebereich zu erhalten, werden die Widerstandsmodelle der HEM ausgewertet. Bei der Auswertung muss beachtet werden, dass die mit der HEM ermittelten Werte nicht nur den spezifischen Porenwasserwiderstand im Untergrund angeben, sondern einen spezifischen Gesamtwiderstand (Kirsch 2006). Dieser Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus dem Porenwasserwiderstand und dem spezifischen Formationsfaktor, wobei diese vereinfachte Formel nur für tonfreie Bereiche gilt. Tonige Bereiche werden aus dem im Vorfeld erstellten geologischen Modell ermittelt. Repsold (1990) hat aus geoelektrischen Messungen für den niedersächsischen Küstenbereich einen Formationsfaktor von 5 angegeben, mit dem sich für eine Chlorid-Konzentration von 250–300 mg/l ein spezifischer Gesamtwiderstand $\leq 30 \Omega\text{m}$ ergibt (Tab. 1). Dieser Wert wird für die hier betrachteten elektromagnetischen Daten übernommen. Demnach wird eine Versalzung immer dort angenommen, wo spezifische Gesamtwiderstände $\leq 30 \Omega\text{m}$ vorherrschen und durch die strukturgeologischen Modelle ein Tonvorkommen ausgeschlossen werden kann.

Die Auswertung der Daten erfolgte manuell in der Software SKUA-GOCAD™-Paradigm®15.5 anhand der einzelnen Vertikalschnitte (Abb. 3a) der Befliegungsgebiete Esens, Langeoog, Jever, Varel, Nordenham, Cuxhaven, Hadeln und Glückstadt (Siemon et al. 2013, 2014a, 2019b; Steuer et al. 2013; Miensopest et al. 2014; Voß et al. 2015; Ullmann et al. 2017a, 2017b). Vorangestellt war eine detaillierte hydrogeologische 3D-Strukturmodellierung der Gebiete. Diese Modelle werden auf Grundlage der zahlreichen Bohrungen der Bohrdatenbank Niedersachsen mit der Software SKUA-GOCAD™-Paradigm®15.5 erstellt (z. B. González et al. 2021a). Es entstehen dabei Flächenmodelle bis zur Quartärbasis (NIBIS® Kartenserver 2014a), mit Fokus auf den bindigen Sedimenten. Durch diesen Schritt sind die Tonvorkommen im Untergrund sehr gut bekannt und eine Fehlinterpretation dieser, aufgrund ähnlicher spezifischer Widerstände, kann so verhindert werden.

Bei der Auswertung wurden alle zur Verfügung stehenden Vertikalschnitte berücksichtigt. Der Abstand zwischen den Schnitten beträgt in der Regel 250 m, wodurch für die zu modellierende Süß-/Salzwassergrenze eine sehr hohe Datendichte zur Verfügung steht. Die Auswertung ent-

lang der Vertikalschnitte erfolgte manuell. Dabei wird in GOCAD pro Vertikalschnitt der Grenzwiderstand, repräsentiert durch spezifische Widerstände $< 30 \Omega\text{m}$, händisch digitalisiert (Abb. 3a). Somit entsteht ein großer Punktdatensatz (Abb. 3b) aus dem im letzten Schritt die Süß-/Salzwassergrenzfläche (Abb. 3c) modelliert wird.

Zur Validierung der modellierten Süß-/Salzwassergrenzfläche wurden hauptsächlich Grundwasseranalysen aus der Labordatenbank des LBEG und durch Bohrlochgeophysik erhobene Daten aus der Bohrdatenbank des LBEG (NIBIS® Bohrdatenbank Niedersachsen) genutzt. Im Bereich zwischen Cuxhaven und Stade wurden zusätzlich insgesamt 18 Direct-Push-Bohrungen entlang von 6 Profilen abgeteuft und so meterweise bis max. 25 m u. GOK Grundwasserproben gewonnen (González et al. 2021b).

Zusätzlich zur Süß-/Salzwassergrenzfläche wurde auch eine Fläche modelliert, die die Mindesttiefe der Süßwasserkörper unterhalb der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest und der Bederkesa Geest angeben. Aufgrund der verfahrensbedingten Eindringtiefen der aerogeophysikalischen Untersuchungen kann die Süß-/Salzwassergrenze unterhalb der Geestkörper nicht angetroffen werden und es ergibt sich aus den Daten eine Mindesttiefe für den Süßwasserkörper. Die Angabe der Mindesttiefe des Süßwasserkörpers ist eine weitere wasserwirtschaftliche relevante Planungsgröße.

Zeitliche Entwicklung der Süßwasserlinse Borkum

Im Rahmen des EU-Projektes CLIWAT wurde ein Dichteströmungsmodell mit der Software FEFLOW für die Insel Borkum aufgebaut. Die HEM-Daten spielen dabei eine wichtige Rolle bei der Definition der Anfangsbedingung für den Massentransport an der Oberfläche des Aquifers (Sulzbacher et al. 2012). Parallel zur Modellierung wurde ein Monitoring der Süß-/Salzwasser-Übergangszone eingerichtet. An zwei Lokationen nahe der Brunnenfelder der beiden Wasserwerke wird über vertikale Elektrodenstrecken (Messsystem SAMOS), die in 45 bis 65 m Tiefe fest installiert sind, mehrmals täglich der spezifische Widerstand gemessen (Grinat 2019).

Ergebnisse

Aeroelektromagnetische Erkundung

Die Vertikalschnitte sind durch farbcodierte Inversionsmodelle des spezifischen Widerstandes (kurz: Widerstandsmodelle) entlang der Fluglinien aufgebaut, wobei die Oberkante der Geländehöhe folgt. Die interpolierten Karten können entweder die Halbraumwiderstände (bzw. die Schwerpunkstiefen) zu den jeweiligen Messfrequenzen, d. h. in variierenden Tiefen, oder die spezifischen Widerstände in

bestimmten Tiefen darstellen. Diese Visualisierung ermöglicht die Erkennung von leitfähigen Strukturen im Erduntergrund. Sie ermöglicht aber auch die Erkennung und Korrektur von gestörten Datenabschnitten, die auf temperaturbedingten Niveauproblemen oder auf anthropogenen Effekten beruhen. Letztere werden verursacht durch metallhaltige Installation am Erdboden und erscheinen als lokale Anomalien erhöhter Leitfähigkeit. Beide Effekte sind durch semi-automatische Filterverfahren zu beheben (Siemon et al. 2011).

In Abb. 2 sind die Halbraumwiderstände für zwei Messfrequenzen dargestellt (BGR 2017), die die leitfähigen Strukturen bei der höheren Messfrequenz in einem oberflächennahen Bereich (von etwa 1 bis 30 m unter Gelände (u GOK)) und bei der niedrigeren Messfrequenz in einem tieferen Bereich (von etwa 3 bis 80 m u. GOK) darstellen. Rote Farben markieren gut, blaue Farben schlecht leitende Strukturen. Sehr deutlich grenzen sich Salzwasser (violett, $\rho_a < 1 \Omega\text{m}$) und salzwassergesättigte Sedimente (rot, $\rho_a = 1\text{--}2 \Omega\text{m}$) von den süßwassergesättigten Sedimenten (grün/blau, $\rho_a > 30 \Omega\text{m}$) ab, wobei in den grünen Bereichen der Tonanteil etwas erhöht sein sollte. In diesem Bereich dazwischen ist in den gelben Bereichen ($\rho_a = 8\text{--}30 \Omega\text{m}$) mit einem dominierenden Tonanteil zu rechnen, während orange Farben auf eine erhöhte Salinität im Grundwasser (Brackwasser, $\rho_a = 2\text{--}8 \Omega\text{m}$) hinweisen. Die Strukturen in diesem Zwischenbereich sind aber nicht klar zu unterscheiden, da sowohl brackwassergesättigte Sande als auch süßwassergesättigte Tone ähnliche Widerstandsbereiche (etwa $\rho_a = 5\text{--}20 \Omega\text{m}$) aufweisen können.

Die direkte Übertragung der spezifischen Widerstände in Salinitäten ist daher nicht eindeutig und Zusatzinformationen (Bohrungen, geologische Modelle) sind für eine Interpretation erforderlich. Dies konnte beispielsweise für die HEM-Ergebnisse in Zeeland (NL) umgesetzt werden, da ein detailliertes 3D-Modell der Lithologie sowie zahlreich In-situ-Messungen zur Verfügung standen (Delsman et al. 2018). Fehlen diese Informationen, lässt sich dennoch die Süß-/Salzwassergrenze aus den HEM-Inversionsergebnissen ableiten, indem man die stärksten Gradienten der Widerstandsmodelle analysiert (Siemon et al. 2019a). Diese Grenze liegt zwar nahe des stärksten Salinitätsgradienten, aber somit auch meist oberhalb von Grenzwerten für den zulässigen Salzgehalt im Grundwasser, was auf eine – gegenüber dem hier verwendeten Ansatz – zu tief geschätzte Lage der gesuchten Süßwassergrenze hinausläuft (Siemon et al. 2018).

Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze entlang der niedersächsischen Nordseeküste

Die aus den HEM-Daten modellierte Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze zeigt, dass große Bereiche entlang der

niedersächsischen Nordseeküste bereits jetzt bis wenige Meter unter Gelände bzw. auch zum Teil komplett versalzt (Chloridkonzentration $> 250 \text{ mg/l}$) sind. Südlich des Jadebusen, zwischen Varel, Oldenburg und Brake sowie im Kehdinger Land, nördlich von Stade, beginnt die Versalzung des Grundwassers erst in Tiefen zwischen 20 und 30 m u. GOK. Flussaufwärts der Elbe in Richtung Hamburg liegt die Süß-/Salzwassergrenze in immer größeren Tiefen ($> 40 \text{ m u. GOK}$). Auch an den Rändern der Bederkesa Geest und der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest fällt die Versalzungsgrenze abrupt in Tiefen bis $> 100 \text{ m u. GOK}$ ab. Im Bereich Stade gibt es eine begrenzte Aufwölbung der Süß-/Salzwassergrenze, die auf den dortigen Salzstock und dessen Ablaungsprozesse zurückzuführen ist (González et al. 2021b).

Dimension der Süßwasserlinse Borkum

Das Ergebnis der aerogeophysikalischen Untersuchung (Siemon et al. 2009) in Form von Tiefenkarten und vertikalen Schnitten zeigt erstmals die Dimension der Süßwasserlinse unterhalb von Borkum (Abb. 4a links). Die Zweiteilung der Linse wird deutlich, die die frühere Trennung der beiden Inselkerne belegt. Die Süßwasserlinse ist hauptsächlich auf die Dünengebiete beschränkt und erreicht stellenweise eine Mächtigkeit von 50 m. Im Gebiet der Marschen fehlt sie hingegen nahezu vollständig.

Die räumliche Auflösung der HEM-Daten hilft auch beim Verständnis der hydrologischen Prozesse, die bei der räumlich-zeitlichen Entwicklung von Borkums Süßwasserlinse eine Rolle gespielt haben. Die Modellierung (Sulzbacher et al. 2012) zeigt, dass entsprechend große Süßwasserlinsen sehr langsam auf hydrologische und hydrogeologische Ereignisse reagieren. Einschneidende Ereignisse sind beispielsweise der Beginn der Wasserversorgung im Jahr 1900, die Errichtung des Süddeichs im Jahr 1934 und der Betrieb des Wasserwerks im Ostland seit 1965. Da es mehr als hundert Jahre braucht, bis sich nach einem größeren Ereignis das Gleichgewicht wieder einstellt, muss bei der Modellkalibrierung ab 1900 instationäre Grundwasserströmung berücksichtigt werden. Das Ergebnis des kalibrierten Modells ist im Vergleich zu den HEM-Daten in Abb. 4a (Mitte) dargestellt. Die wesentlichen Merkmale der berechneten Süßwasserlinse stimmen hinreichend mit den gemessenen überein (Sulzbacher et al. 2012). Die Ergebnisse der Simulationsrechnung für die Zukunft der Süßwasserlinse sind in Abb. 4a (rechts) dargestellt.

Abb. 4b zeigt den Vergleich zwischen dem HEM-Modell, und den in der Tiefe in situ gemessenen Werten (Sulzbacher et al. 2012). Auch diese Übereinstimmung ist zufriedenstellend, bedenkt man einerseits den lateralen Abstand von 89 m zwischen dem SAMOS-Messsystem und dem nächst-

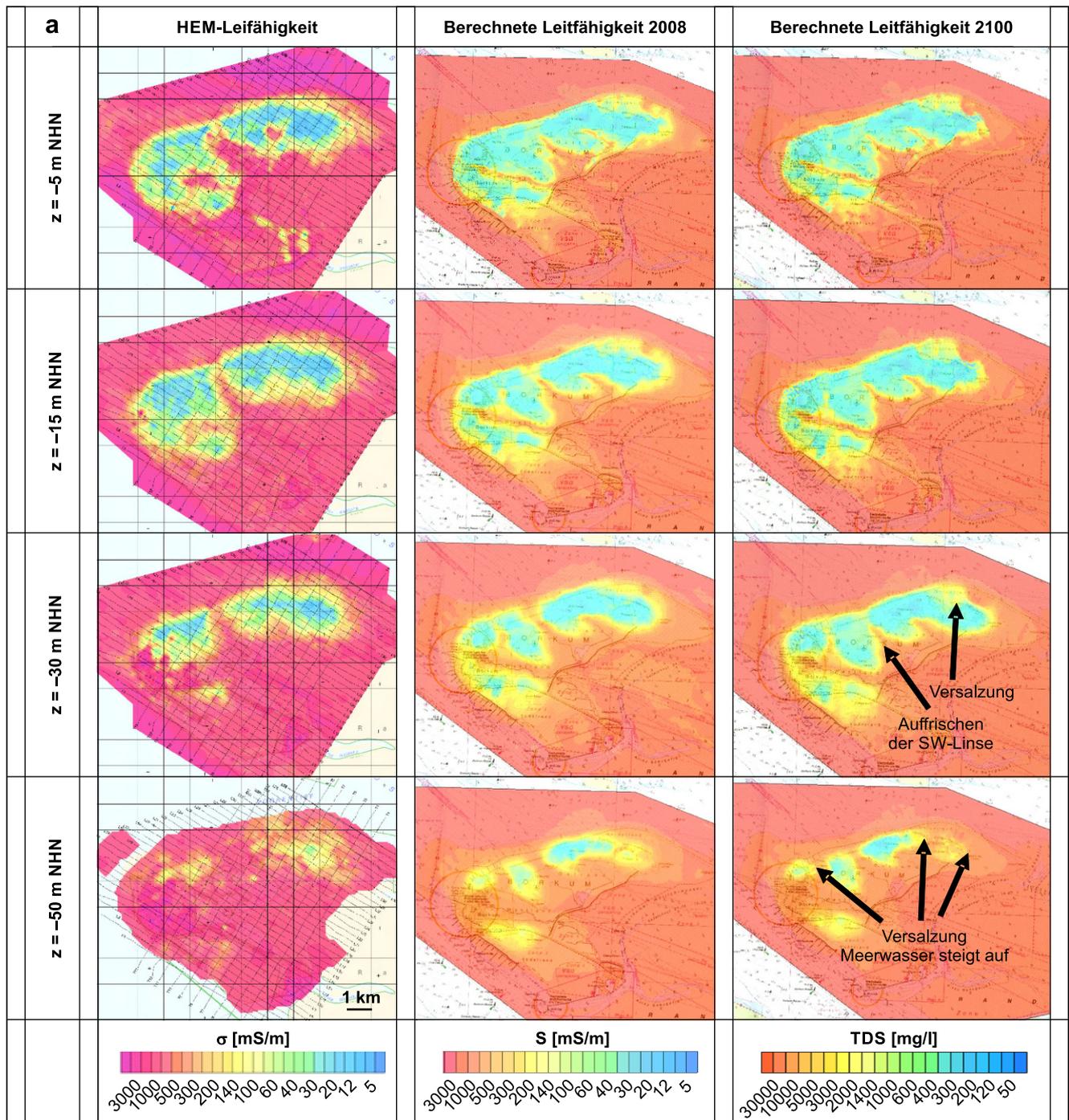


Abb. 4 a Regionaler Maßstab: Vergleich zwischen elektrischer Leitfähigkeit abgeleitet aus gemessenen HEM-Daten (*links*) und durch das Grundwassermodell berechneten Daten (*Mitte*) für verschiedene Tiefen bezogen auf NHN. Die Zeit des Vergleichs ist März 2008. Die *rechte Spalte* zeigt als Ergebnis der Simulation die Entwicklung der Süßwasserlinse im Jahr 2100. **b** Lokaler Maßstab: Vergleich der Daten an der Lokation CLIWAT 2 im Ostland von Borkum. **a** und **b** nach Sulzbacher et al. (2012). Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit mit den Modellergebnissen ist die Leitfähigkeit dargestellt (Kehrwert des spezifischen Widerstands). Die in der Simulation verwendete TDS-Skala (Dichte aller gelösten Stoffe) ist gleichwertig

Fig. 4 a Regional scale: comparison between electrical conductivity derived from HEM data (*left*) and computed by the groundwater model (*middle*) at different depths below sea level. Time of comparison is March 2008. The *right column* shows as result of the simulation the development of the freshwater lens in 2100. **b** Local scale: comparison of data at location CLIWAT 2 in the Ostland of Borkum. **a** and **b** after Sulzbacher et al. (2012). Due to better comparison with simulation results, the color scale is electric conductivity (inverse of resistivity). The TDS (total dissolved solids) scale is equivalent

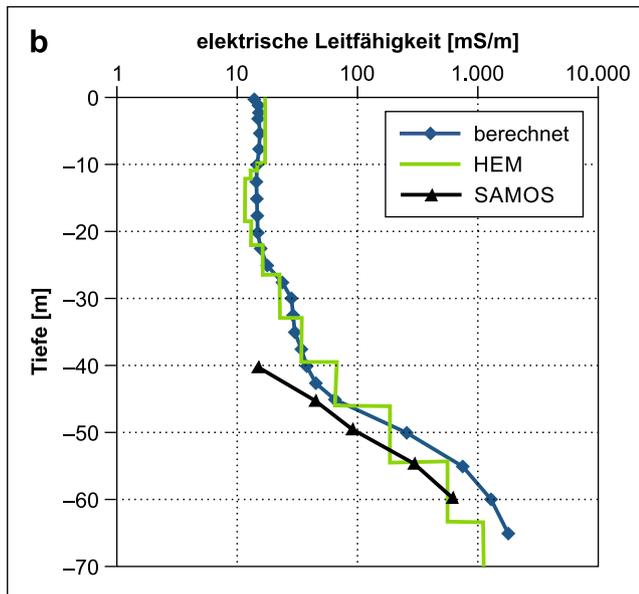


Abb. 4 (continued)
Fig. 4 (Fortsetzung)

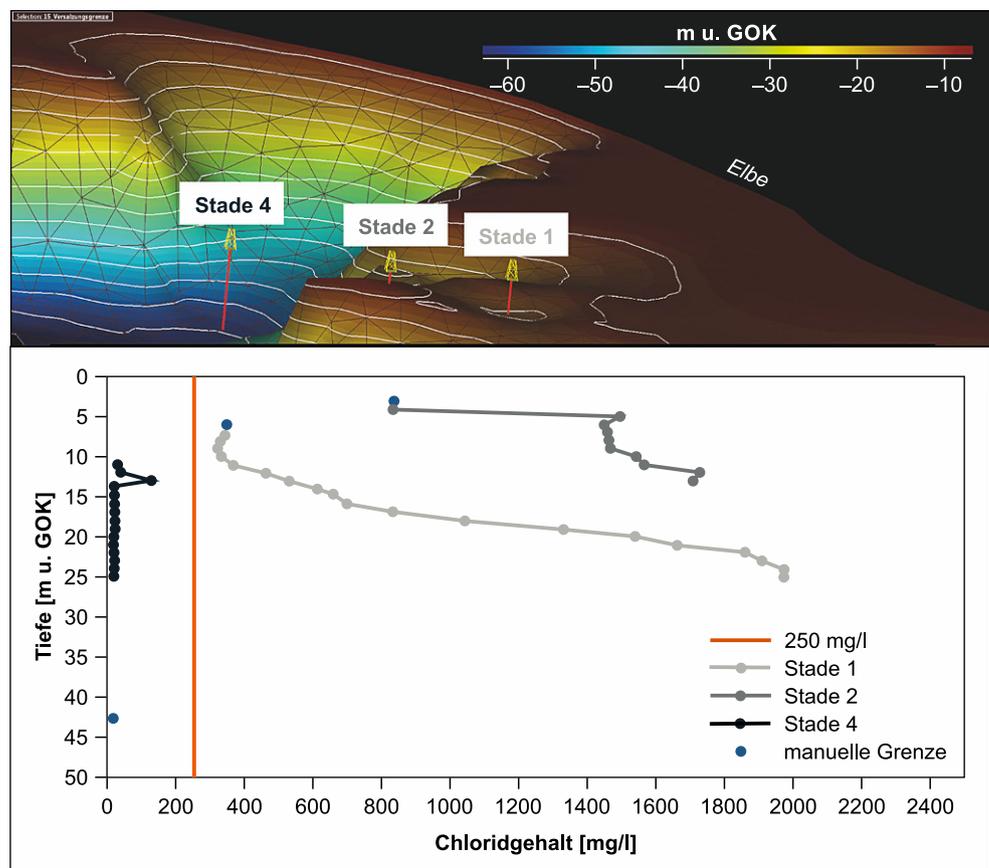
liegenden HEM-Modell und andererseits die Unterschiede in den Messverfahren (erfahrungsgemäß liegen die spezifischen Widerstände bei Widerstandsmessungen geringfügig höher als bei EM-Methoden). Dies ist eine Momentaufnahme. Inzwischen liegen seit 2010 bis heute fast lückenlose Messungen mit dem SAMOS-System vor und dokumentieren punktuell Änderungen in der Süß-/Salzwasser-Übergangszone (Grinat 2019). Diese Änderungen betreffen jahreszeitliche Schwankungen, weisen aber auch einen langzeitlichen Trend auf.

Diskussion

Die Datendichte mit etwa 250 m Abstand der einzelnen Vertikalschnitte der Hubschrauberelektromagnetik zueinander ist ausreichend, um ein detailliertes Modell der aktuellen Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze zu erstellen. Ergänzend wurden bohrlochgeophysikalische Daten und Grundwasseranalysen aus den Datenbanken des LBEG genutzt. Bei der Auswertung muss beachtet werden, dass eine direkte Übertragung der spezifischen Widerstände in Salinitäten nicht eindeutig ist und daher zu Fehlinterpretationen führen kann, da die Auswertung der Widerstandsmodelle der HEM hinsichtlich der Lage der Süß-/Salzwassergrenze

Abb. 5 Vergleich zwischen dem Direct-Push-Profil bei Stade (Bohrungen Stade 1 bis Stade 4) und der modellierten Süß-/Salzwassergrenze. Mit zunehmender Entfernung zur Elbe (Stade 1 etwa 5 km, Stade 4 etwa 7,5 km) fällt die Süß-/Salzwassergrenze in größere Tiefen ab. Die *blauen Punkte* markieren die Salz-/Süßwassergrenze aus dem HEM-basierten Modell

Fig. 5 Comparison of the direct push profile near Stade (boreholes Stade 1 to Stade 4) and the new-modelled fresh-/saltwater interface. With increasing distance to the Elbe River, the depth of the interface increases also. The *blue dots* are indicating the salt-/freshwater interface from the HEM-based model



Tab. 1 Berechnung des Gesamtwiderstandes im Elbe-Weser-Raum bei einer Chloridkonzentration von 250–300 mg/l (González et al. 2021b)
Table 1 Calculation of the total resistance in the Elbe Weser Triangle with a chloride concentration of 250–300 mg/l (González et al. 2021b)

Chlorid [mg/l]	Elektr. Leitfähigkeit [S/m]	Porenwasserwiderstand [Ω m]	Formationsfaktor (Repsold 1990)	Gesamtwiderstand [Ω m]
250–300	0,18	6,19	5	30,93

auf der Grundlage unterschiedlicher spezifischer Widerstände im Untergrund basiert. Salzwasser bzw. salzwassergesättigte Sedimente mit spezifischen Widerständen $\rho < 2 \Omega$ m grenzen sich dabei deutlich von Süßwasser bzw. mit Süßwasser gesättigte Sedimente mit spezifischen Widerständen $\rho > 30 \Omega$ m ab. Für die Abgrenzung der dazwischenliegenden Bereiche, die sowohl brackwassergesättigte Sande, als auch süßwassergesättigte Tone repräsentieren können, sind weitere geologische Informationen (Bohrungen oder detaillierte geologische Modelle) unbedingt notwendig. Die Validierung der modellierten Grenzfläche erfolgt durch Grundwasserbeschaffenheitsdaten.

Ein Vergleich der Direct-Push-Ergebnisse mit der modellierten Grenzfläche, hier am Beispiel des Bohrprofils bei Stade (Abb. 5), zeigt stellvertretend eine relativ gute Übereinstimmung. González et al. (2021b) geben eine maximale Abweichung von 5 m zwischen der modellierten Süß-/Salzwassergrenzfläche und den Direct-Push-Ergebnissen an. Unter Berücksichtigung einer ungefähren Eindringtiefe der HEM von 150 m und der Tatsache, dass im oberflächennahen Bereich der Marschen die spezifischen Widerstände nicht allein durch eine Chlorid-Belastung des Wassers, sondern auch durch einen hohen Anteil an tonigem und schluffigen Sediment hervorgerufen werden, ist die maximale Abweichung, die sich aus der manuellen Auswertung der Daten ergibt, als eine hohe Genauigkeit zu bewerten. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Süß-/Salzwassergrenze zwar als eine scharfe Grenze modelliert wurde, eigentlich aber eine Übergangszone von Frischwasser zu leicht brackischem Grundwasser darstellt. Auch die Daten der hydrogeologischen Modellierung der Süßwasserlinse von Borkum zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Geringe Abweichungen sind grundsätzlich auch auf die unterschiedlichen Methoden der Datenerhebung (HEM, Grundwasseranalytik, hydrogeologische Modellierung) zurückzuführen.

Schlussfolgerung

Durch die aerogeophysikalische Erkundung des Untergrundes entlang der niedersächsischen Nordseeküste und der vorgelagerten Inseln konnten flächendeckend Informationen über die Verteilung des spezifischen Widerstands im oberflächennahen Untergrund zur Verfügung gestellt werden. Daraus können Tiefenangaben der Süß-/Salzwassergrenze abgeleitet werden. Die daraus abgeleite-

te Karte der Grundwasserversalzung im Maßstab 1:50.000 stellt vor allem für die örtlichen Wasserversorger eine wichtige Entscheidungshilfe dar. Die Karte ist auf dem NIBIS® Kartenserver (<https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>) frei zugänglich. Für die Nordseeinsel Borkum bringen die HEM-Ergebnisse Mehrwert bei der Bewertung der Dimension der Süßwasserlinse, beim Verständnis der hydrogeologischen Entwicklungsgeschichte der Insel und bei der für die numerische Modellierung notwendigen Definition der Anfangsbedingung für die Massen- bzw. Salzkonzentration.

Im Hinblick auf eine mögliche Zunahme (Konzentrationen) oder flächenhafte Ausbreitung der Versalzungsfront, wie auch auf die Beschaffenheit einer Süßwasserlinse unterhalb von Inseln im Zuge des Klimawandels, können die Widerstandsmodelle der HEM eine wichtige Eingangsgröße für Grundwasserströmungsmodelle sein. Mit diesen kann die Entwicklung der Grundwasserversalzung, in Abhängigkeit unterschiedlicher Klimamodelle, in der Zukunft simuliert werden. Beispiel dafür ist das Dichteströmungsmodell der Süßwasserlinse Borkum.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- BGR: Hubschrauber-Elektromagnetik (HEM) Deutsche Nordseeküste. Datenherkunft: NordseeküsteHEM-Daten. BGR, Hannover (2017) https://doi.org/10.25928/bgr2017hem_sfpb-1064
- Costabel, S., Siemon, B., Houben, G., Günther, T.: Geophysical investigation of a freshwater lens on the island of Langeoog: insights from combined HEM and MRS data. *J. Appl. Geophys.* **136**, 231–245 (2017)
- Delsman, J.R., van Baaren, E.S., Siemon, B., Dabekaussen, W., Karoulis, M., Pauw, P., Vermass, T., Bootsma, H., de Louw, P.G.B.,

- Gunnink, J.L., Dubelaar, W., Menkovic, A., Steuer, A., Meyer, U., Revil, A., Oude Essink, G.H.P.: Large-scale, probabilistic salinity mapping using airborne electromagnetics for groundwater management in Zeeland, the Netherlands. *Environ. Res. Lett.* **13**(8), 1–12 (2018)
- Deus, N., Elbracht, J., Siemon, B.: 3D-Modelling of the salt-/fresh water interface in coastal aquifers of Lower Saxony (Germany) based on airborne electromagnetic measurements (HEM). In: Proceedings of AquaConSoil, 13th International UFZ-Deltares Conference on Sustainable Use and Management of Soil, Sediment and Water Resources Copenhagen, 9.–12.06.2015. (2015)
- Eberle, D.G., Siemon, B.: Identification of buried valley using the BGR helicopter-borne geophysical system. *Near Surf. Geophys.* **4**(2), 125–133 (2006)
- Elbracht, J., Meyer, R., Reutter, E.: Hydrogeologische Räume und Teilräume in Niedersachsen. *GeoBerichte 3. LA für Bergbau, Energie und Geologie*, Hannover (2016). 118 Seiten
- Gabriel, G., Kirsch, R., Siemon, B., Wiederhold, H.: Geophysical investigation of buried Pleistocene subglacial valleys in Northern Germany. *J. Appl. Geophys.* **53**, 159–180 (2003)
- González, E., Deus, N., Elbracht, J., Siemon, B.: Structural modelling of the northern Elbe-Weser region and the Lamstedt Push Moraine (Lower Saxony, Germany) supported by helicopter borne electromagnetics (HEM). *EG J.* (2021a)
- González, E., Deus, N., Elbracht, J., Rahman, M.A., Wiederhold, H.: Current and future state of groundwater salinization of the northern Elbe-Weser region. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* (2021b)
- Grinat, M.: Geoelektrische Langzeitbeobachtungen zur Erfassung von Salzwaterintrusionen. *Bbr Leitungsbau Brunnenbau Geothermie* **5**, 58–62 (2019)
- Hahn, J.: Grundwasser in Niedersachsen. *Grundwasser Niedersachs.* **7**, 13–27 (1991)
- Herzberg, B.: Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder. *J. Gasbeleucht. Wasserversorg.* **44**(815–819), 842–844 (1901)
- Janszen, A., Moreau, J., Moscariello, A., Ehlers, J., Kröger, J.: Time-transgressive tunnel-valley infill revealed by a three-dimensional sedimentary model, Hamburg, north-west Germany. *Sedimentology* **60**(3), 693–719 (2013). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01357.x>
- Kirsch, R. (Hrsg.): *Groundwater geophysics, a tool for hydrogeology*. Springer, Heidelberg (2006)
- Kuster, H., Meyer, K.-D.: Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. *Eiszeitalt. Gegenwart* **29**, 135–156 (1979)
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: NIBIS® Kartenserver: Geologische Karte von Niedersachsen 1:50 000 – Grundkarte. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover (2014a)
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: NIBIS® Kartenserver: Hydrogeologische Karte von Niedersachsen 1:50 000 – Mittlere jährliche Grundwasserneubildungsrate 1981–2010, Methode mGROWA18. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover (2014b)
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: NIBIS® Kartenserver: Hydrogeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1:200.000 – Lage der Grundwasseroberfläche. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover (2014c)
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie: NIBIS® Kartenserver: Hydrogeologische Übersichtskarte von Niedersachsen 1:200 000 – Versalzung des Grundwassers. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover (2014d)
- Martens, S., Wichmann, K.: Grundwasserversalzung in Deutschland. In: Lozán, J.L.H., Graßl, P., Hupfer, L., Schönwiese, C.-D. (Hrsg.) *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, 3. Aufl., S. 203–209. (2011)
- Meyer, K.-D.: Pleistozäne (elster- und saalezeitliche) glazilimnische Beckentone und -schluffe in Niedersachsen/NW-Deutschland. *Eiszeitalt. Gegenwart* **66**(1), 32–43 (2017). <https://doi.org/10.3285/eg.66.1.03>
- Miensopust, M., Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J.: *Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Norddenham 2009/2010*. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132100., Hannover (2014)
- Nabighian, M.N. (Hrsg.): *Electromagnetic methods in applied geophysics, Volume 1, Theory*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa (1988)
- Rahman, M.A., González, E., Wiederhold, H., Deus, N., Elbracht, J., Siemon, B.: Characterization of a regional coastal zone aquifer using interdisciplinary approach – an example from the Weser-Elbe region, Lower Saxony, Germany. *E3S Web of Conferences* **54**, 00026. (2018)
- Repsold, H.: Geoelektrische Untersuchungen zur Bestimmung der Salz-/Süßwasser-Grenze im Gebiet zwischen Cuxhaven und Stade. *Geol. Jahrbuch C* **56**, 3–37 (1990)
- Rodemann, H., Brost, E., Schünemann, J., Noell, U., Siemon, B., Binot, F.: Gleichstromgeoelektrische Untersuchungen eines mit aerelektromagnetischen Messungen kartierten Süßwasservorkommens im Sahlenburger Watt unter Berücksichtigung von Äquivalenzfällen und 2D/3D-Modellrechnungen. *Z. Angew. Geol.* **1**, 43–51 (2005)
- Rumpel, H.-M., Binot, F., Gabriel, G., Siemon, B., Steuer, A., Wiederhold, H.: Benefit of geophysical data for hydrogeological 3D modelling—An example of the Cuxhaven buried valley. *Dtsch. Geol. Ges.* **160**(3), 259–269 (2009)
- Sengpiel, K.-P., Siemon, B.: Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration. *Geophysics* **65**, 1983–1992 (2000)
- Siemon, B.: Improved and new resistivity-depth profiles for helicopter electromagnetic data. *J. Appl. Geophys.* **46**, 65–76 (2001)
- Siemon, B.: Electromagnetic methods – frequency domain. In: Kirsch, R. (Hrsg.) *Groundwater Geophysics, a tool for hydrogeology*, S. 155–178. Springer, Heidelberg (2006)
- Siemon, B., Eberle, D.G., Binot, F.: Helicopter-borne electromagnetic investigation of coastal aquifers in North-West Germany. *Z. Geol. Wiss* **32**(5/6), 385–395 (2004)
- Siemon, B., Christiansen, A.V., Auken, E.: A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. *Near Surf. Geophys.* **7**, 629–646 (2009)
- Siemon, B., Steuer, A., Ullmann, A., Vasterling, M., Voß, W.: Application of frequency-domain helicopter-borne electromagnetics for groundwater exploration in urban areas. *Phys. Chem. Earth* **36**(16), 1373–1385 (2011)
- Siemon, B., Steuer, A., Ibs-von Seht, M., Voß, W., Meyer, U., Wiederhold, H.: Combination of Airborne Geophysical Surveys at the Estuaries of the Weser and Elbe Rivers in Northern Germany. In: Proceedings of 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics – Remote Sensing Workshop Paris, 3.–05.09.2012. (2012). RS30
- Siemon, B., Voß, W., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J., Röttger, B.: *Technischer Bericht Hubschrauber-Geophysik – Cuxhaven Mai 2000 (Revision 2013)*. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131409., (2013)
- Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J., Voß, W.: *Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Esens 2008/2009*. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131805., (2014a)
- Siemon, B., Wiederhold, W., Steuer, A., Miensopust, M.P., Voß, W., Ibs-von Seht, M., Meyer, U.: Helicopter-borne electromagnetic surveys in Northern. In: Wiederhold, H., Michaelsen, J., Hinsby, K., Nommensen, B. (Hrsg.) *Programme and Proceedings of SWIM 2014, 23rd Salt Water Intrusion Meeting 2014 Husum*, 15.–22.06.2014. S. 375–378. (2014b)
- Siemon, B., Costabel, S., Voß, W., Meyer, U., Deus, N., Elbracht, J., Günther, T., Wiederhold, H.: Airborne and ground geophysical mapping of coastal clays in Eastern Friesland, Germany. *Geophysics* **80**(3), WB21–WB34 (2015)
- Siemon, B., Voß, W., Kerner, T., Pielawa, J.: *Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Hadelner Marsch Mai/Juni 2004 (Revision 2017)*. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0134290. (2017)

- Siemon, B., Steuer, A., Deus, N., Elbracht, J.: Comparison of manually and automatically derived fresh-saline groundwater boundaries from helicopter-borne EM data at the Jade Bay, Northern Germany. *E3S Web of Conferences* 54, 00032. (2018)
- Siemon, B., van Baaren, E., Dabekaussen, W., Delsman, J., Dubelaar, W., Karaoulis, M., Steuer, A.: Automatic identification of fresh-saline groundwater interfaces from airborne electromagnetic data in Zeeland, the Netherlands. *Near Surf. Geophys.* **17**, 3–25 (2019a)
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J.: Ergänzung zum Technischer Bericht – Neuauswertung der Befliegung Hadelner Marsch 2004. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0135485. (2019b)
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Frank, S.: Airborne electromagnetic and radiometric peat thickness mapping of a bog in Northwest Germany (Ahlen-Falkenberger Moor). *Remote Sens* **12**, 203 (2020a)
- Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Steuer, A., Deus, N., Wiederhold, H.: Airborne electromagnetic, magnetic, and radiometric surveys at the German North Sea coast applied to groundwater and soil investigations. *Remote Sens* **12**, 1629 (2020b)
- Steinmetz, D., Winsemann, J., Brandes, C., Siemon, B., Ullmann, A., Wiederhold, H., Meyer, U.: Towards an improved geological interpretation of airborne electromagnetic data: a case study from the Cuxhaven tunnel valley and its Neogene host sediments (northwest Germany). *Neth. J. Geosci.* **94**(2), 201–227 (2015)
- Steuer, A., Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J., Voß, W.: Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Glückstadt, Sommer 2008 – Frühjahr 2009. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0131097. (2013)
- Sulzbacher, H., Wiederhold, H., Siemon, B., Grinat, M., Igel, J., Burschil, T., Günther, T., Hinsby, K.: Numerical modelling of climate change impacts on freshwater lenses on the North Sea Island of Borkum using hydrological and geophysical methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **16**, 3621–3663 (2012)
- TrinkwV: Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459) (2016)
- Ullmann, A., Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J.: Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung Jever, 2009/2014. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0134900. (2017a)
- Ullmann, A., Siemon, B., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J.: Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik Befliegung Varel, 2014. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0134954. (2017b)
- Voß, W., Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M., Pielawa, J.: Technischer Bericht Hubschrauber-geophysik – Befliegung Langeoog 2008/2009. Hannover. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132536. (2015)
- Wiederhold, H., Gabriel, G., Grinat, M.: Geophysikalische Erkundung der Bremerhaven-Cuxhavener Rinne im Umfeld der Forschungsbohrung Cuxhaven. *Z. Angew. Geol.* **51**(1), 28–38 (2005)
- Wiederhold, H., Rumpel, H.-M., Auken, E., Siemon, B., Scheer, W., Kirsch, R.: Geophysikalische Verfahren zur Erkundung und Charakterisierung von Grundwasserleitern in Quartären Rinnen. *Grundwasser* **13**(2), 68–77 (2008)
- Wiederhold, H., Sulzbacher, H., Grinat, M., Günther, T., Igel, J., Burschil, T., Siemon, B.: Hydrogeophysical characterization of freshwater/saltwater systems – case study: Borkum Island, Germany. *First Break*. **31**(8), 109–117 (2013)
- Wiederhold, H., Scheer, W., Sulzbacher, H., Siemon, B., Kirsch, R.: Nordseeinseln im Klimawandel – die Nordfriesische Insel Föhr und die Ostfriesische Insel Borkum. In: Tillmann, T. (Hrsg.) Aktuelle Küstenforschung an der Nordseeküste *Coastline Reports* 25. S. 45–58. (2015)
- Zimmermann-Timm, H.: Versalzung von Gewässern. In: Lozán, J.L.H., Graßl, P., Hupfer, L., Schönwiese, C.-D. (Hrsg.) *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle ?*, 3. Aufl., S. 197–202. (2011)

Hinweis des Verlags Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.