

Der Untergrund von Föhr: Geologie, Grundwasser und Erdwärme

Ergebnisse des INTERREG-Projektes CLIWAT



Herausgeber:

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes
Schleswig-Holstein (LLUR)
Hamburger Chaussee 25
24220 Flintbek
Tel: +49 (43 47) 704 - 0
Fax: +49 (43 47) 704 - 102
www.llur.schleswig-holstein.de

Redaktion:

Abteilung Geologie und Boden
Ansprechpartner: Dr. Reinhard Kirsch
Tel: +49 (43 47) 704 - 534
Fax: +49 (43 47) 704 - 502
E-Mail: reinhard.kirsch@llur.landsh.de

Dieses Projekt wurde von der
Europäischen Gemeinschaft kofinanziert

Titel:

Luftaufnahme Föhr
(Gerhard Launer WFL GmbH,
Schießhausstr. 14, 97228 Rottendorf,
www.deutschlandvonoben.de)
kleine Fotos (LLUR)
links: SkyTEM-Erfassung
mitte: Referenz-Bohrung
rechts: 3-D-Modell von Föhr

wenn nicht anders angegeben,
Grafik und Fotos im Innenteil von LLUR

PDF der Broschüre im Internet
www.llur.schleswig-holstein.de

Herstellung:

Pirwitz Druck & Design, Kronshagen

Februar 2012

ISBN: 978-3-937937-59-5

Schriftenreihe: LLUR SH – Geologie und Boden; 18

Diese Broschüre wurde auf
Recyclingpapier hergestellt

Diese Druckschrift wird im Rahmen der
Öffentlichkeitsarbeit der schleswig-
holsteinischen Landesregierung heraus-
gegeben. Sie darf weder von Parteien
noch von Personen, die Wahlwerbung
oder Wahlhilfe betreiben, im Wahl-
kampf zum Zwecke der Wahlwerbung
verwendet werden. Auch ohne zeit-
lichen Bezug zu einer bevorstehenden
Wahl darf die Druckschrift nicht in einer
Weise verwendet werden, die als Partei-
nahme der Landesregierung zu Gunsten
einzelner Gruppen verstanden werden
könnte. Den Parteien ist es gestattet,
die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer
eigenen Mitglieder zu verwenden.

Die Landesregierung im Internet:

www.landesregierung.schleswig-holstein.de

Inhalt

	Vorworte	5
1	Einleitung	7
2	Geologie und Landschaftsentwicklung von Schleswig-Holstein	11
3	Werkzeuge der Hydrogeologie	21
	3.1 Bohrungen	21
	3.2 Geophysikalische Bohrlochvermessung	25
	3.3 Messstellen, Brunnen	26
	3.4 Hydrogeologische Schnitte und Modelle	30
	3.5 Ermittlung von Grundwassereinzugsgebieten	31
	3.6 Grundwasser-Analysen	34
4	Geophysikalische Untersuchungen auf Föhr	38
	4.1 Unser Untergrund – von der Geologie zur Physik	38
	4.2 Geoelektrische und Elektromagnetische Messungen auf Föhr, SkyTEM	38
	4.3 Seismische Messungen auf Föhr	43
	4.4 Seismik und SkyTEM kombiniert	45
	4.5 Weitere Untersuchungen	45
5	Ein Blick in den Untergrund der Insel Föhr	49
	5.1 Datengrundlage und zusätzliche Untersuchungen im Rahmen des Projektes CLIWAT	49
	5.2 Hydrogeologischer Aufbau des Untergrundes, nutzbare Grundwasserleiter	50
	5.2.1 Eiszeitliche Ablagerungen	51
	5.2.2 Jungtertiäre Ablagerungen	54
	5.2.3 Nacheiszeitliche Ablagerungen in der Marsch und Godelniederung	56
	5.3 Das digitale dreidimensionale Geologische Modell	56
	5.4 Grundwasserströmungsverhältnisse	58
	5.5 Grundwasserbeschaffenheit	60
6	Wasserversorgung auf Föhr	63
	6.1 Vom Hausbrunnen zur zentralen Wasserversorgung	63
	6.2 Wassergewinnung und Wasserabgabe	65
	6.3 Trinkwasserqualität	66
	6.4 Grundwasserschutz und Wasserschutzgebiete	68
	6.5 Grundwasserüberwachung (Monitoring)	71

7	Grundwasser im Klimawandel – Ergebnisse des Projektes CLIWAT für die Insel Föhr	73
7.1	Klimawandel – womit müssen wir rechnen?	73
7.2	Das hydrogeologische und geophysikalische Untersuchungsprogramm auf Föhr	74
7.3	Grundwassermodell	76
7.3.1	Der Weg zum Grundwassermodell	76
7.3.2	Datengrundlage	76
7.3.3	Auswahl und Aufstellung des Modells	77
7.4	Ergebnisse der Grundwassermodellierung für Föhr.....	80
7.5	Ausblick und mögliche Anpassungsmaßnahmen	85
7.5.1	Geest	85
7.5.2	Marsch	85
7.5.3	Was bleibt zu tun?	86
8	Wärme aus der Tiefe – Geothermische Nutzung des Untergrundes von Föhr.....	87
8.1	Die Heizung aus dem Untergrund	87
8.2	Technik der oberflächennahen Geothermie	87
8.3	Die Effektivität der Erdwärmeheizung	90
8.4	Zur Dimensionierung von Erdwärmesonden	91
8.5	Besonders wichtig: der Schutz des Grundwassers	94
9	Zusammenfassung – Summary	97
10	Danksagung	99
11	Literatur	100
12	Liste der Autoren	102

Vorworte

Die weltweite Erwärmung des Klimas ist eines der zentralen Themen des 21. Jahrhunderts. Sollte der befürchtete Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um mehrere Grad nicht abgewendet werden können, drohen in den kommenden Jahrzehnten weit reichende Folgen. So muss beispielsweise neben einer allgemeinen Zu- oder Abnahme der Niederschläge je nach Region mit einer Häufung extremer Witterungsverhältnisse wie Dürreperioden, Überschwemmungen infolge Starkregens oder Wirbelstürmen gerechnet werden. Das Hauptaugenmerk gilt dem Anstieg des Meeresspiegels, hervorgerufen durch die thermische Ausdehnung des Meerwassers und abschmelzende Gletscher der Hochgebirge, vor allem aber des grönländischen Inlandeises.

Die Insel Föhr ist aufgrund ihrer Lage im Nordfriesischen Wattenmeer durch einen nachhaltigen Anstieg des Meeresspiegels naturgemäß besonders gefährdet. Dies betrifft zunächst ihren Bestand an sich – die Niederungen der Marsch liegen nur etwa 1 m über NN und müssen durch einen Deich geschützt werden –, längerfristig jedoch auch das Grundwasser in den Geestkernen. Dabei gilt es, zwei Aspekte zu unterscheiden: Mit dem Meeresspiegel steigt der Grundwasserspiegel – möglicherweise noch verstärkt durch eine Zunahme der Niederschlagsmengen, wie von Klimamodellen für Norddeutschland prognostiziert wird –, so dass tiefer gelegene Bereiche vernässen könnten. Eine Gefahr besteht ferner für das Grundwasser der Geest selbst, aus dem die Trinkwasserversorgung der Insel Föhr bestritten wird und dessen

Gleichgewichtsbedingungen sich durch einen Meeresspiegelanstieg verschieben könnten, mit der Folge eines verringerten Dargebots.

Im Rahmen des EU-Interreg IV B Projektes CLIWAT (CLimate change & groundWATER) wird der Einfluss des Klimawandels auf das Grundwasser in 7 Pilotregionen an der Nordsee näher untersucht. Dabei werden die vorhandenen Daten durch geophysikalische und geologische Untersuchungen gezielt ergänzt, um die Grundwassersysteme besser zu verstehen und zukünftige Entwicklungen anhand von Simulationsrechnungen mit digitalen Grundwassermodellen prognostizieren zu können. Ich freue mich sehr, dass die Insel Föhr zu den CLIWAT-Pilotregionen zählt. Die bislang vorliegenden Ergebnisse aus den ergänzenden geophysikalischen Untersuchungen haben den Kenntnisstand über den geologischen Aufbau der Insel Föhr bereits erheblich erweitert. Ohne Zweifel werden davon auch der Wasserbeschaffungsverband Föhr und mit ihm alle Insulaner im Hinblick auf die langfristige Sicherung der Trinkwasserversorgung profitieren. Ich wünsche dem CLIWAT-Projekt weiterhin gutes Gelingen und einen erfolgreichen Abschluss und bedanke mich im Namen der Insel Föhr bei allen, die dazu beigetragen haben.



Christfried Rolufs
Verbandsvorsteher des Wasserbeschaffungsverbandes Föhr

Liebe Leserinnen und Leser,

Im Rahmen der „Europäischen territorialen Zusammenarbeit“ der europäischen Strukturpolitik – bekannt als das INTERREG B Programm – fördert die Europäische Union die Zusammenarbeit der europäischen Staaten mit dem Ziel einer integrierten räumlichen Entwicklung. Schleswig-Holstein partizipiert aufgrund seiner Lage zwischen den Meeren an zwei staatenübergreifenden Kooperationsräumen – den Räumen Nordsee und Ostsee.

Das Projekt CLIWAT – CLImate change & groundWATer - wurde unter der Programmpriorität „Umwelt und Risikovorsorge“ der Förderperiode 2007 bis 2013 konzipiert und zielt auf die Entwicklung von Methoden und Maßnahmen im Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser ab. Durch Simulationsrechnungen auf der Grundlage bestehender Klimaprojektionen des Weltklimarates IPCC für die Region sollte insbesondere die Versalzungsgefährdung von küstennahen Süßwasserressourcen im Nordseeraum untersucht werden. Die Untersuchungen im schleswig-holsteinischen Teil des transnationalen Projektes konzentrierten sich auf die Pilotregion Föhr. Aus den Projektergebnissen lassen sich jedoch auch Schlussfolgerungen für andere küstennahe Regionen ableiten.

Die Zusammenarbeit mit anderen geowissenschaftlichen Institutionen aus dem In- und Ausland im Rahmen dieses Projektes war für alle Mitwirkenden ein Gewinn. Der Einsatz innovativer Erkundungsmethoden wie zum Beispiel die hubschraubergestützte Aerogeophysik führte zu flächendeckenden Erkenntnissen über die Untergrundstruktur. Der Erfahrung- und Wissensaustausch mit den Projektpartnern sowie der weitere Ausbau kollegialer Netzwerke werden für die fachliche Arbeit des geologischen Landesdienstes im LLUR über den Projektzeitraum hinaus von großem Nutzen sein. Mit dieser Broschüre über die Erkenntnisse zum hydrogeologischen Aufbau der Insel und deren Bedeutung für die nachhaltige Versorgung der Insulaner mit Trinkwasser und Erdwärme wird der Wert der Projektbeteiligung für die Region verständlich und greifbar.



Sabine Rosenbaum
Leiterin der Abteilung Geologie und Boden
- Geologischer Landesdienst -
im Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume des Landes Schleswig-
Holstein

1 Einleitung

➤ Broder Nommensen

Die Insel Föhr verdankt ihre geographische Entstehung katastrophalen Naturereignissen – während der ersten „Mandränke“ von 1362 wurde sie dem Festland entrissen, die zweite „Mandränke“ von 1634 gab ihr weitgehend die heutige Form. Unbeteiligt an der Entwicklung war der Mensch schon damals nicht. Bestrebungen zur Verbesserung und zum Erhalt der Lebensgrundlage drückten sich in der Landgewinnung, ersten Deichbau- und Entwässerungsmaßnahmen, einer Aufsiedlung der tief gelegenen Marschflächen und auch der Salztorfgewinnung aus. In Unkenntnis der Folgen kam es zu lokalen Landabsenkungen, zu Meereseinbrüchen und zum Verlust von Landflächen. Die Auswirkungen des Handelns blieben lokal und betrafen die unmittelbar beteiligten Personen.

Mit dem zunehmendem Wandel der Natur in eine Kulturlandschaft, verstärktem Deichbau, höherem Siedlungsdruck, flächenhafter Entwässerung der Marschen (Setzung der Weichschichten) und deren stärkerer Nutzung erhöhte sich das Risiko schwerer und flächenhafter Verluste an Menschen, Tieren und Sachwerten bei extremen Naturereignissen. Der Walfang brachte zwar den Föhringern (so bezeichnen sich die alteingesessenen Föhrer lieber) im 17. und 18. Jahrhundert ihr „goldenes Zeitalter“, durch zu hohe Fänge gingen die Walbestände und damit die wirtschaftliche Bedeutung des Walfanges im gesamten Nordmeer jedoch stark zurück. Zwangsläufig musste die Landwirtschaft intensiviert werden; technische Unterstützung beim Deichbau, bei der Regulierung der Wasserstände oder dem Mühlenbau leisteten insbesondere niederländische Fachleute. Die Auseinandersetzung der Menschen mit der Umwelt und die Auswirkungen menschlichen Handelns auf sie verlagerten sich im beschriebenen Zeitraum von der unmittelbaren Lebensumgebung auf eine überregionale bis länderübergreifende Ebene.

Ende des 19. Jahrhunderts gewinnt der Fremdenverkehr zunehmende Bedeutung; er ist heute der wichtigste Wirtschaftszweig auf Föhr. Mit der Zahl der Menschen stieg der Wasserverbrauch stark an, bis auf jährlich knapp 1 Million Kubikmeter. Genutzt wird das in den Sanden der Geestkerne gespeicherte Grundwasser. Es wird aus den im Boden versickernden Niederschlägen ständig neu gebildet und „schwimmt“ als Süßwasserkalotte auf dem spezifisch schwereren Salzwasser. **Das Grundwasser ist Schwerpunktthema dieser Broschüre.**

➤ Erk R. Roeloffs

Übersetzung ins Friesische (Fering)

Dat Feer en eilun wurden as, leit uun a iarst „Mandränke“ faan 1362, do as Feer faan a feesteeg ufliaset wurden. Det naist „Mandränke“ faan 1634 surigt do för det fuarem, üüs wat wi det daaling keen. Uk dojütidj hed a mensch mä skilj diartu, dat det so kaam. Lun wanen, iindikin, weederlösingan unlei an törew steegen hee san dial diartu bidraanjen. Jo wost ei, dat diardör at lun ufsake küd, det weeder lachter auer't lun kaam an det lun do ferleesen ging. A fulgen faan hörens dun spelet jo för hör aanj uugen uf an bedraapt jo salew.

Leewen muar lun wurd bewerket, muar dicker baud, maasklun wurd drüglaanjen an nadigt. So stiihd de gefoor, föl lun, tiaren an mensken bi grat sturemfluden tu ferleesen.

Uun't 17. an 18. juarhunert broocht a waalfang a feringen en gulen tidj. Man auer diar bal altuföl waaler fangd an ei muar so föl troon brükt wurd, wiar det tidj gau weler förbi. Sodening skul at lidj muar büüre an holunsk fachlidj holep, gud diker aptusaaten, skööding tu greewen an uk malnen tu baun. Det ütjnölersaaten faan a mensken mä hör amwäält an a fulgen faan hörens dun san santdeem ei muar bluat för a aanj dör tu sen, jo bedraap uk öler lunen.

At aanj faan't 19. juarhunert wurd a baaselidj leewen wichtiger för Feer. Diarmä wurt bit daaling det miast jil fertiinet. Man al dön mensken brük uk leewen muar weeder - ap tu ian miljuun kubikmeeter at juar. Nadigt wurt det grünjweeder faan a sunig geest. Det wurt faan rinweeder stödig apfald an „sweemt“ üüs son swetweederblees üüb det swaarer saaltweeder. **Am det grünjweeder gungt det uun detheer skraft.**

Det fering grünjweeder, wat'am üüs leitungsweeder faan a „Wasserbeschaffungsverband Föhr“ saner beteenken drank kön, an en gansen dial gefooren ütjsaat. Bluat uun enkelt steeden jaft det gud grünjer, man uun a miast steeden docht de grünj ei, am det weeder diaroner tu bewaarin. Troch a büürerei, man uk troch öler dun komt diar kroom iin uun't grünjweeder, wat diar ei henhiart – wan't uk miasttidjs oner a grensen blaft, wat tuleet san. Ham mut uk ei tuföl weeder uun ian steed ütj a grünj haale, dat'am nian saaltweeder tu-

Die Qualität des Grundwassers auf Föhr, das als Leitungswasser des Wasserbeschaffungsverbandes Föhr unbedenklich getrunken und verwendet werden kann, ist vielfältigen Gefährdungen ausgesetzt. So ist die natürliche Schutzwirkung der grundwasserüberdeckenden Schichten nur gering. Aus der seit langem andauernden, intensiven landwirtschaftlichen Nutzung, aber auch anderen gewerblichen und privaten Aktivitäten wurden und werden Fremdstoffe in das Grundwasser eingetragen, deren Konzentrationen aber meist noch unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte liegen. Die Entnahmemenge darf punktuell nicht zu hoch sein, da ansonsten Salzwassereinbrüche nicht ausgeschlossen werden können. Als neue Herausforderung sind die Auswirkungen des Klimawandels ernst zu nehmen, der in diesem Jahrhundert nunmehr auch eine Bedrohung auf globaler Ebene darstellt.

Die Anteile natürlicher Entwicklungen und menschlicher Beeinflussungen am Klimawandel sind hier nicht zu bewerten – er wird nach den vorliegenden Prognosen aber besonders den Küstenraum und damit auch die Insel Föhr betreffen. Der zu erwartende Meeresspiegelanstieg wird große Anstrengungen im Küstenschutz erfordern, zusätzliche Veränderungen der Niederschlagsverteilung lassen höhere Grundwasserstände erwarten. Die Gefahr einer noch schnelleren Zusickerung von Stoffen aus der landwirtschaftlichen Flächennutzung sowie aus punktuellen Altablagerungen und sonstigen Eintragsquellen ist genauso wenig zu unterschätzen wie mögliche Verschiebungen der Süß-/Salzwassergrenze im Grundwasser. Zur langfristigen Sicherung des lebenswichtigen Trinkwasservorrates sind der Schutz, die Überwachung und eine vorausschauende Bewirtschaftung dieser Ressource und – hier ganz bewusst erwähnt – des Wirtschaftsfaktors Grundwasser zwingend.

Das überaus komplexe Wirkgefüge der genannten Umweltauswirkungen erfordert umfangreiches Fach- und Methodenwissen sowie eine vernetzte, länderübergreifende Zusammenarbeit der Fachleute. Einen wichtigen Schritt in diese Richtung stellt das Projekt CLIWAT dar.

CLIWAT (CLImate change and groundWATER), www.cliwat.eu ist als transnationales Forschungsprojekt im INTERREG IV B Nordsee-Programm angesiedelt. Wissenschaftler/innen aus 16 Institutionen in Belgien, Dänemark, Deutschland und den Niederlanden arbeiten seit 2008 gemeinsam in dem von der EU zu 50 % finanziell geförderten Projekt mit dem Ziel, die Einflüsse des prognostizierten Klimawandels auf den Wasserkreislauf in den Re-

paak feit. Tu al det kem nü uk noch a ütjwirkingen faan a „Klimawandel“, wat uuntesken a mensken üüb a hiale wäält bedraapt.

Hüfö! a mensk an hüfö! a natüür salew diartu bidraanjen hee, skal heer ei bewäärtet wurd, man det schocht so ütj, üüs wan föral a küst an diarmä uk Feer bedraapen as. Jin det uunstiigend weeder skal a küst beeder seekert wurd an leewen muar rin surigt för huuger grünjweeder. De gefoor, dat leewen muar an gauer kroom iin uun't grünjweeder raaget, wat diar ei wees mut, as ei tu auersen; jüst so üüs det mögelk-haid, dat ham det grens tesken swet- an saaltweeder uun't grünjweeder ferskoft. Am üüs leewentswichtig drankweeder üüb a düür tu seekrin, skel wi det nuadig bewaare, diarüüb üübpaase an so diarmä amgung, dat wi uk uun kemen tidjen gud drankweeder haa, wat'am uk betaale kön.

Auer heer soföl ferskeelig an kompleks dingen tupkem, as det nuadig, dat dön lidj, wat diarfaan wat ferstun, auer a grensen henwech tupwerke. En graten straal üüb dediar wai as det projekt CLIWAT.

CLIWAT (CLImate change and groundWATER), www.cliwat.eu as en „transnational“ forschungsprojekt uun det „INTERREG IV B Nordsee-Programm“.

Wedenskaplidj ütj 16 institutjuunen uun Belgien, Deenemark, Holun an Tjisklun werke sant 2008 tup uun det projekt, wat a heleft faan sin medel faan a EU feit. Jo ferschük ütjtufinjen, hü de „Klimawandel“ mä al sin feranringen wel üüb at grünjweeder trochslait. An do gungt det diaram, wat'am du kön of skal för en gud fersurging mä drank- an brükweeder an för a natüür an a amwäält.

Uun det projekt werke tup (faan a nuurd tu a süüd):

- GEUS Geologischer Dienst von Dänemark und Grönland, Kopenhagen (DK)
- Region Midtjylland, Horsens (DK)
- Region Syddanmark, Vejle (DK)
- Stadt Horsens (DK)
- Universitet Aarhus, Geologisk Institut (DK)
- Naturstyrelsen Aarhus (DK)
- Naturstyrelsen Ribe (DK)
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume SH, Flintbek (D)
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover (D)
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (D)

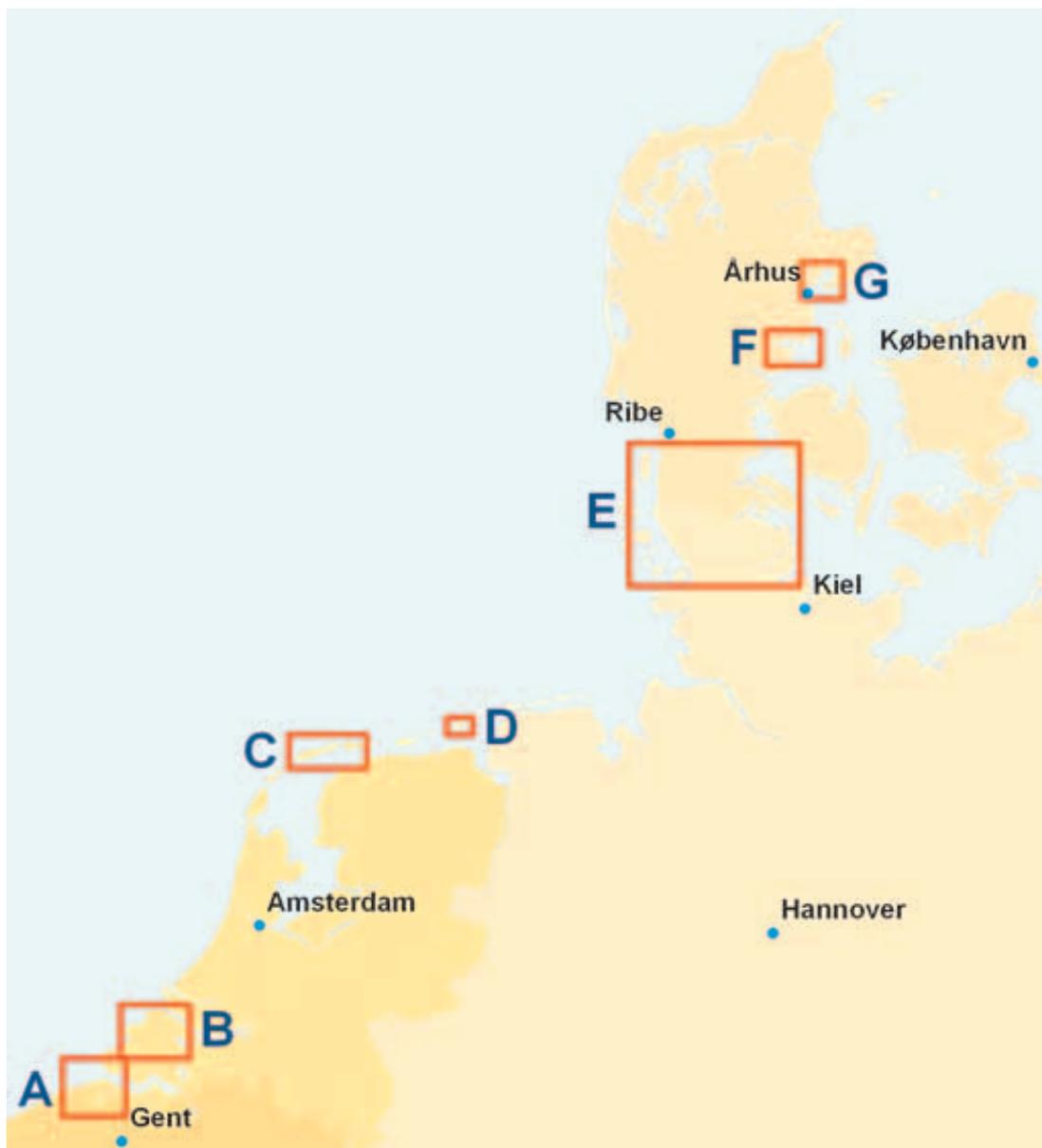


Abbildung 1:
CLIWAT Projektgebiete:
A) Belgische Mid-
denkust (B),
B) Zeeland (B, NL),
C) Fryslan und Terschelling (NL),
D) Borkum (D)
(LIAG 2012),
E) Schleswig/Sønderjylland (D, DK),
F) Egebjerg und Horsens (DK),
G) Aarhus Aa (DK).

gionen zu erkunden (Abbildung 1). Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen die Veränderungen, die für das Grundwasser zu erwarten sind - mit den sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Trink- und Brauchwasserversorgung, für infrastrukturelle Maßnahmen sowie für Natur und Umwelt.

Projektpartner sind (von Nord nach Süd):

- GEUS Geologischer Dienst von Dänemark und Grönland, Kopenhagen (DK)
- Region Midtjylland, Horsens (DK)
- Region Syddanmark, Vejle (DK)
- Stadt Horsens (DK)
- Universitet Aarhus, Geologisk Institut (DK)
- Naturstyrelsen Aarhus (DK)
- Naturstyrelsen Ribe (DK)
- Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume SH, Flintbek (D)
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover (D)

- seeconsult GmbH, Osnabrück (D)
- DELTARES, Delft (NL)
- Provincie Fryslan, Leeuwarden (NL)
- Wetterskip Fryslan, Leeuwarden (NL)
- VITENS, Leeuwarden (NL)
- Vakgroep Geologie en Bodemkunde Universiteit Ghent (B)

Bi a küsten gungt det - ufsen faan leewen muar wederekstreemen - föral am det stiegen weeder an a huuger sturemfluden. Det lun Sleeswig-Holstian hee diarefter al sin „Küstenschutzmaßnahmen“ för a kemen juaren ütjracht. Ham skal oober uk a rocht medel an waier finj, am a weederwerken bi a küst an üüb a eilunen för det saaltweeder tu bewaarin an uk för det weeder, wat ütj a maask ei muar rocht ufluup kön an det grünjweeder uunstiig leet. Diarbi spelet a beweeging faan't grünjweeder an uk de apbau faan a onergrünj mä sin „hy-

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (D)
- seeconsult GmbH, Osnabrück (D)
- DELTARES, Delft (NL)
- Provincie Fryslan, Leeuwarden (NL)
- Wetterskip Fryslan, Leeuwarden (NL)
- VITENS, Leeuwarden (NL)
- Vakgroep Geologie en Bodemkunde Universiteit Ghent (B)

An den Küsten wird man neben zunehmenden Wetterextremen dem steigenden Meeresspiegel Beachtung schenken müssen. So hat das Land Schleswig-Holstein die erforderlichen Maßnahmen zur Anpassung der Küstenhochwasserschutzanlagen in seinen langfristigen Planungen berücksichtigt. Die Entwicklung entsprechender Strategien ist auch voranzubringen im Hinblick auf die Gefährdung küstennaher oder auf den Inseln gelegener Wasserwerke durch verstärkt eindringendes Salzwasser oder durch vom steigenden Meeresspiegel verursachte Rückstaueffekte in der Marsch, die die dortigen Grundwasserspiegel ansteigen lassen und verstärkte Drainagemaßnahmen erforderlich machen können.

Eine Schlüsselrolle für die Grundwasserbewegung spielen der geologische Schichtaufbau und die hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Gesteinsschichten. Um die Untersuchungskosten möglichst gering zu halten, kommen neben „klassischen“ Bohr- und Messverfahren auch verschiedene geophysikalische Methoden sowie geologische 3-D-Modellierungen und Grundwassermodelle zum Einsatz. Diese werden im Folgenden am Beispiel des **Projektgebietes Insel Föhr** beschrieben. Entscheidend für den Erfolg des Projektes sind Transparenz und die Einbindung der betroffenen Bevölkerung, Verbände und Unternehmen. Mit dieser Broschüre soll ein Beitrag dazu geleistet werden.

draulisch“ ferhualen uun a ferskeelig stianschichten en grat rol.

Am a koosten för't onerschüken liich tu hualen as ei bluat bööret an meeden wurden, man uk mä ferskeelig „geophysikalisch“ metuuden an 3-D-bereegningen an grünjweedermodeln as werket wurden. Jo wurd üüb dönheer sidjen uun't bispal faan Feer beskrewen.

Diarför, dat detheer projekt loket, as det nuadig, a bedraapen lidj an onernemen iintubinjen an tu wisin, wat'am maat an huaram det gungt. Detheer skraft wal diartu bidreeg.

2 Geologie und Landschaftsentwicklung von Schleswig-Holstein

➤ Wolfgang Scheer

Die Insel Föhr liegt, umgeben von Halligen und weiteren Inseln, im Nordfriesischen Wattenmeer etwa 8 km vor der Westküste des Schleswig-Holsteinischen Festlandes (Abbildung 2). Mit einer Fläche von 82 km² ist Föhr nach Sylt die zweitgrößte deutsche Nordseeinsel. Das heutige Erscheinungsbild der Landschaft an der Schleswig-Holsteinischen Westküste wurde in der jüngeren Erdgeschichte durch die natürlichen Ablagerungs- und Erosionsvorgänge während der Eiszeiten (Pleistozän) und in der Nacheiszeit (Holozän) geprägt. Hinzu kommen die Veränderungen, die seit etwa 1.000 Jahren durch die Tätigkeit der Menschen verursacht wurden und werden.

Um die Geologie des Untergrundes von Föhr zu beschreiben, ist ein weiter Rückblick in die Erdgeschichte nötig, da die Entstehung der Gesteine in der Region seit über 280 Millionen Jahren durch das großtektonische Geschehen in Nord- und Mitteleuropa beeinflusst wird. Der nord und östlich gelegene Baltisch-Skandinavische Raum ist ein sehr stabiles tektonisches Element der Erdkruste, das seit dieser Zeit aufsteigt. Dagegen ist Norddeutschland Teil eines permanenten Senkungsgebietes, in welches das in den umgebenden Hebungsbereichen erodierte Material verfrachtet wurde, so dass sich in den folgenden Erdzeitaltern bei uns eine mehrere Kilometer mächtige Schichtenfolge von Sedimentgesteinen ablagern konnte.

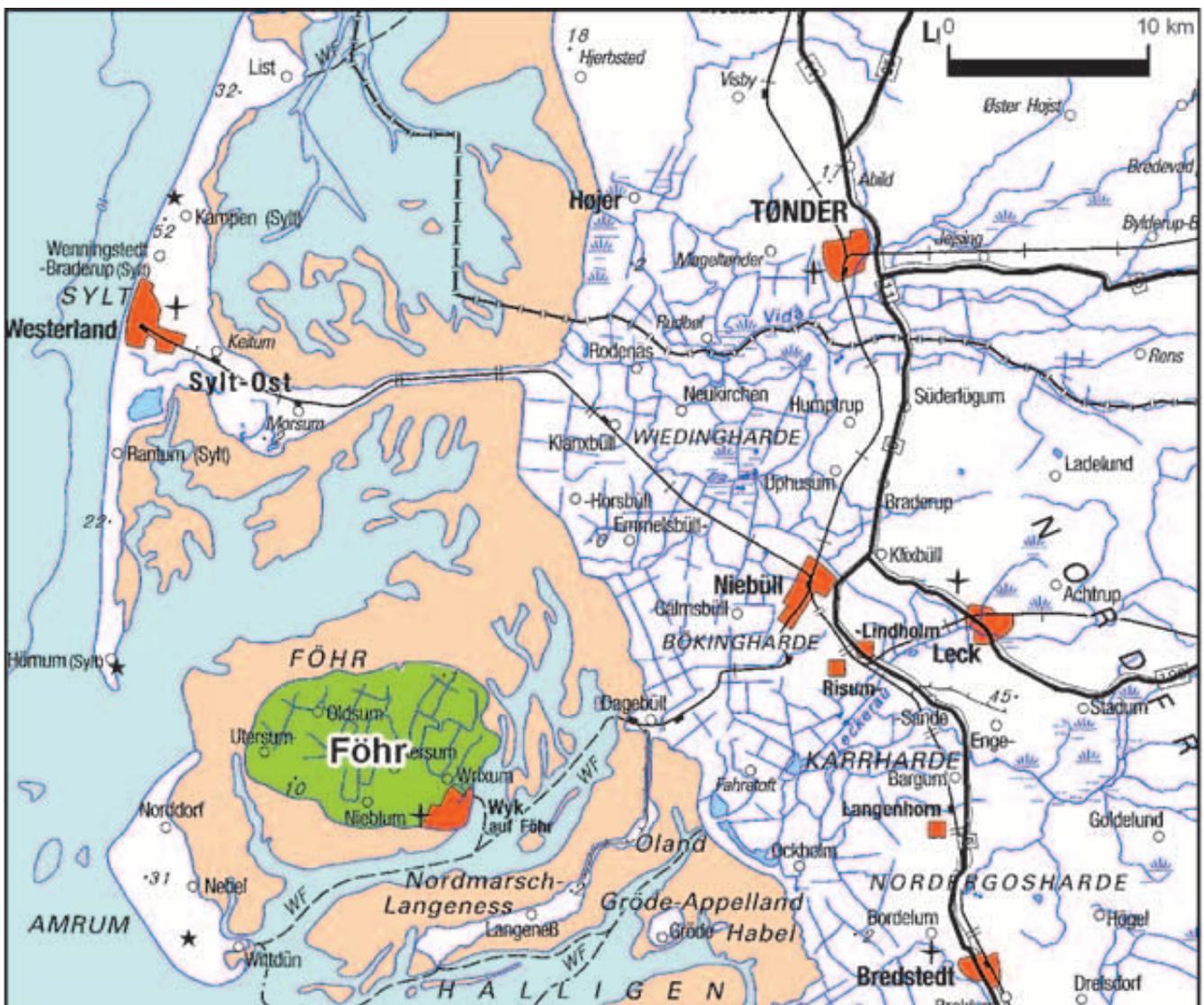


Abbildung 2: Lageplan Föhr mit Teilgebieten der Nordfriesischen Inseln und des deutsch-dänischen Festlandes.
Location map of Föhr and part of the North Frisian Islands and the german-danish mainland.

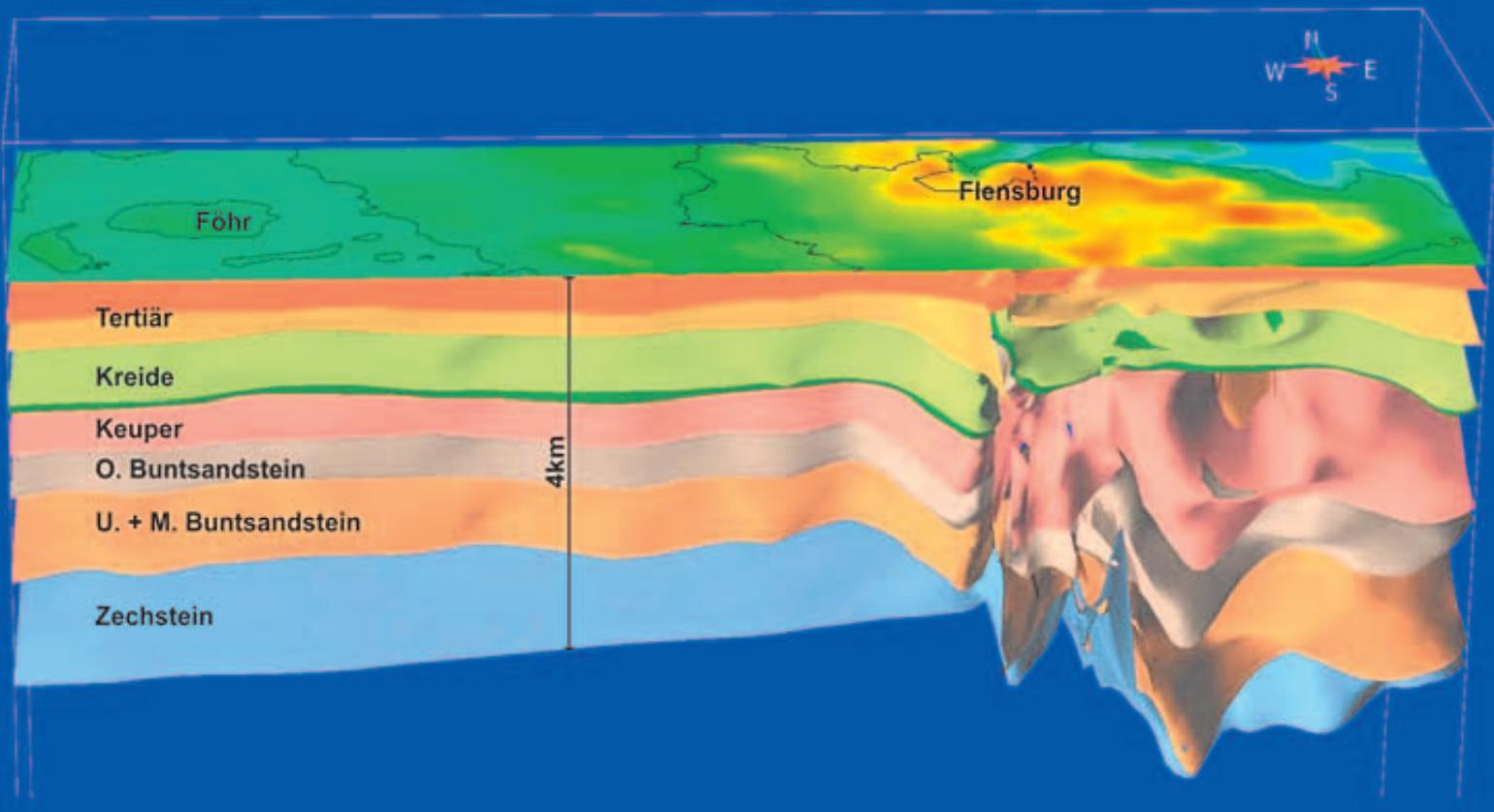


Abbildung 3: Aufbau des tieferen Untergrunds im Norden Schleswig-Holsteins, stark überhöhter West-Ost-Schnitt.
Highly exaggerated west-east cross-section of Northern Schleswig-Holstein.

In Abbildung 3 ist der Aufbau der **voreiszeitlichen Sedimente** schematisch bis in eine Tiefe von mehreren Kilometern dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lage der Schichten in Nordfriesland und im Bereich der Insel Föhr nicht durch größere tektonische Störungen beeinflusst wird. Es fehlen hier im Untergrund die in anderen Teilen Schleswig-Holsteins so markanten Störungszonen und Salzstrukturen, wie sie sich beispielsweise in der Schichtabfolge im Ostteil des Profils in Abbildung 3 abbilden.

Die älteren Sedimentgesteine wurden teilweise unter marinen und teilweise unter terrestrischen Bedingungen abgelagert, wobei ab dem Zeitalter der Kreide bis ins jüngere Tertiär durchgehend marine Sedimentationsbedingun-

gen vorherrschten, da Schleswig-Holstein zu dieser Zeit in einem Randmeer des Weltmeeres lag.

Im Jungtertiär (Miozän bis Pliozän) endete dann die lange Phase mariner Sedimentation. Große Mengen an Sediment wurden durch ein ausgedehntes Flusssystem aus dem baltoskandinavischen Raum in die Norddeutsche Senke verfrachtet und das Meer begann sich aus dem Bereich des heutigen Schleswig-Holsteins nach Westen zurückzuziehen (Abbildung 4). Gegen Ende des Tertiärs, im Oberen Pliozän, war schließlich ganz Schleswig-Holstein Festland und es kam im Bereich der Westküste zur Ablagerung von flächenhaft verbreiteten gröberen Sanden, den sogenannten Kaolinsanden.

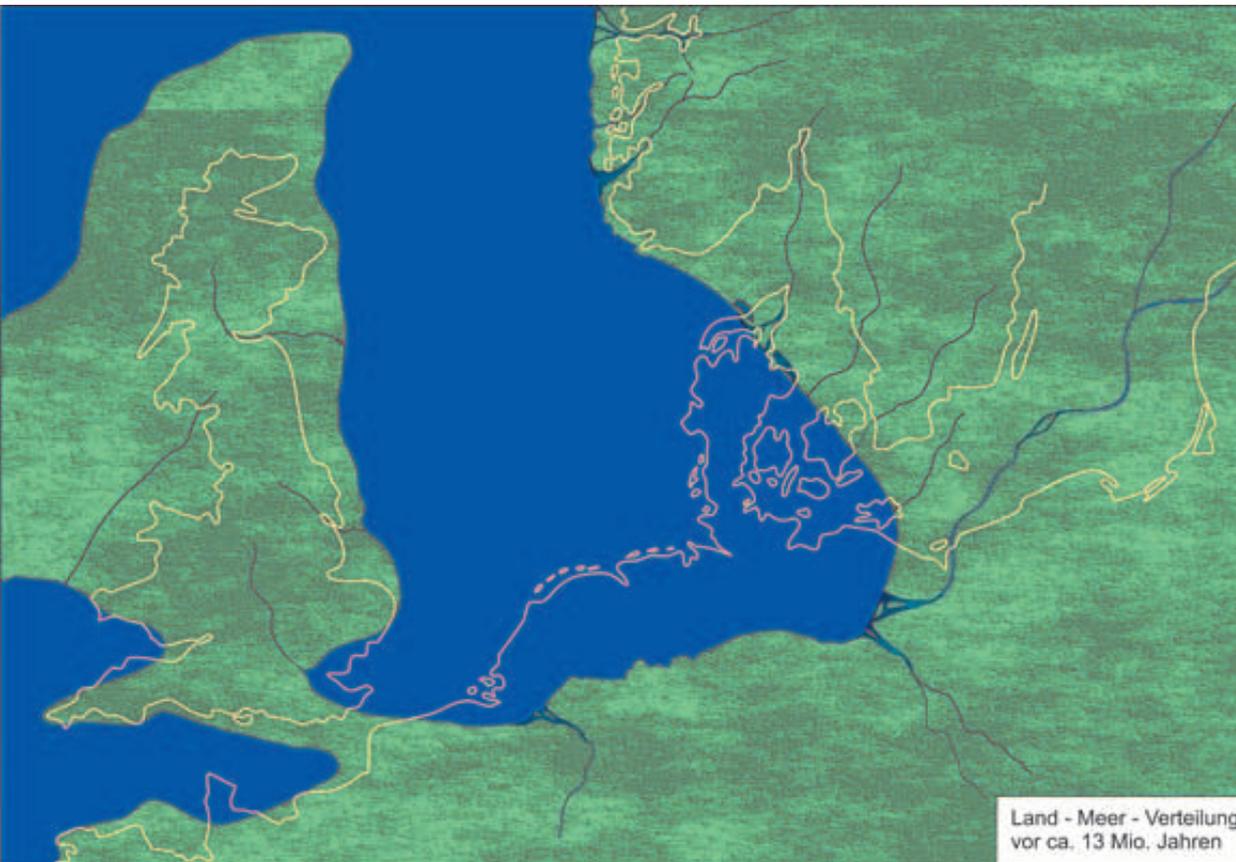


Abbildung 4: Land-Meerverteilung im Miozän vor 13 Mio. Jahren (Ablagerung des Oberen Glimmertons), nach GÜRS (2006).

Distribution of marine and terrestrial areas in the Miocene (13 Mio. years ago) after GÜRS (2006).

Mit der gegen Ende des Pliozäns einsetzenden Klimaverschlechterung begann dann der Übergang zum Pleistozän (Eiszeitalter). Die während der Kaltzeiten einsetzenden Erosions- und Sedimentationsvorgänge wurden von den aus Norden und Osten vordringenden Eismassen der Gletscher und deren Schmelzwässern bestimmt. Im Pleistozän gab es mehrere **große Vereisungsphasen**, von denen die letzten drei, die so genannte Elster-, Saale- und Weichselkaltzeit in Schleswig-Holstein größere Spuren hinterlassen haben.

Besonders während der **Elster-Kaltzeit** (450.000 bis 400.000 Jahre vor heute) wurde die voreiszeitliche Landschaft tiefgründig aufgearbeitet und überprägt. Es bildete sich in Norddeutschland ein System von pleistozänen Rinnen, die sich tief in die unterlagernden tertiären Schichten einschnitten und später mit

eiszeitlichen Sedimenten wieder aufgefüllt wurden. Tiefreichende Stauchungs- und Rinnestrukturen zeugen auch im Untergrund der Insel Föhr von der Tätigkeit des Eises.

Nachdem die Gletscher der **Saale-Kaltzeit** (330.000 bis 127.000 vor heute) das Land überfahren hatten, ließen sie nach ihrem Abtauen in Nordfriesland die weiträumigen Sandeflächen und Moränengebiete der Naturräume der heutigen Geest zurück. Die Geestkerne der Inseln Amrum, Sylt und Föhr sind die bis heute erhaltenen Reste dieser Landschaft.

Während der **Weichsel-Kaltzeit** (115.000 bis 10.000 vor heute) erreichten die Gletscher nur noch die Bereiche des östlichen Hügellandes (Abbildung 5) und konnten nicht mehr bis in den Nordseeraum vordringen.



Abbildung 5: Verbreitung der Gletscher der Saale- und Weichsel-Vereisungen.
Distribution of glaciers during the Saale and Elster glaciation.

Am Ende der Weichsel-Kaltzeit setzte das Abschmelzen der Eismassen ein, in dessen Folge der Meeresspiegel, der während der Hauptphase der Vereisung mehr als 100 m unter dem heutigen Niveau gelegen hatte, ansteigen begann. Das Meer, das sich bis weit hinter die heutige Doggerbank in der Nordsee zurückgezogen hatte, drang jetzt wieder vor und überflutete die eiszeitlich geprägte, weit nach Westen reichende Geestlandschaft.

Das steigende Meerwasser bewirkte landseitig in den flachen Küstenlandschaften einen Aufstau des Grundwassers, der zu ausgedehnten Moorbildungen führte. Entlang der Küste des ansteigenden Meeres lief landseitig eine Moorzone vorweg, die heute als mehrere Dezimeter mächtige Torfhorizonte unter den darüber abgelagerten Meeressedimenten zu finden ist.

Mit dem Rückschreiten der Küste setzte, entsprechend der vorherrschenden Strömungen, schon vor etwa 5.000 Jahren der Sedimenttransport aus Richtung Norden und Süden entlang der Küste in den inneren Bereich der Deutschen Bucht ein, der dort das etwa 40 km breite Gebiet der Marschen und Watten entstehen ließ.

Sediment aus der Nordsee wird seit dieser Zeit durch die Gezeitenströmungen auch in Richtung Land verfrachtet, wo es sich bei Stillwasser absetzen und anreichern kann. Der Mensch nutzt diesen Effekt schon seit langer Zeit für die Landgewinnung aus. Ab etwa 1.000 n. Chr. wurde damit begonnen, Flächen einzudeichen, um sie gegen Überflutungen zu schützen. Das ursprünglich im Boden vorherrschende Salzwasser wurde durch das Süßwasser aus den Niederschlägen verdrängt, der

hohe Grundwasserstand wurde durch Drainagen abgesenkt, so dass eine landwirtschaftliche Nutzung ermöglicht wurde. Die Entwässerung der Marschen wie auch der auf großen Flächen betriebene Abbau von Torf führten jedoch in weiten Gebieten zu Landsenkungen und begünstigten die späteren Landverluste. Besonders während der Flutkatastrophen der Jahre 1362 und 1634 waren erhebliche Landverluste zu beklagen, die letztendlich zur Abtrennung der Marschflächen vom Festland und zur Entstehung der Halligen und Inseln führten.

Das Watt in Nordfriesland wird heute nach Westen durch die Geestinseln Sylt und Amrum als westliche Barriereinseln begrenzt. Die Wattflächen zwischen den Inseln, den Halligen und dem Festland werden täglich während des Tidehochwassers überflutet.

Von dem ehemaligen Festland erhalten blieben bis heute:

- die drei Geestinseln Sylt, Amrum und Föhr,
- die durch Deiche geschützten Inseln Pellworm und Nordstrand als Reste des alten Marschlandes,
- und die bei Sturmfluten überschwemmten 10 Halligen, die z. T. erst durch Auflandung auf Sockeln des mittelalterlichen Marschlandes hoch wuchsen.

In Abbildung 6 ist der geologische Aufbau der oberflächennahen Schichten der Insel Föhr dargestellt. Etwa 2/5 der Fläche nehmen die beiden Geestkerne im Süden der Insel ein, die überwiegend von Sedimenten der Saale-Kaltzeit aufgebaut werden. Der größere östliche sowie der kleinere westliche Geestkern bestehen aus eiszeitlichen Sanden mit teilweise eingeschaltetem, lehmigen Moränenmaterial der vorletzten Eiszeit, der Saale-Kaltzeit. Lokal sind zudem noch geringmächtige Schmelzwassersande der letzten Eiszeit, der Weichsel-Kaltzeit zu finden.

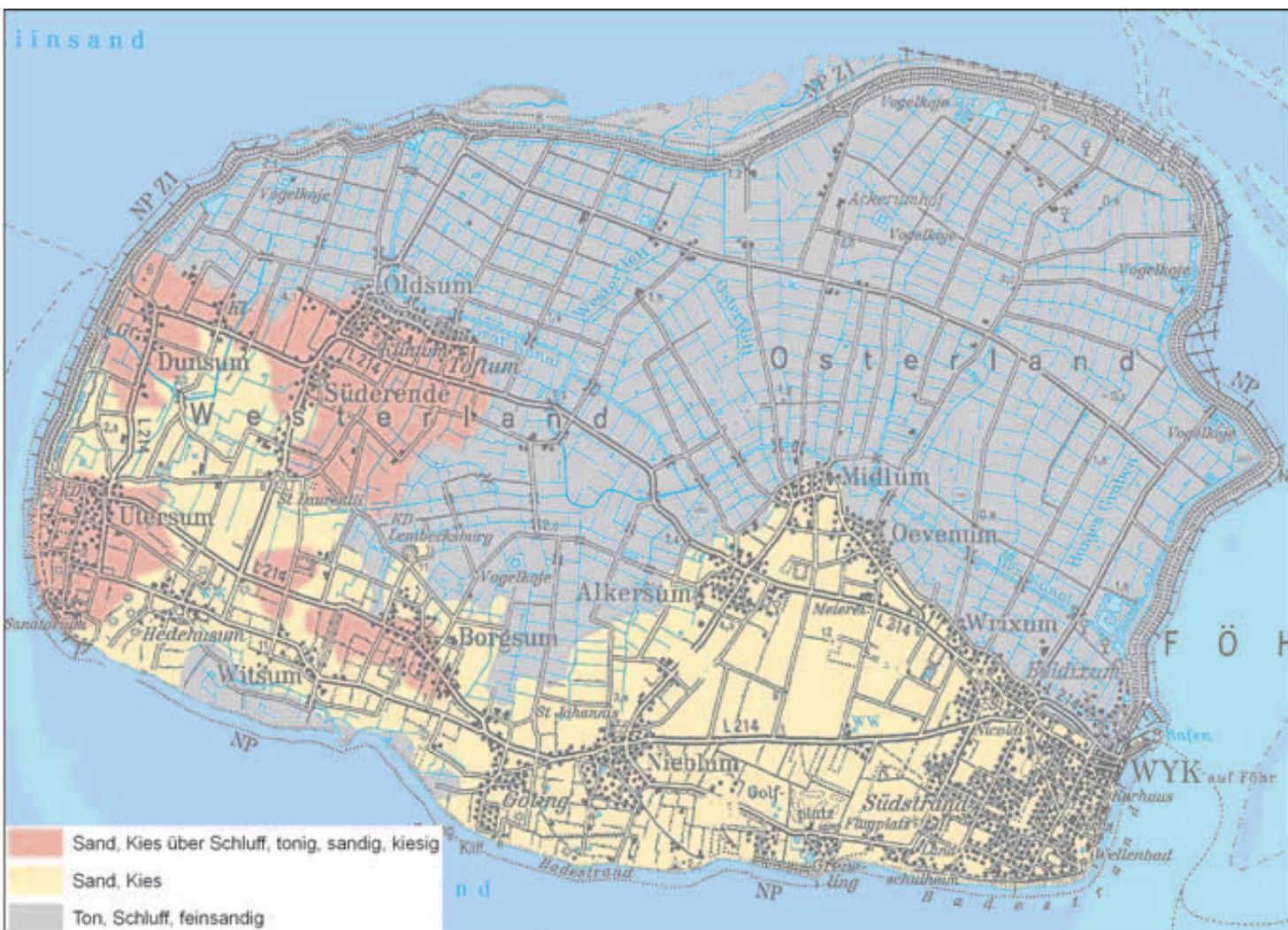


Abbildung 6: Geologische Karte der oberflächennahen Schichten der Insel Föhr (Ausschnitt aus der Geologischen Übersichtskarte 1:200.000), braun, gelb: Geest, blaugrau: Marsch.

Geological map of the near surface layers of Föhr (detail of GÜK 200), brown, yellow: Geest, blue-gray: Marsch.

Die Geestkerne erreichen Geländehöhen von etwas mehr als 10 m ü. NN und zeigen ein flachwelliges Relief (Abbildung 7). Dabei ist das Gelände im östlichen Geestkern durchschnittlich etwas höher und bildet im Raum südwestlich von Oevenum - Wrixum einen größeren, plateauförmigen Bereich oberhalb der 10 m-Höhenlinie. Der westliche Geestkern weist nur zwei kleinere Erhebungen südlich von Hedehusum - Witsum mit Höhen von

mehr als 10 m ü. NN auf. In den Kliffs der Südküste sind die Sedimente der Geestkerne im Profil angeschnitten (Abbildung 8) und geben so einen Einblick in den Aufbau des Untergrundes. Das Kliff bei Goting, in dem gestaute Sande und Geschiebemergel der Saale-Kaltzeit sowie Ablagerungen der Holstein-Warmzeit gefunden werden, wird offiziell als schützenswertes Objekt im Geotopkatalog des Landes geführt (GRUBE 2012).



Abbildung 7: Höhenmodell der Insel Föhr mit Gewässernetz © DGM1, LVerMA-SH.
Terrain model of the Island of Föhr.



Abbildung 8: Am Kliff bei Hedehusum angeschnittene lehmige Sedimente des westlichen Geestkerns mit nacheiszeitlicher Bodendecke.
Cliff at Hedehusum with exposed loamy sediments of the western Geest core with postglacial soil cover.

Die höchste Erhebung der Insel befindet sich mit 12,5 m ü. NN ca. 1 km südlich von Oevenum im Bereich des östlichen Geestkerns. Von den zentralen Bereichen der Geestkerne (Abbildung 9) fällt das Gelände relativ gleichmäßig zu den Marschenniederungen bzw. zur Küste hin bis auf ein Höhengniveau von etwa 2-

3 m ü. NN ab. Die beiden Geestkerne sind in ihren nördlichen und mittleren Bereichen durch die Einbuchtung der Borgsumer Marschbucht voneinander getrennt und werden nur im Gebiet von Goting bis zur Südküste durch einen etwa 1 km breiten Geestrücken miteinander verbunden.



Abbildung 9: Landschaftsbild der Geest mit flachwelligem Relief, Blick auf Witsum.
Gently rolling landscape of the Geest, view to Witsum.

In der Föhler Marsch im Norden sowie in der Godelniederung im Südwesten werden die Geestkerne von holozänen, schluffig-tonigen Weichschichten (Klei) und Wattsanden der Marschen überlagert, die mehr als die Hälfte der Inselfläche einnehmen. In den Marschen

sind die Geländehöhen naturgemäß gering und liegen überwiegend zwischen 0,5 und 1,5 m ü. NN. Die Marsch wird zum Watt hin durch einen Seedeich vor der Überflutung geschützt und über ein ausgedehntes Entwässerungssystem drainiert (Abbildungen 10, 11 und 12).



Abbildung 10: Flache Landschaft der Marsch mit Entwässerungskanal.
Shallow landscape of the Marsch with drainage channel.

Abbildung 11:
Deich mit Schöpfwerk in Dunsum
(Foto: Günter Hilmes).
Dyke with coastal
pumping station at
Dunsum (Foto:
Günter Hilmes).





Abbildung 12: Blick auf den Landesschutzdeich bei Utersum, Blickrichtung NW.
View of the Dyke near Utersum, view direction NW.

Die im Südwesten der Insel gelegene Godelniederung befindet sich ohne Schutzdeich im unmittelbaren Küstenbereich und wird bei Sturmfluten oft von Meerwasser überflutet.

Die Godel ist als einziger Vorfluter auf Föhr gegenüber dem Meer offen und unterliegt dem natürlichen Tideinfluss (Abbildung 13).



Abbildung 13: Niederung der Godel bei Witsum.
Lowland of the Godel near Witsum.

Die Gezeiten mit ihrem täglich zweimal wiederkehrenden Zyklus von Ebbe und Flut haben maßgeblichen Einfluss auf die Natur und Umwelt auf der Insel und im Wattenmeer (Abbildung 14). In dem Luftbild (Abbildung 15) sind die ausgedehnten, bei Ebbe trocken gefallenen Wattflächen zu erkennen, die die Insel umgeben. Durch zahlreiche Priele und See-

gatts, die das Watt durchziehen, strömt das Wasser der Nordsee bei Flut wieder zurück. Der mittlere Tidenhub in Wyk beträgt dabei 2,8 m. Das auf- und ablaufende Wasser der Tide führt große Mengen Sediment mit sich und verursacht dadurch eine stetige Verlagerung der Sedimentverteilung im Wattenmeer.

Abbildung 14:
Küste bei Hedehusum bei Ebbe.
Coast line near Hedehusum at low tide.



Abbildung 15: Luftbild der Insel mit Wattflächen, Priele und Seegatts.

Airphoto of the island with tidal flat areas and tidal channels. (DOP 40 c © GeoBasis – DE/LVermGeo SH).

3 Werkzeuge der Hydrogeologie

➤ **Broder Nommensen, Bernd König, Reinhard Kirsch, Frank Steinmann**

„Vor der Hacke ist es duster“, lautet ein altes bergmännisches Sprichwort. Übertragen gilt dies für alle Untersuchungen im Untergrund. Während beispielsweise biologische Phänomene im Gelände studiert werden können, ist eine unmittelbare Beobachtung der geologischen Lagerungsverhältnisse sowie der im Gesteinsgerüst ablaufenden hydraulischen und hydrochemischen Prozesse nicht möglich. Hierfür stehen hauptsächlich indirekte Verfahren wie geophysikalische Messungen oder Pumptests zur Verfügung. Direkte, jedoch nur eng standortbezogene und in der Regel physikalisch gestörte „Einblicke“ gewähren Bohrungen oder Untersuchungen an Brunnen und Grundwassermessstellen. Mit Hilfe von Interpolationsverfahren oder mathematisch-numerischen Modellen können Zusammenhänge herausgearbeitet und verdeutlicht werden.

3.1 Bohrungen

Grundvoraussetzung für das Verständnis der unter der Geländeoberfläche ablaufenden hydraulischen und hydrochemischen Vorgänge ist eine möglichst detaillierte Kenntnis über die Verbreitung, die Tiefenlage und die Eigenschaften der im Untergrund anstehenden Gesteine (auch lockerer Sand und Ton werden in Norddeutschland als Gestein bezeichnet). Im Zusammenhang mit der Wassergewinnung auf Föhr sind quartäre und tertiäre Sedimente im Tiefenbereich bis etwa 150 Meter von Bedeutung. Verbreitet sind dort in unregelmäßiger Wechselfolge überwiegend Sande, Tone und Geschiebemergel sowie in der Marsch der sogenannte „Klei“.

Sand ist durch Verwitterung oder Zertrümmerung von Festgestein entstanden, er besteht zum größten Teil aus Quarzkörnern. Zwischen den Sandkörnern ist reichlich Platz für Luft oder Wasser, der Hohlraumanteil wird als Porosität bezeichnet. Je nach Korngröße und Sortierungsgrad des Sandes beträgt die Porosität etwa 20 bis 30 % (Abbildung 16). Für die Wasserversorgung ist Sand als **Grundwasserleiter** interessant, da das Porenwasser beweglich ist und abgepumpt werden kann.

Ton ist ebenfalls ein Verwitterungsprodukt und aus Feldspäten entstanden, die mit Quarz und Glimmer den skandinavischen Granit bilden. Tonminerale sind plattig und viel kleiner als Sandkörner. Die Oberfläche der Tonminerale ist elektrisch geladen und kann Wassermoleküle

elektrostatisch binden. In den sehr kleinen Poren bilden sich zudem hohe Kapillarkräfte aus. Ton besitzt Porositäten von 30 bis über 50 % und damit höhere Wassergehalte als Sand, das Porenwasser ist aber nicht frei beweglich. Ton ist daher ein **Grundwassergeringleiter**.

Schluff nimmt hinsichtlich seiner Korngröße und Porengrößenverteilung eine Übergangsstellung zwischen Sand und Ton ein. Sein Mineralbestand setzt sich hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten und einem charakteristischen Glimmeranteil zusammen. In reinen Schluffen ist das Porenwasser wie beim Ton kaum frei beweglich. Auch Schluffe sind daher Grundwassergeringleiter.

Geschiebemergel zeichnet sich durch ein breites Korngrößenpektrum vom kleinsten Tonpartikel bis zu großen Steinen aus, häufig sind Kreidebröckchen zu erkennen. Es handelt sich um die von den eiszeitlichen Gletschern

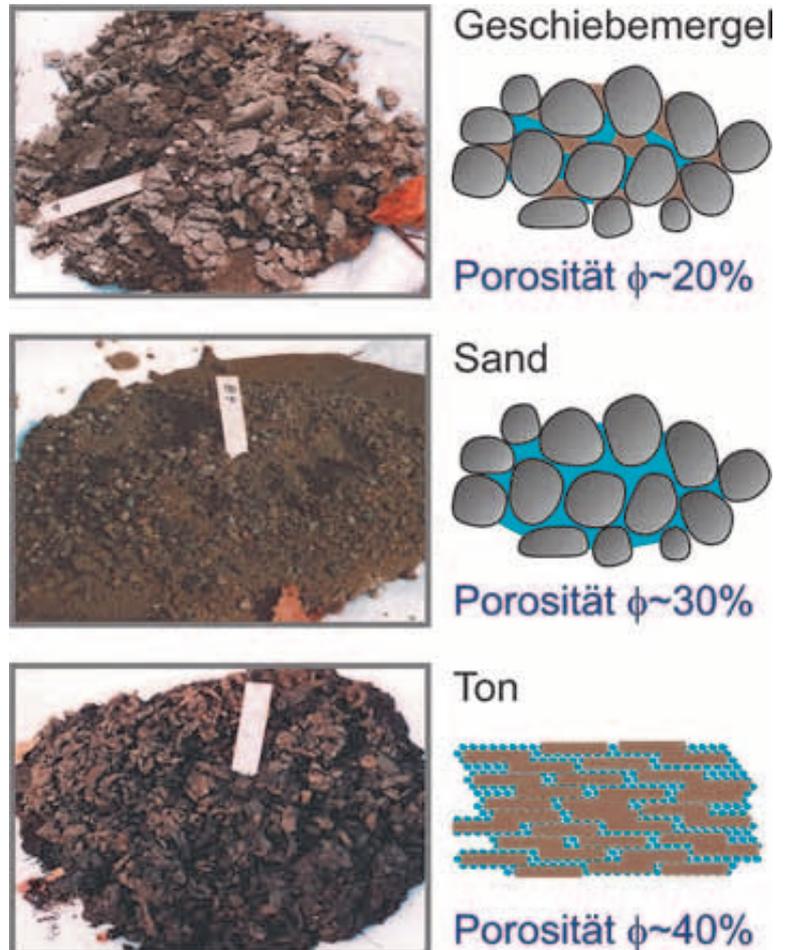


Abbildung 16: Struktur des Porenraums von Geschiebemergel, Sand und Ton. Pore space structure of sand, till, and clay.

auf dem Weg von Skandinavien zu uns „abgehobelten“ Gesteine, die nach dem Abschmelzen der Gletscher als sog. Grund- und Endmoränen zurückblieben. Da sich die kleinen Sedimentpartikel in die Zwickel der größeren Körner eingelagert haben ist die Gesamtporosität meist gering und die Wasserwegsamkeit schlecht.

Klei besteht aus Feinsand, Schluff und Ton in wechselnden Mengenverhältnissen. Er ist als Hochwassersediment im Bereich der Vorländerereien entstanden und oft mit feinsandigen Watablagerungen sowie mit Torfen verzahnt. Auch Klei weist überwiegend geringe Wasserwegsamkeiten auf.

Punktuelle Informationen über den Schichtaufbau liefern **Bohrungen**, bei denen Proben der durchbohrten Gesteine möglichst tiefengenaue entnommen und analysiert werden. Die meisten Bohrungen werden heute im so genannten **Spülbohrverfahren** durchgeführt (Abbildung 17). Dabei wird durch den Andruck

und die Drehbewegung des am Bohrgestänge hängenden Bohrmeißels das Gestein zunächst aufgelockert. Anschließend wird das zerkleinerte Bohrgut durch den Auftrieb einer im ständigen Umlauf gehaltenen, am Bohrmeißel austretenden Spülflüssigkeit (sauberes Wasser mit Zusatz von Tonmineralien und lebensmittelgeeigneten(!) Cellulose-Produkten) an die Erdoberfläche transportiert. Gleichzeitig wird das unverrohrte Bohrloch durch die Spülungsbestandteile stabilisiert. Das Spülbohrverfahren ist bis einige hundert Meter Tiefe einsetzbar und relativ preisgünstig, hat aber den Nachteil, dass die Proben – abhängig von der Form und dem spezifischen Gewicht – während des Aufstiegs im Bohrloch teilweise durchmischt werden können. Dadurch entsprechen die Bohrproben in ihrer Zusammensetzung nicht immer exakt dem durchbohrten Gestein. Auch ist eine tiefengerechte Zuordnung der Bohrproben nicht immer gegeben. In der Regel repräsentiert jede ausgelegte Probe eine Bohrstrecke von 3 Metern (Abbildung 18).

Abbildung 17:
Bohrung (Spülbohrverfahren), Bohrgestänge.

Hydraulic-circulation drilling with drill rig.





Abbildung 18:
Bohrproben aus ei-
ner Spülbohrung.
Drilling samples
from a hydraulic
circulation drilling.

Zur Präzisierung der Bohrdaten wird daher standardmäßig im offenen Bohrloch eine **geophysikalische Bohrlochmessung** (Fachbegriff „Log“) durchgeführt, mit deren Hilfe exakte Informationen zur Lage der Schichtgrenzen, zur Gesteinszusammensetzung sowie zu einer eventuellen Versalzung des Grundwassers ermittelt werden können (siehe Abbildung 19, nähere Erläuterung der Messverfahren im Kapitel 3.2). Die ausgelegten Bohrproben werden nach Möglichkeit direkt auf der Bohrstelle vom Geologen bestimmt,

mit den geophysikalischen Parametern abgeglichen und entstehungsgeschichtlich (stratigrafisch) eingestuft. Dieser detaillierte Bohrbe- fund wird horizontweise nach einem festge- legten „Symbolschlüssel Geologie“ (LBEG 2010) digital erfasst, er kann mit Hilfe des EDV-Programms GeODin in Datenbanken abgelegt und normgerecht grafisch umgesetzt werden. Abbildung 19 zeigt ein tabellarisches Schichtenverzeichnis, das hieraus entwickelte Säulenprofil sowie geophysikalische Logs aus dieser Bohrung.

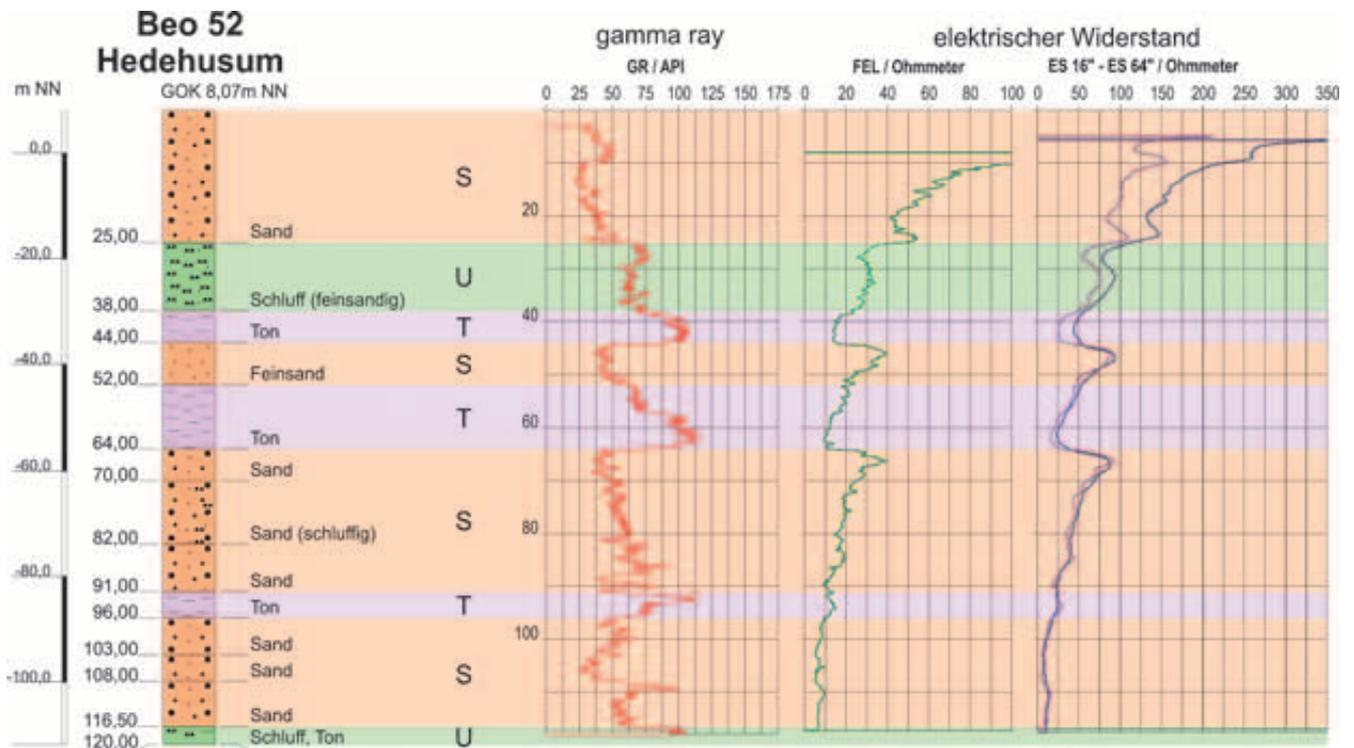


Abbildung 19: Interpretiertes Schichtenverzeichnis mit Diagrammen der geophysikalischen Bohrlochmessung einer Bohrung zum Bau einer Grundwassermessstelle, von links nach rechts: Bohrergebnis, Gamma-Log, FEL-Log, kleine (rot) und große (blau) Normale (ES). Layer sequence with geophysical logging results of a drilling for a groundwater observation well, from left: gamma log, FEL, ES 16" (red) and ES 64" (blue).

Der Bau von Trinkwasserbrunnen geschieht im technisch aufwändigen Saug- oder Lufthebebohrverfahren und Bohrdurchmessern bis 1.000 Millimeter. Da große Sedimentmengen bewegt werden müssen, wird das Probengut über ein großkalibriges Bohrgestänge mit Hilfe von Mammutpumpen oder eingblasener Druckluft aus der Tiefe nach oben befördert.

Abhängig von der Zielsetzung kamen auf Föhr auch andere Bohrverfahren zum Einsatz: So wurde der oberflächennahe Untergrund bis etwa 20 Meter Tiefe mittels Rammkernsondierungen (Abbildung 20) untersucht. Dieses Verfahren ist mit tragbarem Gerät einfach durchführbar und ermöglicht eine tiefenge-naue Probenansprache.



Abbildung 20: Rammkernsondierung. Ramming core sounding.

3.2 Geophysikalische Bohrlochvermessung

Die geophysikalische Bohrlochvermessung ist ein Werkzeug zur verbesserten Ansprache und Charakterisierung der erbohrten Schichten. Mit einer Messsonde, die an einem Kabel in die Bohrung eingeführt wird (Abbildung 21), werden die physikalischen Eigenschaften des Gesteins oder Sediments im Umfeld der Bohrung gemessen. Die Messverfahren entsprechen

im Grundsatz den in Kapitel 4 vorgestellten geophysikalischen Messungen. Bei Grundwasserbohrungen, wie sie auf Föhr zur Sicherstellung der Wasserversorgung durchgeführt worden sind, werden im Regelfall die natürliche Gammastrahlung sowie der elektrische Widerstand des Sediments mit Bohrlochsonden gemessen.

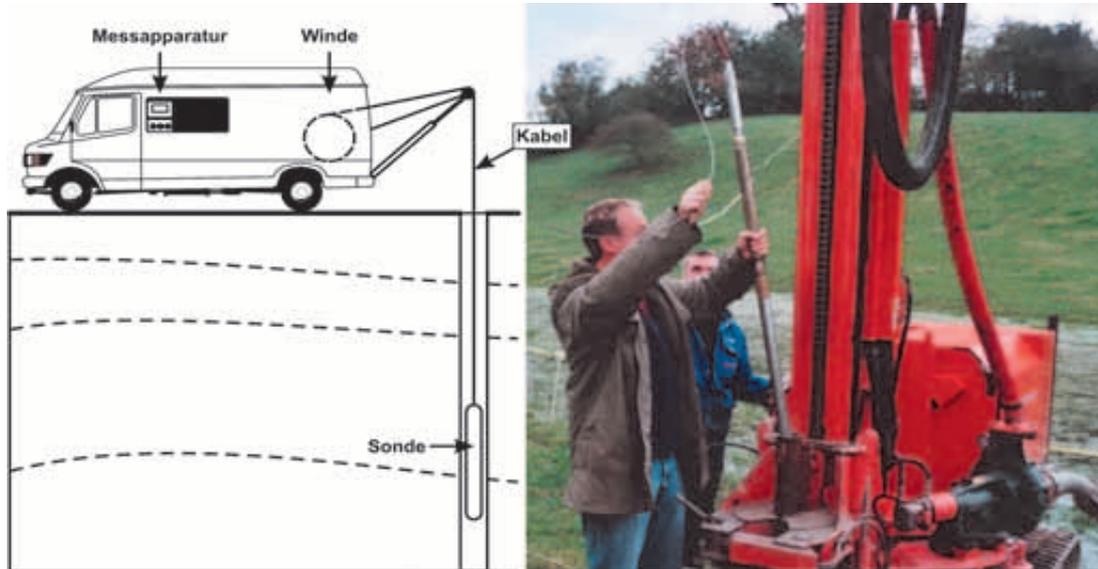


Abbildung 21: Prinzip einer geophysikalischen Bohrlochvermessung (nach ZSCHERPE & STEINBRECHER 1997).
Principle of borehole logging (after ZSCHERPE & STEINBRECHER 1997).

Messung der natürlichen Gammastrahlung, γ -Log

Radioaktive Elemente sind in fast jedem Gestein vorhanden. Insbesondere tonhaltige Materialien enthalten Kalium, Argon und Uran, die zu einer geringen und gesundheitlich unschädlichen, aber messbaren Gammastrahlung führen. Tonhaltige Sedimente - wie zum Beispiel

Geschiebemergel - weisen daher eine höhere Gammastrahlung auf als reine Sande. Die Messung der Gammastrahlung erfolgt durch einen Szintillationsdetektor in einer Bohrlochsonde (Abbildung 22).

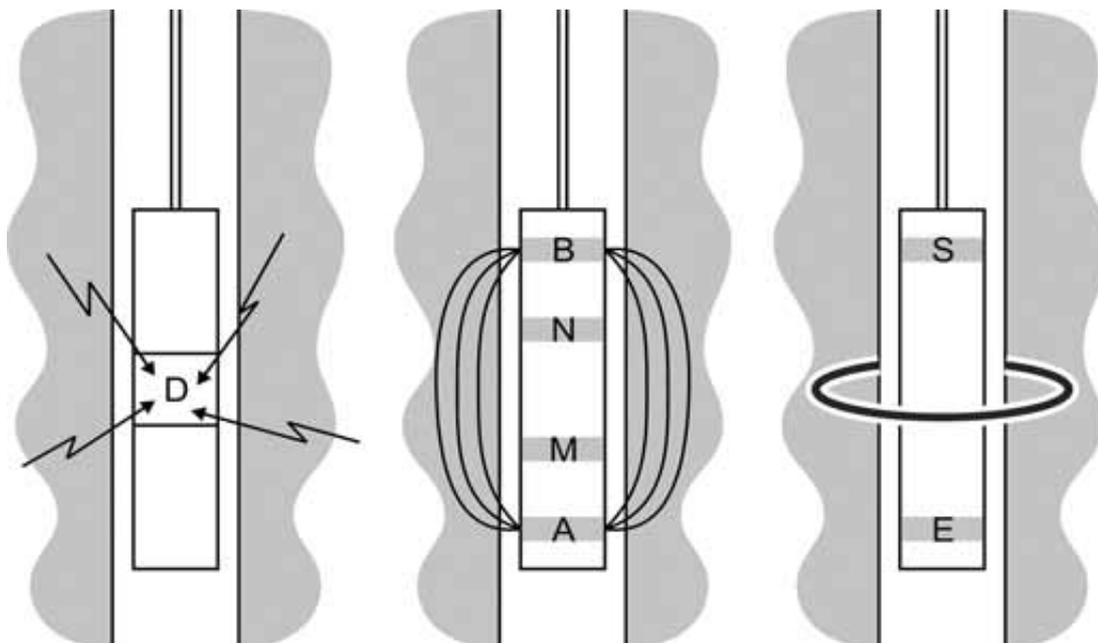


Abbildung 22: Schematische Darstellung geophysikalischer Bohrlochsonden, links: Gamma-Sonde (D = Detektor), Mitte: Widerstandssonde (A, B = Elektroden zur Strominjektion, M, N = Elektroden zur Spannungsmessung), rechts: Induktionslog.

Sketch of geophysical borehole equipment, left: gamma probe (D = detector), center: resistivity probe (A, B = electrodes for current injection, M, N = electrodes for voltage measurement), right: induction probe.

Messung des spezifischen elektrischen Widerstands

Der spezifische elektrische Widerstand des Sediments wird bestimmt durch das Porenvolumen, den spezifischen elektrischen Widerstand der Mineralkörner und den spezifischen elektrischen Widerstand des Porenwassers. Süßwassergesättigte Sande haben, je nach Korngrößenzusammensetzung, spezifische elektrische Widerstände im Bereich von 80 – 200 Ohmmeter. Die spezifischen elektrischen Widerstände von Ton, Schluff und Geschiebemergel sowie von salzwassergesättigten Sanden sind erheblich geringer (siehe Kapitel 4).

Zur Messung des spezifischen elektrischen Widerstands im Bohrloch wird von der Sonde durch 2 Elektroden ein Strom in den Untergrund eingespeist und die Spannung, die bei Stromfluss entsteht, mit einem weiteren Elektrodenpaar gemessen (Abbildung 22). Daraus kann der spezifische elektrische Widerstand des Gesteins berechnet werden. Bei der Messung fließt allerdings ein Teil des Stroms durch die Bohrspülung, die normalerweise einen geringeren spezifischen elektrischen Widerstand als das Gestein hat. Wird der Abstand der Elektroden zur Stromeinspeisung vergrößert, dann erhöht sich der Anteil des Stroms, der durch das Gestein fließt. Allerdings wird dadurch die Erkennbarkeit dünnerer Schichten im Untergrund schlechter. Daher wird meistens mit 2 Elektrodenabständen gearbeitet. Die jeweiligen Sonden heißen „kleine“ und „große Normale“ (ES16“ und ES64“, die Elektrodenabstände sind in Zoll angegeben). Das Eindringvermögen liegt im Zentimeter- bis Dezimeterbereich. Sollen dünnere Schichten im Untergrund erkannt werden, arbeitet man mit einer Sonde, bei der der Stromfluss radial von der Sonde in das Gestein verläuft. Eine derartige Elektrodenanordnung wird als fokussierte Anordnung (FEL) bezeichnet.

Messungen des spezifischen elektrischen Widerstands sind auch in einer ausgebauten Bohrung möglich. Da das Kunststoffrohr als Isolierung wirkt, kann hier kein Strom fließen. Deshalb arbeitet man mit Induktionslogs, bei denen durch ein oszillierendes elektromagnetisches Feld Wirbelströme im Gestein induziert werden (siehe Kapitel 4). In einem Metallrohr sind derartige Messungen allerdings nicht möglich.

Geophysikalische Bohrlochvermessung in der Praxis

Ein Beispiel einer geophysikalischen Bohrlochvermessung ist bereits in Abbildung 19 gezeigt. Die Intensität der natürlichen Gammastrahlung wird in der Einheit API (American Petroleum Institute) angegeben, der spezifische elektrische Widerstand in Ohmmeter. In der Abbildung sind links die erbohrten Schichten dargestellt, wie sie aus dem Bohrklein abgeleitet wurden. Es ergibt sich eine Wechselagerung von Sand, Ton und Schluff. Die 3 Widerstandslogs (FEL, ES 16“, ES 64“) zeigen den gleichen Verlauf, dabei ist der mit der großen Normale ermittelte spezifische elektrische Widerstand jeweils höher als beim FEL und der kleinen Normalen, weil hier der Einfluss der Bohrspülung am niedrigsten ist. Der Verlauf des Gamma-Logs ist im Wesentlichen entgegengesetzt zum Verlauf des Widerstandslogs. Tonhaltige Schichten zeichnen sich durch hohe Gamma-Aktivität und geringe spezifische elektrische Widerstände aus, bei sandigen Schichten ist es umgekehrt. Innerhalb der Schichten ist eine Feingliederung erkennbar. Beispielsweise nimmt in der Tonlage im Tiefenbereich von 52 – 64 m die Gamma-Aktivität mit der Tiefe zu und der spezifische elektrische Widerstand nimmt ab. Daraus kann geschlossen werden, dass innerhalb dieser Schicht der Tongehalt von oben nach unten zunimmt. In der unteren Sandlage (96 – 116 m) ist teilweise niedrige Gamma-Aktivität erkennbar, aber der spezifische elektrische Widerstand ist ebenfalls gering. Hier macht sich der Einfluss der Grundwasserversalzung mit sehr geringen spezifischen elektrischen Widerständen des salzigen Porenwassers bemerkbar.

3.3 Messstellen, Brunnen

Zur Messung und Überwachung der Grundwasserbewegung und zur Entnahme von Wasserproben werden Probebrunnen mit geringem Durchmesser, so genannte Grundwassermessstellen (Abbildung 23) eingerichtet. Auf Föhr werden im Rahmen eines umfassenden Monitorings laufend Daten aus 63 Grundwassermessstellen erhoben (Kapitel 6.5).



Abbildung 23:
Grundwassermess-
stelle Beo 57 Föhr-
West.
Observation well
Beo 57 Föhr-West.

Sichtbarer Teil der Grundwassermessstellen ist das Kopfbauwerk, ein in einem Betonfundament verankertes Stahlrohr (Abbildungen 23 und 24), das bis zu einem Meter aus dem Boden herausragt und als oberen Abschluss eine sicher verschließbare Klappe trägt. Das Hauptbauwerk befindet sich im zuvor erstellten Bohrloch im Untergrund: Es besteht aus einem im Durchmesser zwischen 50 und 115 Millimeter dicken Kunststoff-Hohlrohrstrang, der durch Abstandshalter im Bohrloch zentriert und aus mehreren Teilstücken zusammengesetzt ist, die durch Doppelmuffen wasserdicht miteinander verbunden sind. Im Bereich der Schicht, aus der Wasserstandsdaten erhoben oder Wasserproben entnommen werden sollen, wird ein mit feinen Schlitz versehenes Filterrohr eingebaut, in das Grundwasser eindringen kann. Es steigt im Rohrstrang entsprechend dem hydrostatischen Druck auf. Die natürlichen und durch Grundwasserentnahmen verursachten Schwankungen des Grundwasserstandes können durch Handmessungen oder automatische Datensammler („Logger“) gemessen werden (siehe Kapitel 3.5).

Ein sehr wichtiger Bauwerksteil ist die Verfüllung des so genannten Bohrungs-Ringraumes, also des Hohlraumes zwischen der Bohrlochwand und dem eingebauten Kunststoffrohr. Zunächst wird im Bereich des Filters ein spezieller Filterkies eingebracht, der einen gleichmäßigen Wasserzustrom und die Rückhaltung feinkörniger Bestandteile des natürlich anstehenden Gesteins gewährleisten soll. Oberhalb des Filters muss der Ringraum wieder so abgedichtet werden, wie es dem natürlichen Schichtaufbau entspricht, d.h. durchbohrte tonige Schichten müssen wieder mit gering wasserdurchlässigem Material verfüllt werden. Andernfalls können Wasserwegsamkeiten entstehen, die zu einer raschen Zusicke- rung von eventuell belastetem Oberflächen- wasser in das für die Trinkwassergewinnung genutzte Grundwasserstockwerk führen. Eine wirksame Ringraumabdichtung wird durch die Einschüttung quellfähiger Tonpellets oder – heute meistens praktiziert – durch das Ein- pressen eines Ton-Zement-Gemisches in den Ringraum erreicht.

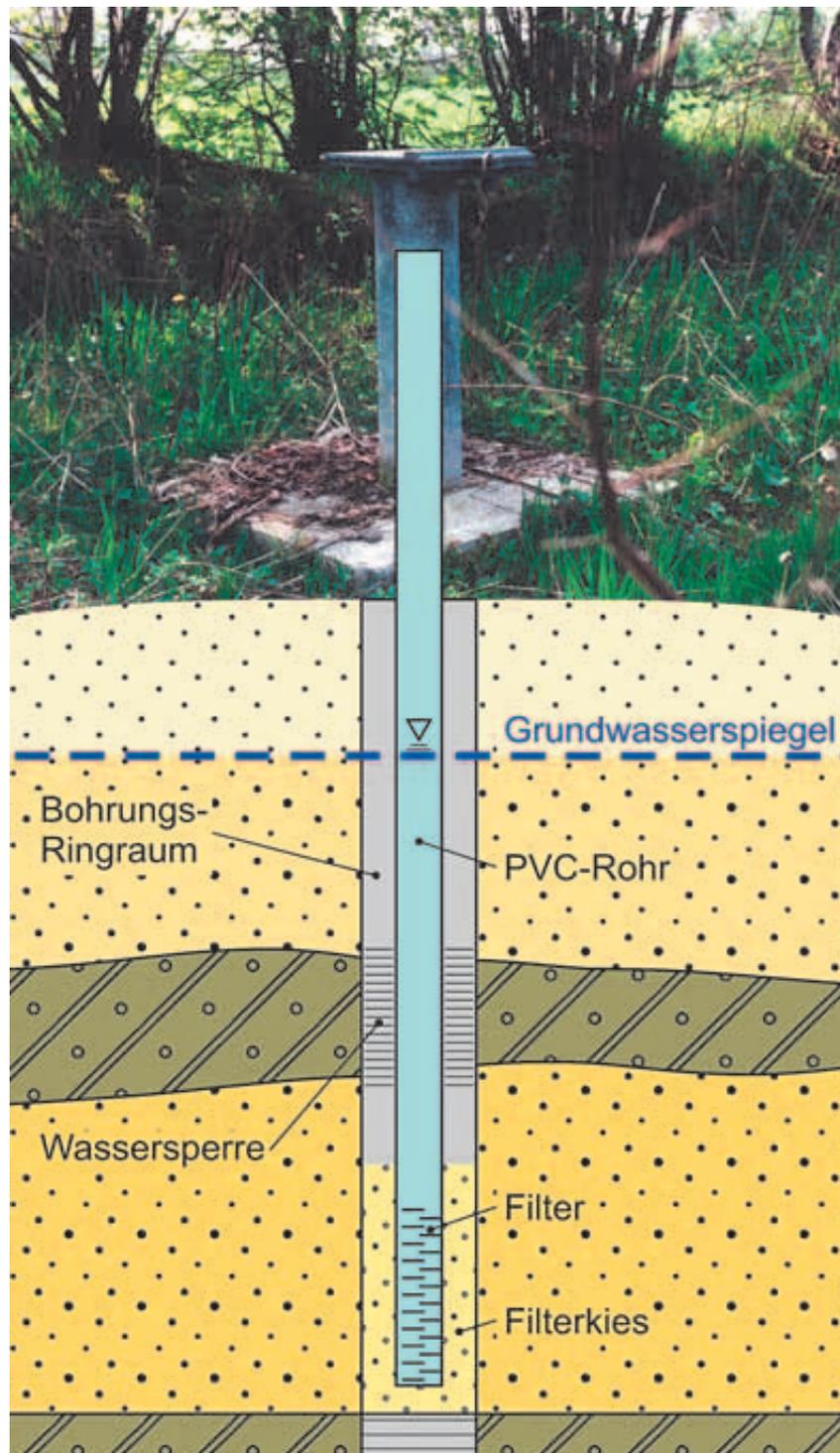


Abbildung 24: Prinzipskizze Messstellenausbau.
Construction of an observation well (schematic).

Brunnen zur Trinkwasserförderung sind nach dem gleichen Prinzip wie Grundwassermessstellen ausgebaut, allerdings mit deutlich größerem Durchmesser von meist etwa 250 bis 600 Millimeter (Abbildung 25). Dadurch wird eine große Eintrittsfläche für das Grundwasser erreicht. Der Filterkies wird oft in abgestuften Lagen eingebracht, um ein gleichmäßiges (laminares) Anströmen des Brunnenfilters und einen wirksamen Rückhalt des Feinkorns aus dem anstehenden Gestein sicherzustellen.

Im wassererfüllten Aufsatzrohr oberhalb des Filters ist eine elektrische Unterwasserpumpe fest installiert, deren Leistung bis über

100 m³/ Stunde betragen kann. Das geförderte „Rohwasser“ wird über eine Rohrleitung in das Wasserwerk transportiert und dort aufbereitet (siehe Kapitel 6.3). In dem an der Erdoberfläche sichtbaren, meist begehbaren Brunnen schacht (Abbildung 25) sind die aufwändige elektronische Pumpensteuerung sowie diverse Armaturen und Messeinrichtungen untergebracht. Die hügelartige Anschließung des Brunnen schachtes dient dem Schutz des Brunnen schachtes und verhindert ein Zu laufen von Oberflächenwasser (Abbildung 26). Gegen unbefugtes Betreten sind alle Trinkwasserbrunnen eingezäunt (Schutzzone I, siehe Kapitel 6.4).

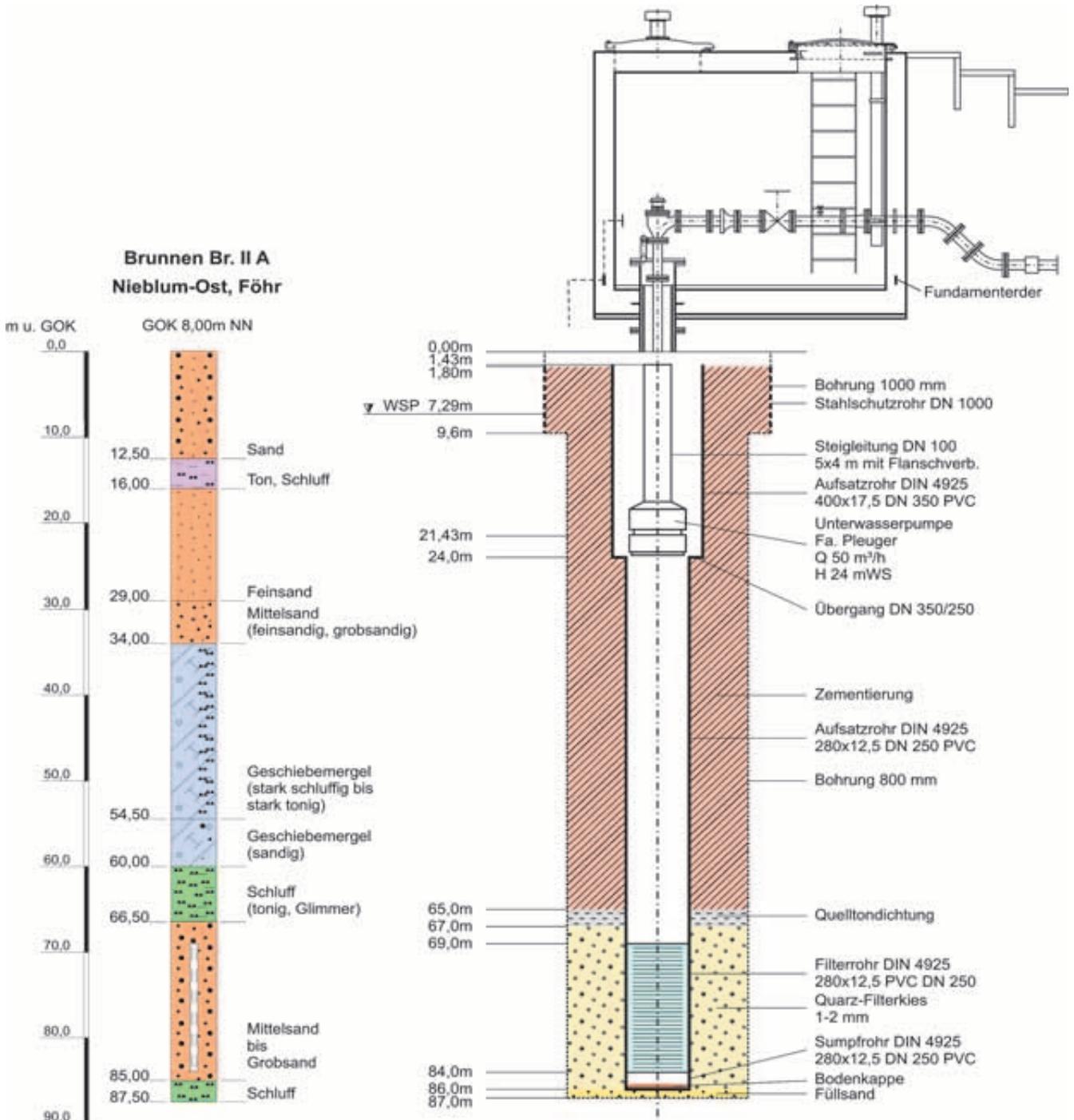


Abbildung 25: Ausbau des Förderbrunnens Br. II A, Wasserwerk Föhr-Ost.
Well design of production well Br. II A water works Föhr-Ost

Abbildung 26:
Brunnen Br. VI,
Wasserwerk Föhr-
West.
Well Br. VI, water
works Föhr-West.



3.4 Hydrogeologische Schnitte und Modelle

Ziel geologischer Untersuchungen ist es, aus Punktinformationen eine räumliche Vorstellung vom Aufbau des Untergrundes zu entwickeln. Nach klassischer grafischer Methode werden zu diesem Zweck mehrere Säulenprofile von Bohrungen (siehe Kapitel 3.1) in maßstäblich korrektem Abstand und in korrekter topografischer Höhe aneinandergereiht. Durch eine Generalisierung und Korrelation der in den Profilsäulen dargestellten Einzelschichten zu Schichtkomplexen mit gleichen Eigenschaften lassen sich geologische Leithorizonte ableiten und zu linienförmigen Elementen, geologischen Profilschnitten, verbinden. Voraussetzung für eine sachgerechte Verknüpfung zusammenhängender Leithorizonte – beispielsweise durchhaltende Lagen aus Geschiebemergel oder in den Urstromtälern der eiszeitlichen Gletscher abgelagerte Sandschüttungen – sind fundierte Kenntnisse der Bildungsbedingungen geologischer Schichtkörper.

Der besseren Veranschaulichung der geologischen Zusammenhänge dient schließlich eine grafische Ausgestaltung des Profilschnittes (Abbildung 27) sowie eine relative Überhöhung der horizontalen Schnittachse; häufige Maßstäbe liegen bei 1:1.000 in der Höhe und 1:25.000 in der Länge. Durch die Vernetzung mehrerer linearer Schnitte kann - für das geübte Auge - ein annähernd perspektivisches Blockbild konstruiert werden.

In den letzten Jahren haben Industrie und Universitäten zukunftsweisende Computerprogramme zur geologischen 3-D-Modellierung von Rohstoff-Lagerstätten entwickelt. Diese sehr komplexen und teuren Programme erfordern ein hohes Expertenwissen sowie besonders leistungsstarke Rechner, finden aber, parallel zum Aufbau landesweiter Bohrungs- und Flächendatenbanken, mittlerweile auch im Rahmen der Aufgaben der geologischen Landesdienste zunehmend Anwendung. In Pilot-Projekten, wie dem CLIWAT-Projekt auf der Insel Föhr, wurde mit Hilfe des Programms Gocad® aus Bohrungs- und Flächendaten ein mathematisch widerspruchsfreies geologisches Raummodell erzeugt (vergleiche Kapitel 5). Es ermöglicht erstmalig eine echte 3-D-Visualisierung des geologischen Schichtaufbaues und damit einen wesentlichen Kenntnisszuwachs im Hinblick auf die räumliche Verteilung der Grundwasserleiter und Deckschichten einschließlich ihrer gesteinspezifischen Eigenschaften. Das Geologische 3-D-Modell ist die geometrische und parameterbezogene Grundlage für ein mathematisch-numerisches Grundwassermodell (in das Grundwassermodell gehen noch zahlreiche andere Messgrößen ein, vergleiche Kapitel 6), in dem die aktuelle Grundwasserbewegung auf der Insel nachgebildet und Prognoserechnungen zur künftigen Entwicklung der Grundwasserstände durchgeführt werden.

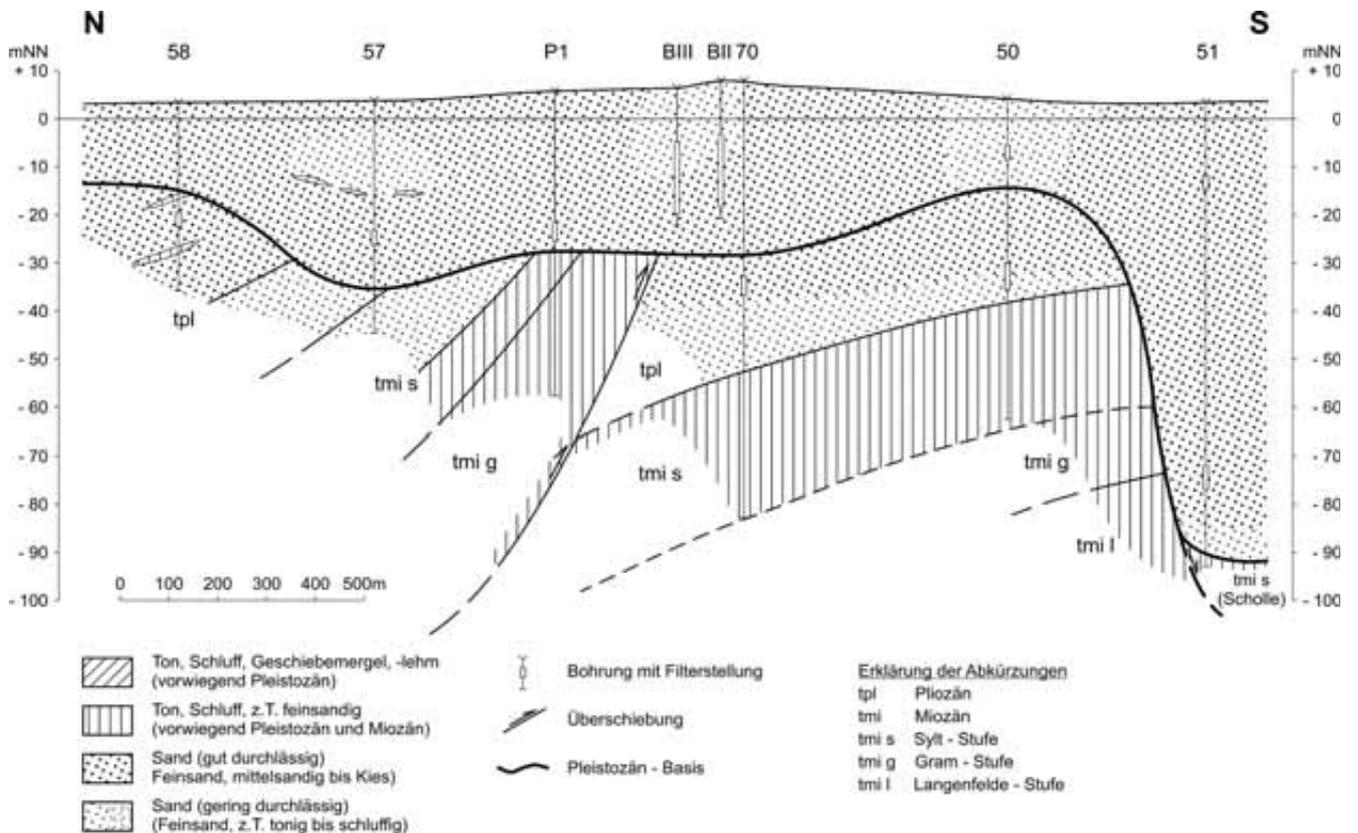


Abbildung 27: Hydrogeologischer Schnitt durch mehrere Aufschlussbohrungen (nach GLA 1991).
Hydrogeological cross section based on several exploration drillings (after GLA 1991).

3.5 Ermittlung von Grundwassereinzugsgebieten

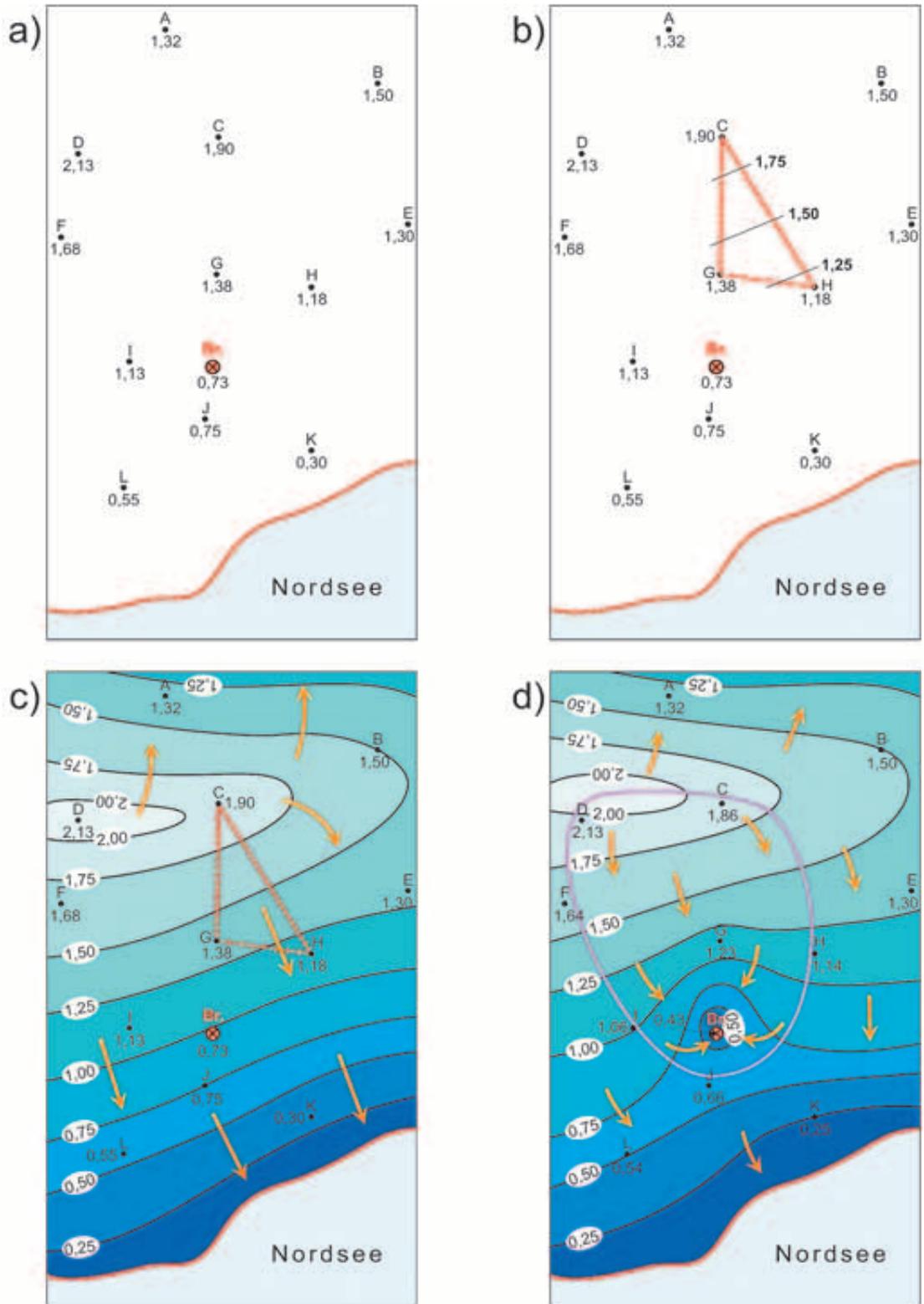
Das Grundwasser der Insel Föhr wird hauptsächlich im Bereich der Geestkerne, wo an der Erdoberfläche und im Untergrund sandige Substrate vorherrschen, neu gebildet. Hier versickert ein Teil des Wassers, das als Niederschlagswasser auf die Erdoberfläche gelangt, in den Boden und bewegt sich unter dem Einfluss der Schwerkraft nach unten in tiefere Schichten. Als Sickerwasser erfüllt es die Porenräume im Boden und in der wasserungesättigten Zone oberhalb des Grundwasserspiegels nur teilweise und unregelmäßig. Mit dem Auftreffen auf die Grundwasseroberfläche wird das Sickerwasser zu Grundwasser und erfüllt die Porenräume im Untergrund vollständig.

Auch das Grundwasser unterliegt einer ständigen Bewegung, die entsteht, wenn das Energiepotenzial des Wassers an verschiedenen Punkten des Grundwasserleiters unterschiedlich ist. So strömt das Grundwasser auf der Insel Föhr von den Hochlagen der Geestkerne generell zu den tiefer gelegenen Randbereichen oder zu den Förderbrunnen hin ab. Bei einheitlicher Dichte des Wassers unterscheiden sich die Energiepotenziale im Grundwasserleiter allein anhand der Druckhöhe des Grundwasserspiegels, der auf ein einheitliches

Niveau bezogen wird (i. d. R. Normalnull). Bei Grundwasserleitern mit einer unbedeckten Grundwasseroberfläche entspricht der Grundwasserspiegel der Höhenlage der Grundwasseroberfläche (freier Grundwasserleiter). Wird der Grundwasserleiter nach oben durch schlecht wasserdurchlässige Schichten begrenzt, so kann der Druckspiegel des Grundwassers durchaus oberhalb der Grenzfläche zwischen dem Grundwasserleiter und der Deckschicht liegen (gespannter Grundwasserleiter).

Zur Bestimmung der Grundwasserspiegelhöhe sind Brunnen oder Grundwassermessstellen erforderlich. Im Standrohr stellt sich der Grundwasserstand entsprechend dem Niveau der freien Grundwasseroberfläche bzw. entsprechend dem Druckspiegel des gespannten Grundwasserleiters ein. Durch die Messung des Grundwasserspiegels an mehreren Grundwassermessstellen eines Grundwasserleiters lässt sich ein räumliches Abbild der Grundwasserspiegelhöhe erarbeiten. In Abbildung 28 ist schematisch dargestellt, wie aus den Punktmessungen an einzelnen Grundwassermessstellen durch Interpolation **Grundwassergleichenpläne** erarbeitet werden können.

Abbildung 28:
 Vorgehensweise bei der Konstruktion von Grundwassergleichenplänen:
 a) Förderbrunnen mit Grundwassermessnetz und Grundwasserspiegelhöhen, b) Konstruktion eines hydrologischen Dreiecks aus drei Messstellen, c) Grundwassergleichenplan für den Zustand ohne Grundwasserentnahme, d) Grundwassergleichenplan mit Brunneneinzugsgebiet bei Grundwasserförderung.



Voraussetzung für die Erstellung von Grundwassergleichenplänen ist ein Netz von Grundwassermessstellen in genügender Anzahl und in guter räumlicher Verteilung, wie es heute in den beiden Geestkernen der Insel Föhr besteht (siehe auch Kapitel 5). Abbildung 28a zeigt ein solches Messnetz, das sich in einem küstennahen Landschaftsausschnitt um einen Förderbrunnen (Br.) erstreckt. An den Grundwassermessstellen (A - K) ist jeweils die

Grundwasserspiegelhöhe in Metern über Normalnull (m ü. NN) angegeben. Da die Höhe des Grundwasserspiegels fast immer Schwankungen unterliegt, müssen die Messwerte zur Erstellung eines Grundwassergleichenplans in der Regel an allen Grundwassermessstellen gleichzeitig oder in möglichst kurzem zeitlichen Abstand zueinander erhoben werden (Stichtagsmessung).

Aus den punktuellen Messwerten lassen sich mit Hilfe von Interpolationsverfahren Linien gleicher Grundwasserspiegelhöhe, die Grundwassergleichen, konstruieren. Im einfachsten Fall erfolgt die Konstruktion anhand von drei Beobachtungspunkten durch eine einfache, lineare Interpolation (hydrologisches Dreieck). Abbildung 28b verdeutlicht die Vorgehensweise am Beispiel des Dreiecks aus den Messstellen C, G und H. Jeweils zwei Messstellen werden zunächst durch eine Hilfslinie miteinander verbunden und die Strecke zwischen den Messstellen wird entsprechend der Differenz der zugehörigen Messwerte in gleich lange Abschnitte unterteilt (äquidistante Unterteilung). Anhand der Unterteilungen werden dann bestimmte Zwischenwerte der Grundwasserspiegelhöhe, z. B. die Werte 1,50 und 1,75 m ü. NN auf der Hilfslinie zwischen den Messstellen C und G, als Punkte markiert werden. Verbindet man die markierten Punkte mit gleicher Grundwasserspiegelhöhe, die an allen Seiten des Dreiecks bestimmt wurden, so ergeben sich nun die **Grundwassergleichen als Linien gleicher Grundwasserspiegelhöhe**. In Abbildung 28b sind dies die drei schwarzen Linien mit den Werten für die Grundwasserspiegelhöhen von 1,25, 1,50 und 1,75 m ü. NN.

Abbildung 28c zeigt den Grundwassergleichenplan, der auf der Grundlage der oben erläuterten Methodik durch die flächenhafte Auswertung des gesamten Messnetzes konstruiert wurde. Der Förderbrunnen ist in diesem Fall nicht in Betrieb. Aus dem Verlauf der Grundwassergleichen kann als wichtigste Information die **Strömungsrichtung des Grundwassers** abgeleitet werden. Sie ergibt sich grafisch als Senkrechte zu den Grundwassergleichen und ist von Punkten mit höherer zu Punkten mit niedrigerer Grundwasserspiegelhöhe gerichtet. Aus dem Grundwassergleichenplan leiten sich lokal unterschiedliche Fließrichtungen des Grundwassers ab, die in Abbildung 28c durch die gelben Pfeile angegeben sind. Deutlich ist zu erkennen, dass das Grundwasser von der Grundwasserkuppe bei der Messstelle D allseitig abfließt und im Bereich des still stehenden Förderbrunnens vollständig zur Küstenlinie hin abströmt. Die Nordsee wirkt hier als Vorfluter, in den der Grundwasserleiter entwässert.

Die **Auswirkungen einer Grundwasserentnahme** auf das Strömungsbild sind in Abbildung 28d verdeutlicht. In diesem Fall fördert der Brunnen und es hat sich in seinem Nahbereich ein Absenkungstrichter ausgebildet, er-

kennbar an der deutlich geringeren Grundwasserspiegelhöhe (Grundwassergleiche von 0,50 m ü. NN). Im Bereich des Absenkungstrichters sind die Grundwassergleichen entsprechend gekrümmt und die Fließpfeile zeigen an, dass ein Teil des Grundwassers dem Brunnen zuströmt. Anhand der für diesen Entnahmestand konstruierten Grundwassergleichen lässt sich das **Grundwassereinzugsgebiet** des Brunnens abgrenzen, das in Abbildung 28d durch die magentafarbene Linie begrenzt wird. Innerhalb des Einzugsgebietes fließt das Grundwasser dem Brunnen vollständig zu und wird von diesem gefördert, außerhalb des Einzugsgebietes haben sich die Strömungsverhältnisse gegenüber dem vorherigen Zustand ohne Grundwasserentnahme nur leicht geändert.

In der Praxis ist eine Konstruktion von Grundwassergleichenplänen ausschließlich mit Hilfe mathematischer Interpolation zumeist nicht ausreichend. Die Erarbeitung von Gleichenplänen mit im Detail plausibler Linienführung setzt neben der Messung der Grundwasserspiegelhöhen Spezialwissen über den Untergroundaufbau und die Schichteigenschaften voraus, das der Hydrogeologe in die Konstruktion einfließen lässt. Ein Beispiel für einen Grundwassergleichenplan zur Einzugsgebietsbestimmung im östlichen Geestbereich der Insel Föhr ist in Kapitel 5.3 enthalten.

Die Erneuerung des Grundwassers, das durch Förderbrunnen gewonnen wird, geschieht ausschließlich innerhalb der unterirdischen Brunneneinzugsgebiete. Nähr- und Schadstoffe, die innerhalb von Brunneneinzugsgebieten in das Grundwasser gelangen, können daher mit dem Grundwasserfluss bis in die Brunnen transportiert werden. Die Kenntnis der Lage und die genaue Abgrenzung von Grundwassereinzugsgebieten hat daher für den Grundwasserschutz eine große praktische Bedeutung. So werden in Schleswig-Holstein für größere zur öffentlichen Trinkwasserversorgung genutzte Wasserwerke, bei denen eine konkrete Gefährdung des Grundwassers im Einzugsgebiet der Förderbrunnen besteht, **Wasserschutzgebiete** ausgewiesen.

Auf Föhr wurden bereits im Jahre 1985 die ersten Wasserschutzgebiete ausgewiesen. Seit dieser Zeit haben sich die Einzugsgebiete der Förderbrunnen infolge einer veränderten Bewirtschaftungsweise verkleinert und die Wasserschutzgebiete wurden inzwischen den neuen Bedingungen angepasst (Kapitel 6.4).

3.6 Grundwasser-Analysen

Probennahmetechnik

Die Ermittlung des chemischen Zustands des Grundwassers kann nur über entsprechende Analysen im Labor erfolgen. Unabdingbare Voraussetzung hierfür ist die Entnahme von Grundwasserproben aus entsprechend ausgebauten Messstellen (Kapitel 3.3). Die Vorgehensweise während der gesamten Probenahme wird entsprechend einer Standardanweisung, die auf gängigen Regelwerken und DIN-Normen beruht, durchgeführt. Diese Vorgehensweise gewährleistet, dass das der chemischen Analyse zugeführte Wasser in seiner

Beschaffenheit dem Zustand im Grundwasserleiter entspricht und es nicht durch den Aufenthalt in der Messstelle oder durch die Probenahme selbst zu einer Veränderung gekommen ist.

Zur Entnahme einer Grundwasserprobe wird eine Unterwasserpumpe an einem aus mehreren Rohren bestehenden Gestänge in die Grundwassermessstelle eingehängt (Abbildung 29).

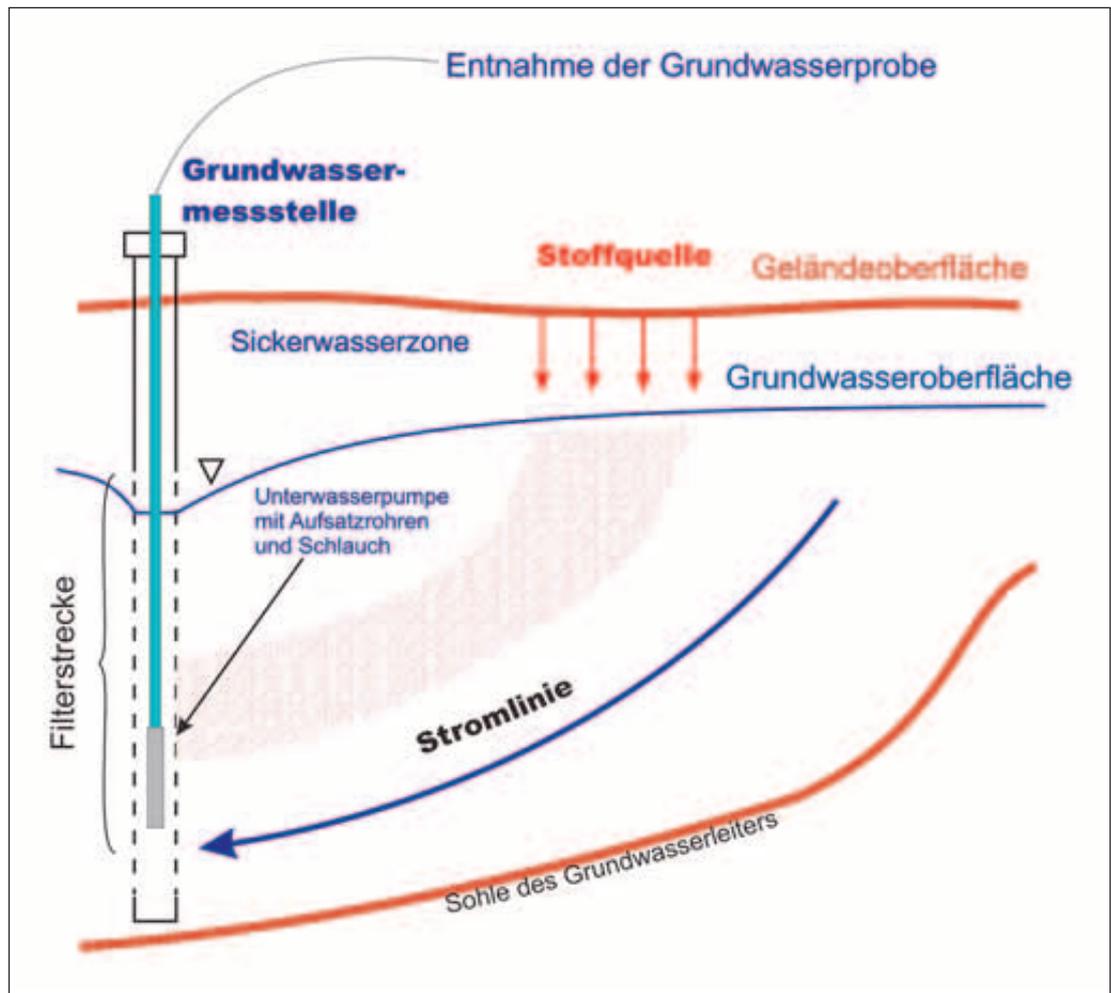


Abbildung 29: Idealisierte Stoffverfrachtung im Porengrundwasserleiter durch den primären Einfluss des konvektiven Massenflusses unter Vernachlässigung der Vermischung und Verteilung durch hydromechanische Dispersion und molekulare Diffusion, verändert nach ROHMANN & SONTHEIMER (1985).

Idealized mass transport in the pore aquifer due to primary convective mass flow neglecting mixing and distribution by hydromechanical dispersion and molecular diffusion (after ROHMANN & SONTHEIMER 1985).

Über das Rohrgestänge mit aufgesetzten Schläuchen wird das Wasser in einen Messbehälter gepumpt, der dabei ständig durchströmt wird. Temperatur, pH-Wert, die elektri-

sche Leitfähigkeit und der Sauerstoffgehalt werden während der gesamten Zeit kontinuierlich gemessen (Abbildung 30).



Abbildung 30: Probennahme mit kontinuierlicher Messung der Temperatur, des pH- Werts, der elektrischen Leitfähigkeit und des Sauerstoffgehalts in einer Messstelle auf der Insel Föhr.

Taking of groundwater samples including continous measurement of temperature, pH-value, electrical conductivity and oxigene content at a monitoring well on the Island of Föhr.

Erst wenn diese Parameter eine annähernde Konstanz zeigen, werden die speziellen Probenflaschen befüllt. Dieser Vorgang dauert im

Allgemeinen zwischen 15 und 45 Minuten (Abbildung 31).

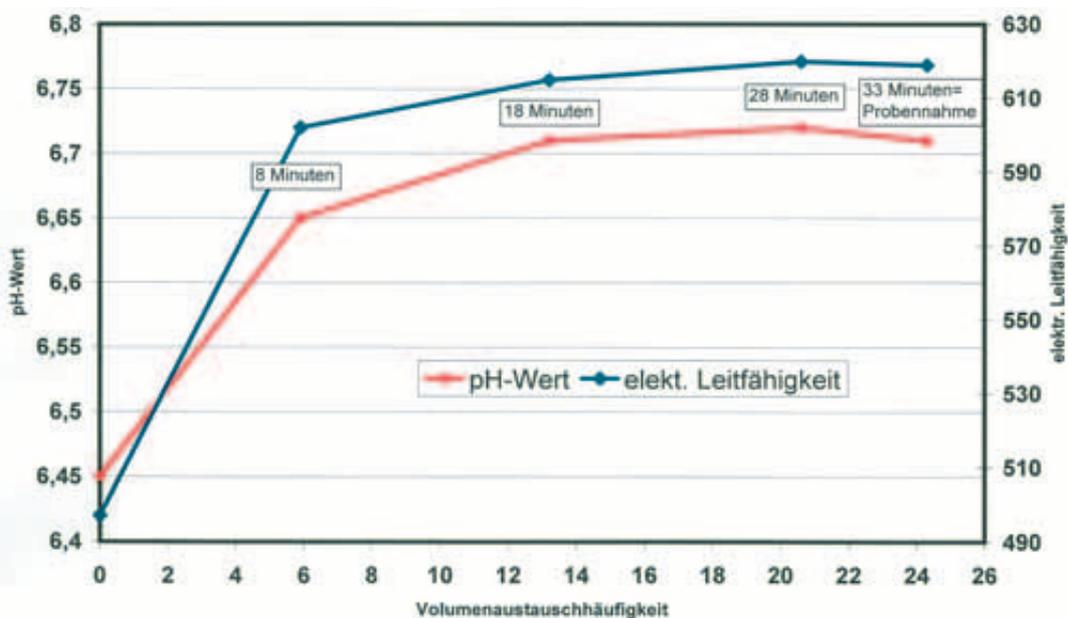


Abbildung 31: Beispielhafte Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Wertes im Verlauf der Probennahme an einer flachen Grundwassermessstelle. Alteration of electrical conductivity and pH-value during groundwater sampling at a shallow monitoring well.

Für die Beurteilung der Grundwasserbeschaffenheit sind folgende Parameter und Hauptinhaltsstoffe von besonderer Bedeutung:

• **Elektrische Leitfähigkeit bei 25° C**

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für den Gesamtgehalt der gelösten Stoffe im Grundwasser. Ihre Größe ergibt sich aus geogenen, aber auch anthropogenen Einflüssen. Maßgeblichen Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit haben vor allem die Calcium- und Hydrogencarbonatgehalte sowie Natrium, Chlorid und Sulfat. Neben salzhaltigen Grundwässern weisen insbesondere solche Grundwässer eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf, deren Beschaffenheit sehr stark durch kalkhaltige Sedimente (Geschiebemergel) bestimmt wird.

• **pH-Wert**

Der pH-Wert wird neben dem Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht maßgeblich durch die Landnutzung (Düngungsmaßnahmen) und atmosphärische Einträge („saurer Regen“), aber auch durch natürlicherweise ablaufende Stoffwechselvorgänge zwischen Pflanzen und Boden beeinflusst. Da in unserem humiden Klima die Menge an pH-Wert-senkender Säure (H-Ionen) auf Dauer größer ist als das Puffervermögen der Sedimente, die bei der Neubildung des Grundwassers durchsickert werden, kommt es zu einer allmählichen Versauerung. Werden dabei die Carbonate als wichtige Pufferstoffe verbraucht, kommt es zu einer Absenkung des pH-Wertes unter den Neutralpunkt von pH 7. Unter reinen Sandböden, die eine vergleichsweise geringe Pufferkapazität aufweisen, kann es zu einer deutlichen Absenkung des pH-Wertes kommen.

• **Sauerstoff**

Die Lösungsmöglichkeit des Sauerstoffs im Wasser wird im Wesentlichen durch die Temperatur und den Salzgehalt des Grundwassers gesteuert. Der sich tatsächlich einstellende Sauerstoffgehalt ist abhängig von den stofflichen Umsetzungsprozessen. So ist der mit mikrobieller Aktivität verbundene Abbau von organischer Substanz ein Sauerstoff zehrender Vorgang. Von reduzierten Grundwässern spricht man, wenn praktisch kein freier Sauerstoff mehr vorhanden ist. An das Vorkommen von freiem Sauerstoff ist wiederum das Vorkommen anderer Inhaltsstoffe gebunden. Nitrat ist unter reduzierten Bedingungen nicht beständig. Eisen und Mangan können nur unter diesen Bedingungen in vergleichsweise hohen Konzentrationen vorkommen.

• **Natrium**

Natrium ist ein relativ häufiges Element und Bestandteil vieler Minerale. Ein Großteil des Natriumvorkommens ist an Salzlagerstätten gebunden oder liegt gelöst im Meerwasser vor. Hohe Natriumgehalte weisen in Küstennähe auf den Einfluss einer Versalzung durch Meerwasser hin. Erhöhte Natriumgehalte treten daher oft mit erhöhten Chlorid- und/oder Kaliumgehalten auf.

• **Kalium**

Kalium gehört wie Natrium zu den Alkalimetallen. Auch Kalium kommt in erhöhten Mengen im Meerwasser vor, allerdings in deutlich geringeren Konzentrationen als Natrium. Daneben gehört Kalium zusammen mit Stickstoff, Phosphor und Magnesium zu den Hauptnährelementen der Pflanzen und wird in Form von mineralischen und organischen Düngern in relativ großen Mengen in der Landwirtschaft eingesetzt. Im Gegensatz zum Nitrat findet im Untergrund kein Abbau von Kalium statt, jedoch wird Kalium an Tonminerale gebunden und bei steigendem Tongehalt des Untergrundes zunehmend adsorbiert und damit aus dem Grundwasser entfernt.

• **Calcium**

Calcium gehört, wie auch Magnesium, zu den Erdalkalimetallen und ist in zahlreichen gesteinsbildenden Mineralen enthalten. Calcium wird in relativ großen Mengen in der Landwirtschaft als Dünger eingesetzt, wobei jedoch weniger die Calciumversorgung der Kulturpflanze im Vordergrund steht, als vielmehr eine Beeinflussung des pH-Wertes der landwirtschaftlichen Böden. Darüber hinaus hat Calcium auch eine strukturverbessernde Wirkung auf das Bodengefüge. Erhöhte Calciumgehalte im Grundwasser werden vor allem durch den natürlichen Calciumgehalt der Sedimente verursacht (z. B. Calciumcarbonathaltiger Geschiebemergel).

• **Magnesium**

Magnesium zählt neben Stickstoff, Phosphor und Kalium zu den Hauptnährelementen der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen, die zur Ertragssicherung mit der Düngung zugeführt werden müssen. Magnesium ist im Sediment relativ mobil und kann mit dem Sickerwasser in das Grundwasser ausgewaschen werden. Häufig kann man im Grundwasser ein Verhältnis von Calcium zu Magnesium von etwa 10 : 1 feststellen.

• Eisen und Mangan

Eisen und Mangan gehören zwar zu den häufigsten Elementen der Erdkruste, ihre Löslichkeit im Wasser ist jedoch gering und hängt von der mikrobiellen Aktivität, dem pH-Wert, dem Sauerstoffgehalt und dem Vorhandensein von organischer Substanz ab. Höhere Gehalte an Eisen und Mangan sind im Grundwasser grundsätzlich an sauerstoffarme und damit reduzierende Verhältnisse gebunden. In diesem Fall kann beim Abbau von Nitrat zweiwertiges Eisen entstehen und zu erhöhten Eisengehalten im Grundwasser führen.

• Nitrat

Nitrat hat bei der Beurteilung des Einflusses der landwirtschaftlichen Nutzung auf das Grundwasser die größte Bedeutung. Nitrat wird unmittelbar mit mineralischem Dünger aufgebracht, oder es entsteht durch den Abbau (Mineralisierung) von organischer Substanz aus den Wirtschaftsdüngern Gülle, Jauche und Festmist. Aber auch durch den Abbau der natürlich vorkommenden organischen Substanz im Boden sowie von Pflanzenrückständen kann Nitrat freigesetzt werden. Nitrat wird vom Boden kaum gebunden und ist aufgrund seiner Wasserlöslichkeit leicht verlagerbar. Sofern keine Aufnahme durch die Pflanzen erfolgt und keine Denitrifikation stattfindet, kann es mit dem Sickerwasser in das Grundwasser verlagert werden.

• Chlorid

Da Chlorid auch Bestandteil von Mineraldüngern ist (z. B. von Kaliumchlorid-Düngern), können erhöhte Chloridgehalte im Grundwasser auch die Folge von Düngungsmaßnahmen auf landwirtschaftlichen Flächen sein. Darüber hinaus liegt Chlorid mit ca. 2 Gewichtsprozent gelöst im Meerwasser vor und kann auch auf eine Versalzung küstennaher Grundwässer hindeuten.

• Sulfat

Schwefel ist natürlicher Bestandteil verschiedener Minerale und tritt überwiegend in Form von Sulfid oder Sulfat auf. Schwefel wird auch als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt, so dass erhöhte Sulfatgehalte im Grundwasser auch anthropogen bedingt sein können.

• Hydrogencarbonat

Die Gehalte an Hydrogencarbonat werden vor allem von der Zusammensetzung der Sedimente bestimmt. Hohe Werte finden sich daher in Messstellen, die durch Calciumcarbonat-haltigen Geschiebemergel beeinflusst sind. Niedrige Gehalte kommen an Messstellen vor, die in Calciumcarbonat-armen Sanden verfiltert sind. Darüber hinaus kann Hydrogencarbonat auch beim Nitratabbau entstehen.

4 Geophysikalische Untersuchungen auf Föhr

➤ **Reinhard Kirsch, Helga Wiederhold,
Thomas Burschil**

Unsere Kenntnisse über den Untergrund der Insel Föhr und über die Abfolge von grundwasserleitenden und –nichtleitenden Schichten basieren auf einer Vielzahl von Bohrungen, aber auch auf geophysikalischen Messungen, die im Rahmen des Projektes CLIWAT durchgeführt wurden.

Das Ziel geophysikalischer Messungen ist die Abbildung der Untergrundstrukturen. Dies erfolgt nicht auf direktem Wege wie bei einer Bohrung, bei der durch das nach oben geförderte Untergrundmaterial der Schichtenaufbau ersichtlich wird. Geophysikalische Erkundungsverfahren nutzen die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Sedimentschichten, um die Tiefenlage der Schichtgrenzen zu bestimmen und um das Material zu charakterisieren. Eine derartige Tiefenbestimmung ist manchmal mehrdeutig und nicht so exakt wie bei einer Bohrung, bei der man die Geologie mit den Händen greifen kann. Geophysikalische Messungen sind aber preiswerter als Bohrungen und die gewonnenen Untergrundinformationen liegen meistens profil- oder flächenhaft vor, während durch Bohrungen lediglich Punktinformationen gewonnen werden können.

Die wichtigsten geophysikalischen Messverfahren, die auf Föhr eingesetzt wurden, sind **Reflexionsseismik** und **Elektromagnetik**. Im Folgenden werden Ihnen diese Messverfahren kurz vorgestellt. Vorher werfen wir aber noch einen schnellen Blick auf die physikalischen Eigenschaften der hier vorkommenden Sedimentarten.

4.1 Unser Untergrund – von der Geologie zur Physik

Damit die Lagerungsverhältnisse von Sand, Ton und Geschiebemergel geophysikalisch erkundet werden können, müssen sich diese 3 Sedimentarten in einigen ihrer physikalischen Eigenschaften unterscheiden. Für eine Erkundung mit geoelektrischen oder elektromagnetischen Verfahren ist die entscheidende physikalische Eigenschaft der spezifische elektrische Widerstand oder die elektrische Leitfähigkeit. Bei einer Erkundung mit seismischen Verfahren geht es um die Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen (seismische Geschwindigkeit), die von der Dichte und den elastischen Eigenschaften des Sediments (Kompressionsmodul und Schermodul) abhängt.

Bei den elektromagnetischen Verfahren wird im Untergrund ein Strom induziert, der im Wesentlichen durch das Porenwasser oder durch die Tonminerale fließt. Der dadurch ermittelbare **spezifische elektrische Widerstand** des Sediments hängt also stark vom spezifischen elektrischen Widerstand des Porenwassers und vom Tongehalt ab. Ton und Geschiebemergel haben einen geringeren spezifischen elektrischen Widerstand als Sand. Salzhaltiges Porenwasser, das insbesondere im Bereich der Marsch auftreten kann, hat einen besonders geringen spezifischen elektrischen Widerstand. Eine Grundwasserversalzung ist daher mit elektromagnetischen Verfahren gut erkennbar.

Die **Dichte** und die **seismische Geschwindigkeit** hängen stark von der Porosität ab, eine hohe Porosität führt zu einer verringerten Dichte und einer verringerten seismischen Geschwindigkeit. Geschiebemergel mit einer geringen Porosität hat daher eine höhere Dichte und eine höhere seismische Geschwindigkeit als beispielsweise Sand.

4.2 Geoelektrische und Elektromagnetische Messungen auf Föhr, SkyTEM

Ziel der geoelektrischen und elektromagnetischen Messungen ist die Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands des Untergrundes, woraus dann Rückschlüsse auf das Untergrundmaterial möglich sind. Da der Untergrund nicht homogen, sondern aus den unterschiedlichen Sedimentlagen aufgebaut ist, soll durch geoelektrische und elektromagnetische Messungen die Abfolge der spezifischen Widerstände mit der Tiefe bestimmt werden.

Geoelektrische Messungen wurden bereits in den 1990er Jahren auf Föhr durchgeführt (KETELEN & KIRSCH 2004). Dabei wird mit 2 Metallspeießen (Elektroden) ein Strom in den Untergrund eingespeist und die durch den Stromfluss erzeugte Potentialdifferenz mit 2 weiteren Elektroden gemessen. Durch Messung mit unterschiedlichen Elektrodenabständen lässt sich der Schichtenaufbau des Untergrundes ableiten, wobei die Schichten durch ihre spezifischen elektrischen Widerstände charakterisiert sind. Ein Beispiel geoelektrischer Messungen nördlich von Dunsum ist in Abbildung 32 gezeigt. Es handelt sich um 3 geoelektrische Sondierungen, die mit zunehmendem Abstand vom Deich durchgeführt wurden. In den

Sondierungsergebnissen zeichnet sich jeweils die Deckschicht (trockenes Material) mit hohen spezifischen elektrischen Widerständen ab, die vom Grundwasserleiter (wassergesättigter Sand, siehe Kapitel 5) mit Widerständen im Bereich von 130 – 180 Ohmmetern unterlagert wird. In den Grundwasserleiter ist eine niederohmige Zwischenschicht aus tonhaltigem Ma-

terial eingelagert. Interessant ist die extrem niederohmige Schicht (3 – 9 Ohmmeter) als Abschluss der erfassten Schichten. Es handelt sich hierbei um salzwasserführende Sande. Die Tiefenlage der Salz-Süßwassergrenze sinkt mit zunehmendem Abstand vom Deich ab, hier wurde also der Rand der Süßwasserlinse (Abbildung 57) erfasst.

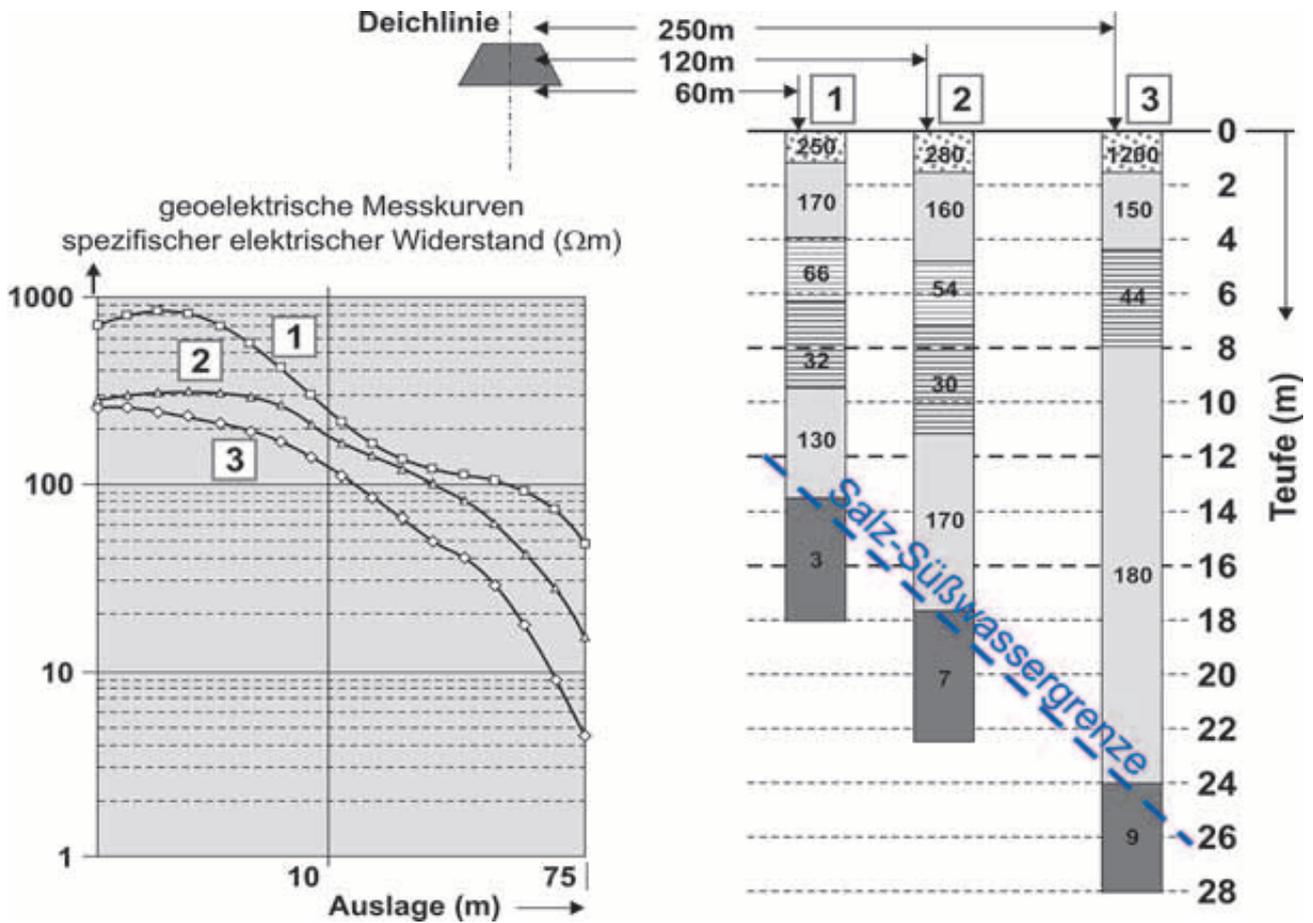


Abbildung 32: Ergebnis geoelektrischer Sondierungen auf Föhr: Links sind die Sondierungskurven (gemessene elektrische Widerstände in Abhängigkeit vom jeweiligen Elektrodenabstand) dargestellt, rechts die ermittelten Widerstands – Tiefen Diagramme, die Zahlen bedeuten hier die spezifischen Widerstände des Sediments. Die unterste, niederohmige Schicht (dunkel) stellt die zur Landseite hin abtauchende Salzwasserintrusion dar (KETELSEN & KIRSCH 2004).

Results of geoelectrical soundings (VES): sounding curves (left) and resistivity depth distributions with dipping saltwater freshwater boundary.

Zur flächenhaften Erfassung der Untergrundverhältnisse, insbesondere der Süßwasserlinse, wurden im Projekt CLIWAT elektromagnetische Messungen durchgeführt. Physikalische Grundlage elektromagnetischer Messungen sind die Maxwell'schen Gleichungen (zum Beispiel das Induktionsgesetz), durch die elektrische und magnetische Felder verknüpft sind. Das bedeutet:

- wenn ein Magnetfeld sich ändert, wird ein elektrisches Feld induziert und in elektrisch leitfähigem Material fließt ein Strom,
- wenn ein Strom fließt, wird um ihn ein Magnetfeld erzeugt.

Umgesetzt für die geophysikalische Erkundung heißt das (Abbildung 33):

- mit einer Sendespule auf oder über dem Erdboden wird ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt (zum Beispiel durch einen Wechselstrom),
- dieses dringt in den Untergrund ein und lässt dort Ströme fließen, deren Stärke unter anderem vom spezifischen elektrischen Widerstand des Untergrundes abhängt,
- dieses Stromsystem führt zu einem zusätzlichen Magnetfeld (Sekundärfeld), das in einem Empfänger registriert wird,
- aus dem Verhältnis von sekundärem und primärem Magnetfeld lässt sich die Verteilung der elektrischen Widerstände im Untergrund ableiten.

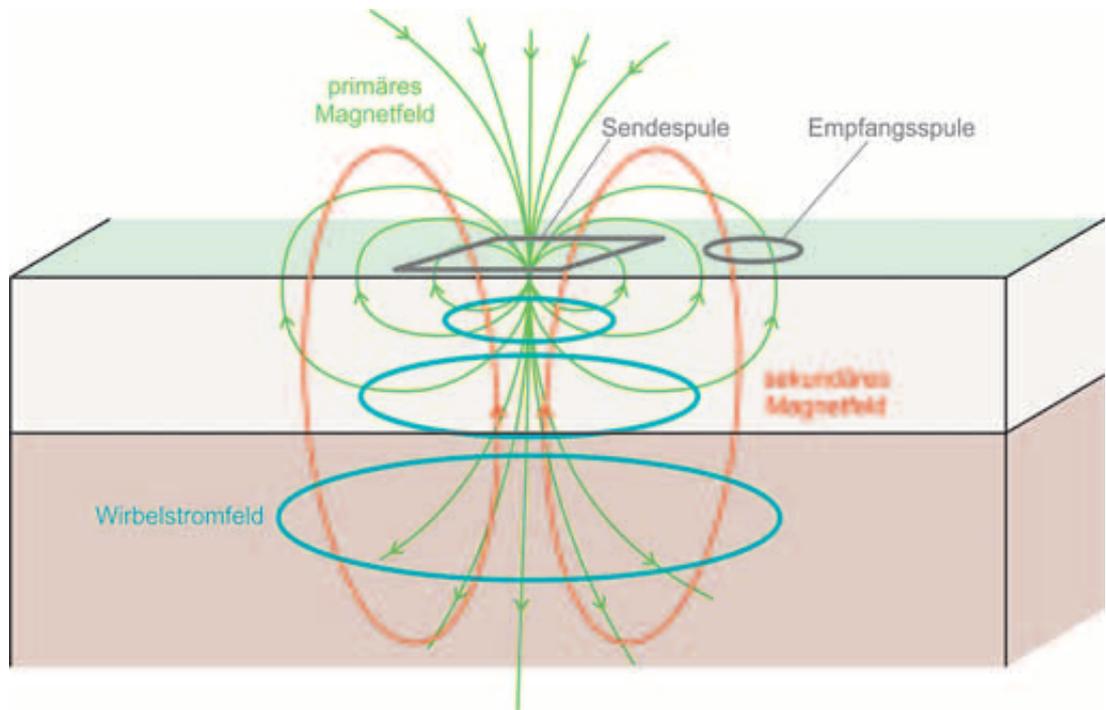


Abbildung 33: Grundprinzip elektromagnetischer Messungen.
Basic principle of electromagnetic measurements.

Auf Föhr wurde ein spezielles Verfahren der Elektromagnetik eingesetzt, die **Transienten-elektromagnetik**. Hierbei fließt in der Spule ein Gleichstrom, der abgeschaltet wird, wodurch das Magnetfeld zusammenbricht. Dadurch ergibt sich eine starke Änderung des Magnetfeldes und ein entsprechend starkes induziertes Stromfeld im Untergrund, so dass die Untergrundstruktur bis in mehrere hundert Meter Tiefe erfasst werden kann. Stark ist allerdings relativ zu sehen, die induzierte Stromdichte im Untergrund ist sehr gering.

Für schnelle großräumige Messungen wird dieses Messsystem von einem Hubschrauber aus betrieben und als **SkyTEM** bezeichnet (Abbildung 34). Die Messantenne wird in ca. 30 m Höhe geschleppt. SkyTEM ist eine Entwicklung der Universität Aarhus, HydroGeophysics Group, die von der Fa. SkyTEM ApS kommerziell eingesetzt wird (AARHUS GEOPHYSICS 2008).

Föhr wurde flächendeckend befliegen, die Fluglinien verlaufen in Ost-West Richtung. Der Abstand der Fluglinien untereinander beträgt im Mittel 250 m. Ortschaften und einzeln stehende Gebäude wurden, wenn möglich, nicht überfliegen, das führt zu einem teilweise irre-

gulärem Verlauf der Fluglinien (Abbildung 35). Ergänzend wurden Transientelektromagnetische Messungen am Boden durchgeführt (LISS 2011).

Nach Messung und Inversion der SkyTEM Daten erhält man die Widerstands-Tiefenverteilung unterhalb der Fluglinie des Hubschraubers, was als Basis für eine weiterführende geologische Interpretation dient (Abbildung 36). Zur Erstellung von Widerstandskarten werden für ein vorgegebenes Tiefenintervall (beispielsweise 10 – 20 m u. NN) die entlang der Fluglinien bestimmten elektrischen Widerstände zwischen den Fluglinien interpoliert, so dass die flächenhafte Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstands abgeleitet werden kann. Als Beispiel ist in Abbildung 37 die Widerstandsverteilung für den Tiefenbereich 20 – 30 m u. NN gezeigt. Der blau gekennzeichnete hochohmige Bereich im Geestkern von Föhr stellt die Süßwasserlinse dar, während der rot gekennzeichnete niederohmige Bereich in der Marsch im Norden der Insel auf Grundwasserversalzung hinweist. Auffällig ist ein Nordost – Südwest verlaufendes Streifenmuster im Norden. Hier zeichnen sich glaziale Stauchstrukturen ab, über die bereits in Kapitel 2 berichtet wurde.



Abbildung 34:
SkyTEM im
Einsatz.
SkyTEM in
operation.



Abbildung 35: Fluglinienplan der SkyTEM Befliegung (blaue und rote Linien).
SkyTEM flightlines on the Island of Föhr.

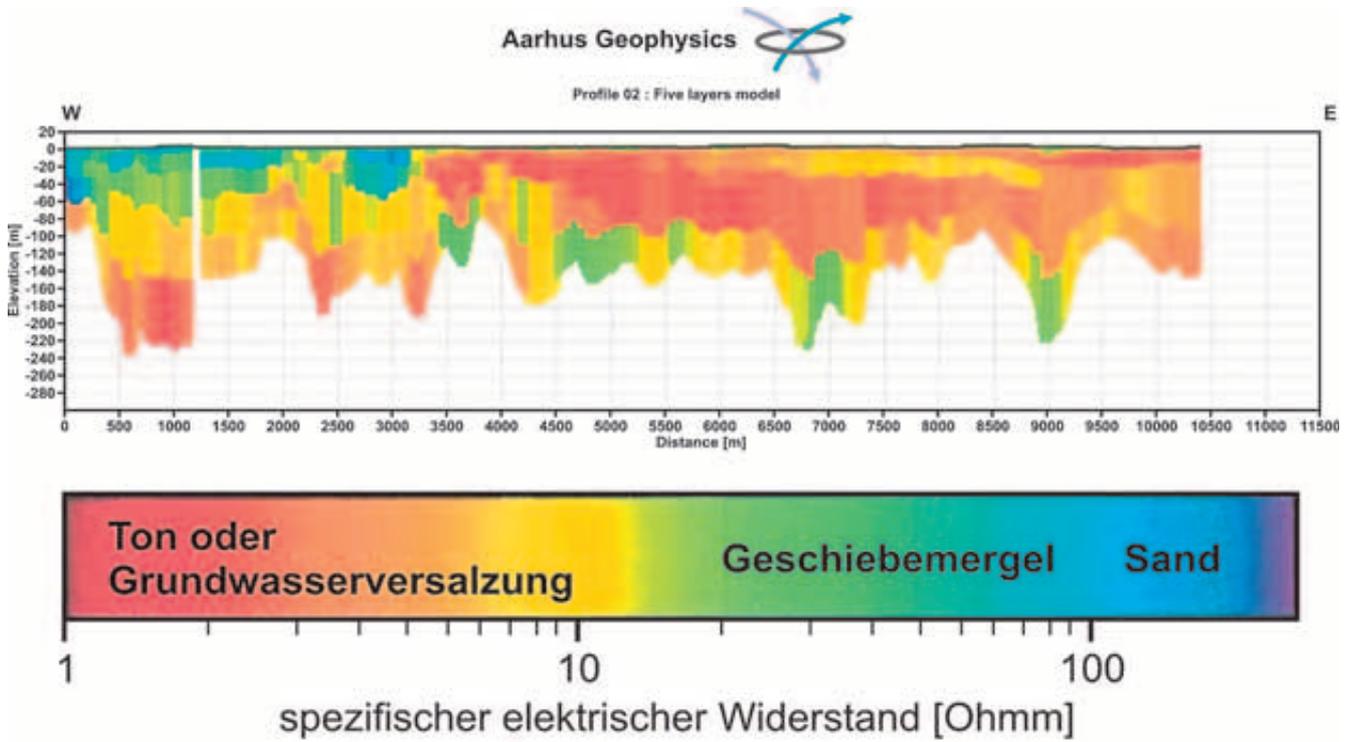


Abbildung 36: Oben: spezifische elektrische Widerstände des Untergrundes unterhalb einer SkyTEM Fluglinie (Profil 2 in Abbildung 35), darunter: spezifische elektrische Widerstände von Sand, Geschiebemergel und Ton als Basis einer geologischen Interpretation der Befliegungsergebnisse.

Top: specific electrical resistivities in the subsoil beneath a SkyTEM flightline, bottom: specific electrical resistivity ranges of sand, till and clay as a base of geological interpretation.

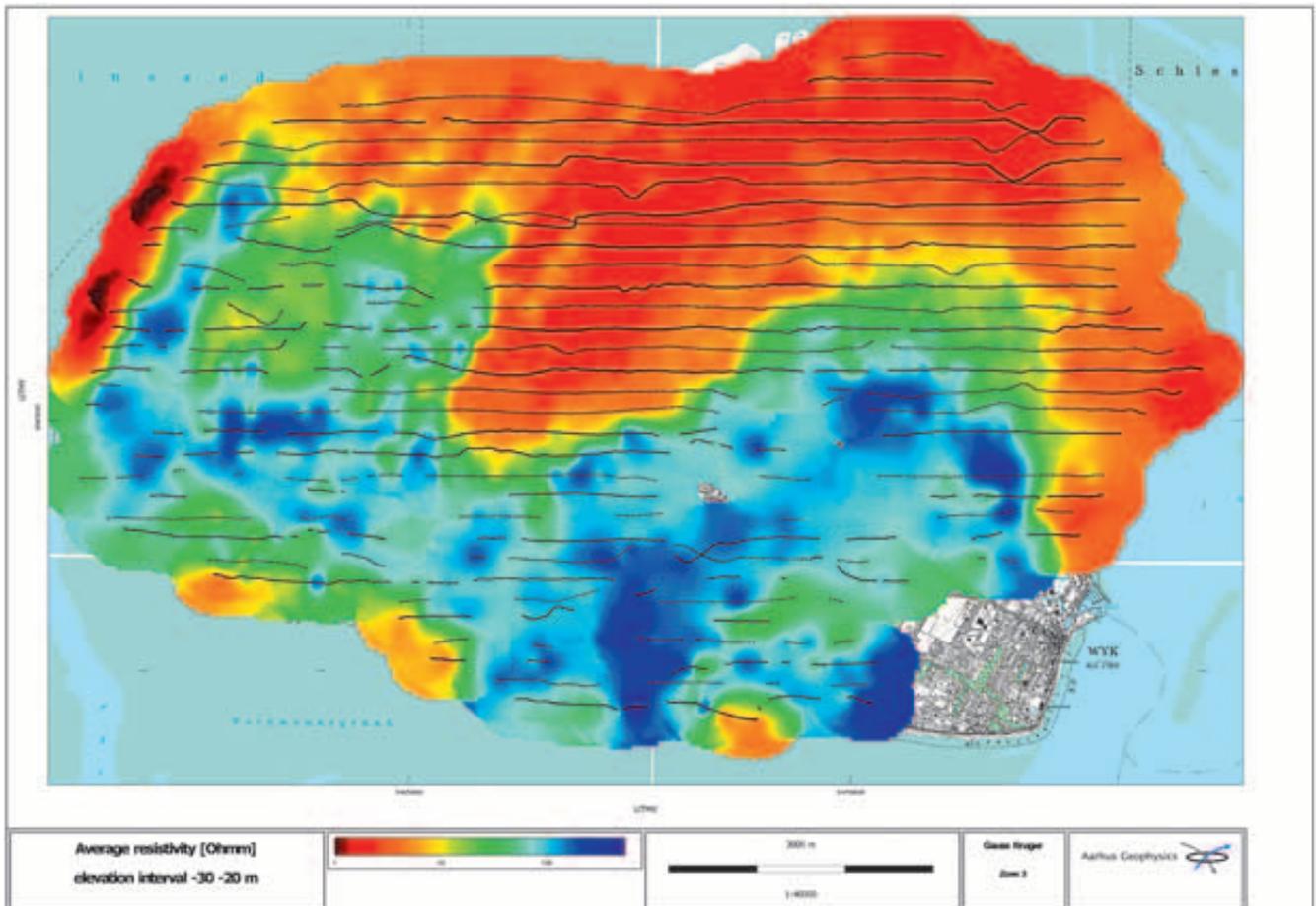


Abbildung 37: Ergebnis der SkyTEM Befliegung: Karte der spezifischen elektrischen Widerstände für den Tiefenbereich 20 – 30 m u. NN.
Results of a SkyTEM survey: lateral distribution of electrical resistivities in the depth range 20 – 30 m below mean sealevel.

4.3 Seismische Messungen auf Föhr

Die Seismik gehört zu den bekanntesten Erkundungsverfahren der Geophysik. Ihr Einsatzbereich reicht von der Untersuchung flacher Untergrundstrukturen der obersten Meter bis hin zur Kartierung von Erdöllagerstätten und geothermischen Nutzhorizonten in mehreren Kilometern Tiefe. Die seismischen Messungen

auf Föhr wurden vom Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (Hannover) durchgeführt und so angelegt, dass der Tiefenbereich bis ca. 500 m erfasst werden konnte. Die Messungen erfolgten auf Profilen von 1 – 2 km Länge im Bereich des Wasserwerks Föhr – Ost (Abbildung 38).

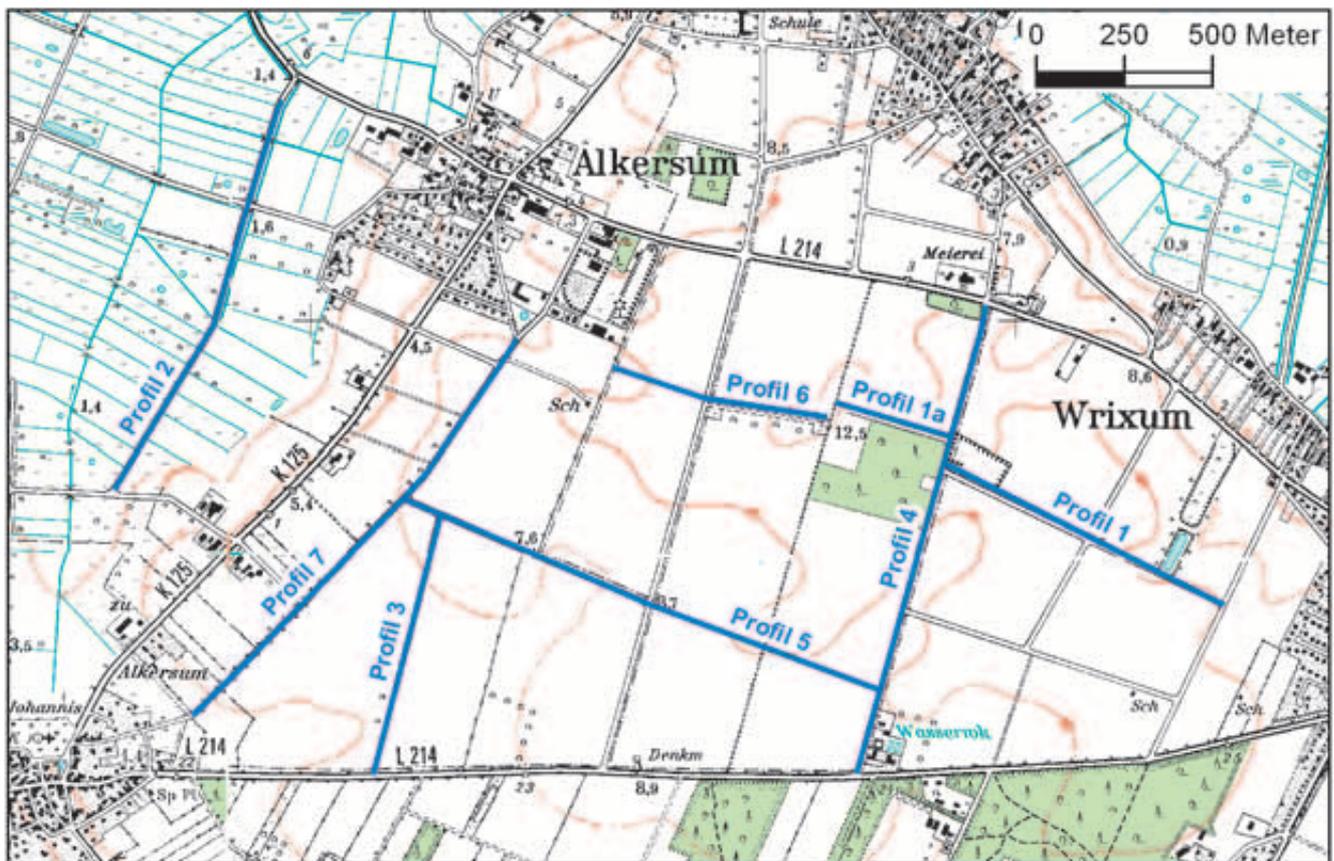


Abbildung 38: Lage der seismischen Profile im Bereich des Wasserwerks Föhr Ost.
Location of seismic lines around the water works Föhr-Ost.

Seismische Messungen basieren auf der Auswertung der Laufzeit von Erschütterungswellen im Untergrund, die als seismische Wellen bezeichnet werden. Seismische Wellen können durch eine Sprengung, durch einen Hammerschlag auf den Boden oder durch Vibratoren erzeugt werden. Die seismischen Wellen breiten sich an der Erdoberfläche wie Wasserwellen aus, dringen aber auch in den Untergrund ein. Die Ausbreitung im Untergrund erfolgt annähernd auf Kugelschalen (Wellenfronten), wenn man aber nur eine Ausbreitungsrichtung betrachtet, kann man sich vorstellen, dass die seismische Welle sich entlang eines Strahles bewegt.

Zur Durchführung seismischer Messungen benötigt man eine **seismische Signalquelle** sowie eine Anzahl von Erschütterungsaufnehmern, die als **Geophone** bezeichnet werden (Abbildung 39). Und natürlich eine Aufnahmeapparatur, welche die Messung steuert und

die aufgenommenen Daten speichert. Die Messung beginnt, sobald die seismische Welle ausgelöst wird. Ab jetzt wird kontinuierlich von den Geophonen die Bewegung der Erdoberfläche aufgezeichnet. Seismische Wellen werden registriert, wenn sie entweder an der Erdoberfläche entlanglaufen (Oberflächenwellen) oder von einer Schichtgrenze im Untergrund reflektiert werden. Damit eine seismische Welle an einer Schichtgrenze reflektiert werden kann, müssen sich die Schichten oberhalb und unterhalb in ihrer seismischen Impedanz, also dem Produkt aus der jeweiligen seismischen Geschwindigkeit und Dichte, unterscheiden. Wie bereits erwähnt, hat Sand eine höhere Porosität und damit eine geringere Dichte und seismische Geschwindigkeit als Geschiebemergel. An einer Schichtgrenze zwischen Sand und Geschiebemergel herrscht also ein ausgeprägter Impedanzkontrast, diese Schichtgrenze wird sich in der Reflexionsseismik deutlich abzeichnen.

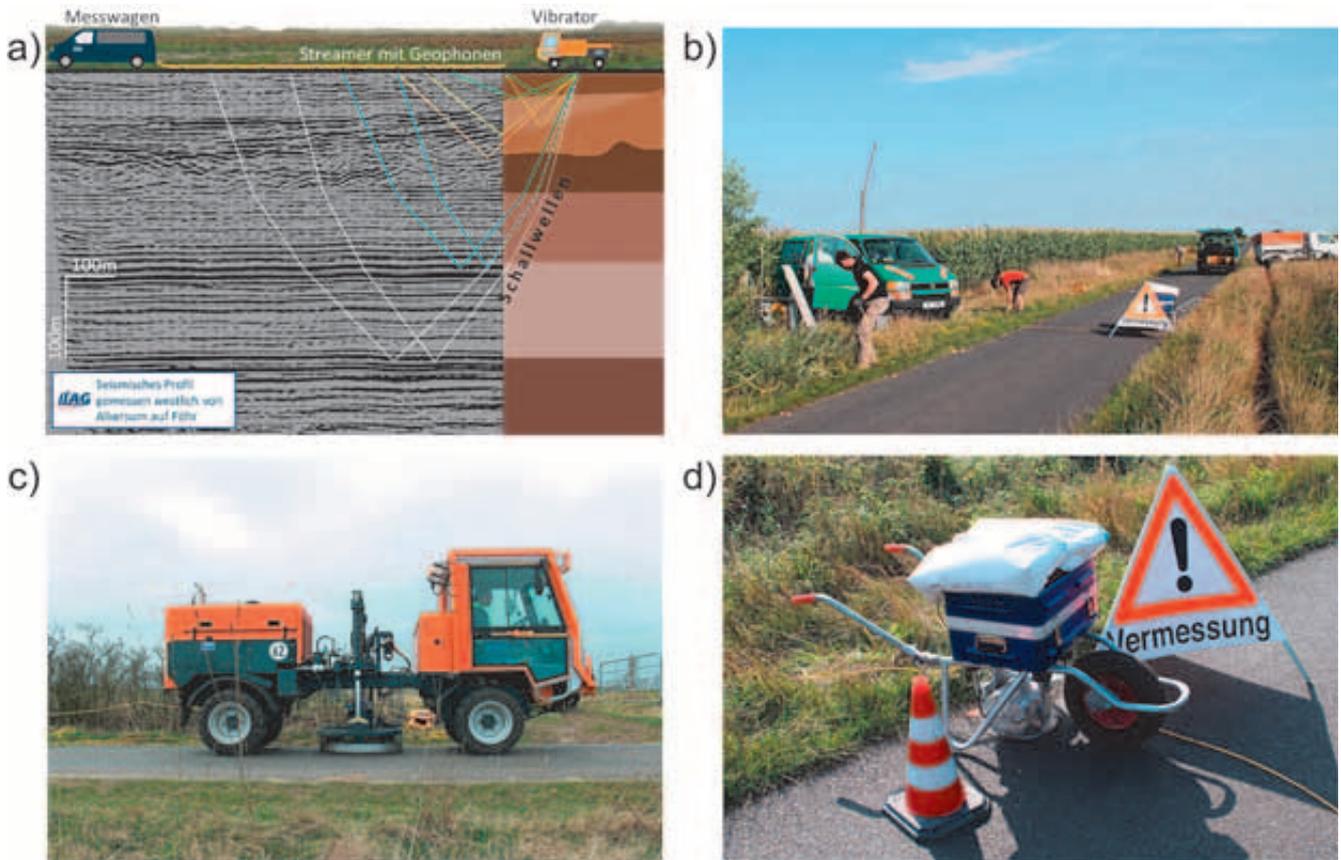


Abbildung 39: a) Grundschemata einer reflexionsseismischen Messung, b) seismische Feldarbeiten, Aufbau der Geophonauslage, c) Vibrator HVP-30 zur Erzeugung seismischer Wellen (hydraulischer Antrieb, Erkundungstiefe bis 1.000 m), d) Minivibrator ELVIS zur Erzeugung seismischer Wellen (elektrodynamischer Antrieb, Erkundungstiefe bis 300 m). Die Vibratoren sind Eigenentwicklungen des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (LIAG, Hannover).

a) base principle of reflection seismic measurements, b) seismic field crew installing the geophone line, c) seismic source vibrator HVP-30 (hydraulic drive, depth penetration down to 1,000 m), d) seismic source ELVIS (electrodynamical drive, depth penetration down to 300 m). Both seismic sources are developed by LIAG Hannover.

Die seismischen Messungen werden mit unterschiedlichen Positionen der seismischen Quelle (aus Traditionsgründen nennt man die Quellposition „Schusspunkt“, obwohl heute Sprengungen zur Erzeugung seismischer Wellen die Ausnahme sind) wiederholt und die Ergebnisse in einer **seismischen Sektion** zusammengefasst. In einer solchen seismischen Sektion zeichnen sich die Schichtgrenzen im Untergrund ab, an denen die seismischen

Wellen reflektiert wurden (Abbildung 40). In der Abbildung 40 sind die seismischen Geschwindigkeiten farbig hinterlegt. Die seismischen Geschwindigkeiten der Sedimente unterhalb des Grundwasserspiegels liegen im Bereich von 1.500 – 2.000 m/s. Man erkennt deutliche Geschwindigkeitsunterschiede, was auf einen strukturierten Untergrund mit unterschiedlichen Materialien hinweist.

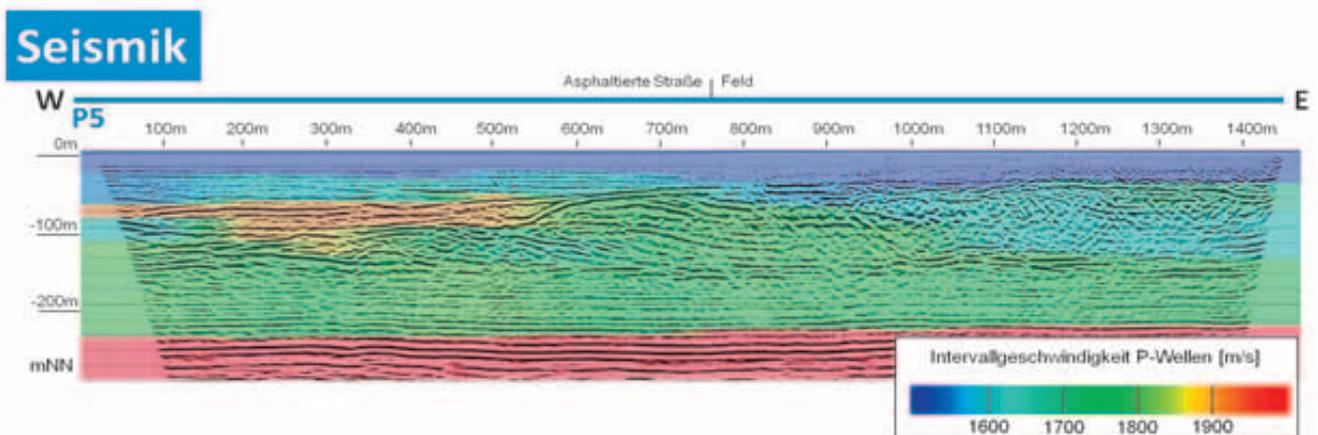


Abbildung 40: Beispiel einer seismischen Stapelsektion, farbig hinterlegt: seismische Geschwindigkeiten (BURSCHIL 2011).

Seismic section with colour coded seismic velocities (BURSCHIL 2011).

Die reflexionsseismischen Messungen wurden, wenn möglich, durch **vertikalseismische Profile (VSP)** ergänzt. Hierbei wird in eine vorhandene Bohrung, zum Beispiel in eine Grundwassermessstelle, ein Bohrlochgeophon abgesenkt. Mit einer seismischen Quelle an der Erdoberfläche kann eine direkte Durchschallung des Untergrundes erfolgen. Im Verlauf der Messungen wird das Bohrlochgeophon von seiner tiefsten Position im Bohrloch für jeden Schuss um einen Meter nach oben gezogen. Aus den unterschiedlichen Laufzeiten der seismischen Welle vom Schusspunkt zur jeweiligen Geophonposition kann die seismische Geschwindigkeit der durch die Bohrung aufgeschlossenen Schichten bestimmt werden (Abbildung 41). Man erkennt hier deutlich, dass der Geschiebemergel ab einer Tiefe von 60 m eine höhere seismische Geschwindigkeit aufweist als der darüber liegende Sand.

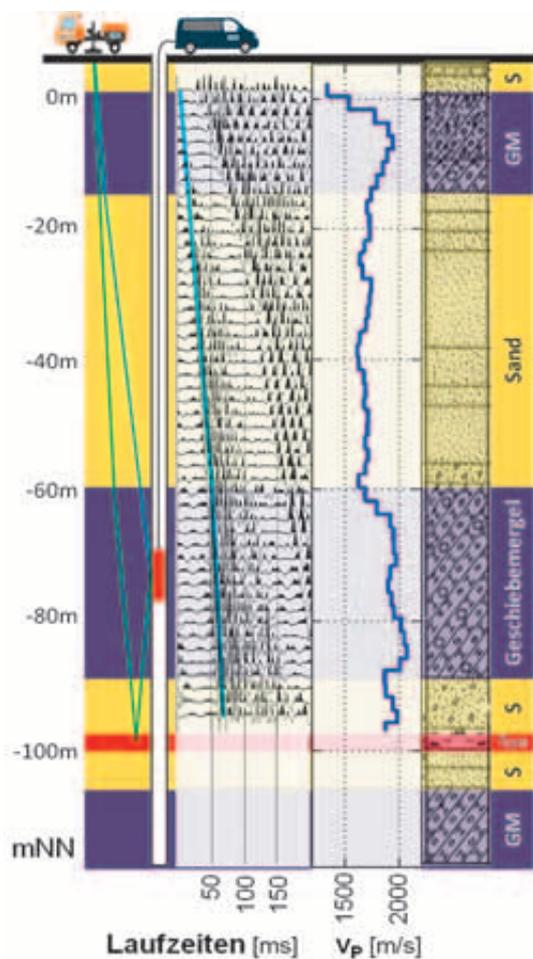


Abbildung 41: Vertikalseismisches Profil (BURSCHIL 2011).
Vertical seismic profile (BURSCHIL 2011).

4.4 Seismik und SkyTEM kombiniert

Bei der Auswertung geophysikalischer Messungen ergibt sich häufig ein gewisser Interpretationsspielraum. Elektromagnetische Messungen wie SkyTEM liefern die Tiefenlage von Schichtgrenzen im Untergrund und die spezifischen elektrischen Widerstände der jeweiligen Schichten. Sind die Schichttiefen zum Beispiel

aus einer Bohrung bekannt und werden sie bei der Auswertung berücksichtigt, dann ergibt sich eine genauere Ableitung der spezifischen elektrischen Widerstände. Für die SkyTEM Ergebnisse der Insel Föhr wurde versuchsweise der Schichtenverlauf, wie er aus den reflexionsseismischen Messungen bestimmt wurde, als Randbedingung für die Auswertung genommen. Aufgrund der so abgeleiteten spezifischen elektrischen Widerstände konnte dann eine Materialansprache der erfassten Schichten erfolgen (Abbildung 42).

4.5 Weitere Untersuchungen

Neben SkyTEM und den reflexionsseismischen Messungen des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik, deren Ergebnisse unmittelbar in das Geologische Modell der Insel Föhr eingeflossen sind, wurden eine Reihe weiterer geophysikalischer Projekte durchgeführt, bei denen die Weiterentwicklung geophysikalischer Messverfahren im Mittelpunkt stand und die zum größten Teil noch nicht abgeschlossen sind.

Von der Universität Münster, Institut für Geophysik, wurde ein selbst entwickeltes Bodenradarsystem eingesetzt. Im Gegensatz zu den standardmäßigen Radargeräten mit einer Sendee- und einer Empfangsantenne ist hier eine Empfangsantenne mit einer Vielzahl von Sendeeantennen gekoppelt (LESSING 2009). Die Mehrfachantenne wird von einem PKW gezogen, so dass ein schneller Messfortschritt ermöglicht wird (Abbildung 43a-b). Durch diese Antennenkonfiguration können nicht nur Schichtgrenzen im Untergrund bestimmt werden, es wird auch kontinuierlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarimpulses im Untergrund gemessen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt ab von der Dielektrizitätskonstanten und damit vom Wassergehalt des Untergrundes (Abbildung 43c-d). Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die hydraulische Durchlässigkeit des Untergrundes oberhalb des Grundwasserspiegels und damit die Versickerungsfähigkeit für Niederschlagswasser abzuschätzen.

Mit der gleichen Zielsetzung wurden vom Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin refraktionsseismische (KORDANSKA 2011) und geoelektrische (SCHNEIDER 2011) Messungen durchgeführt (Abbildung 44). Auch hier wurde der Versuch unternommen, aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten seismischer Wellen und den spezifischen elektrischen Widerständen oberhalb und unterhalb des Grundwasserspiegels Aussagen über die hydraulische Durchlässigkeit abzuleiten. Wie bei den Bodenradarmessungen ergaben sich interessante Ansatzpunkte, es ist aber noch ein weiter Weg bis zu einem arbeitsfähigem Verfahren.

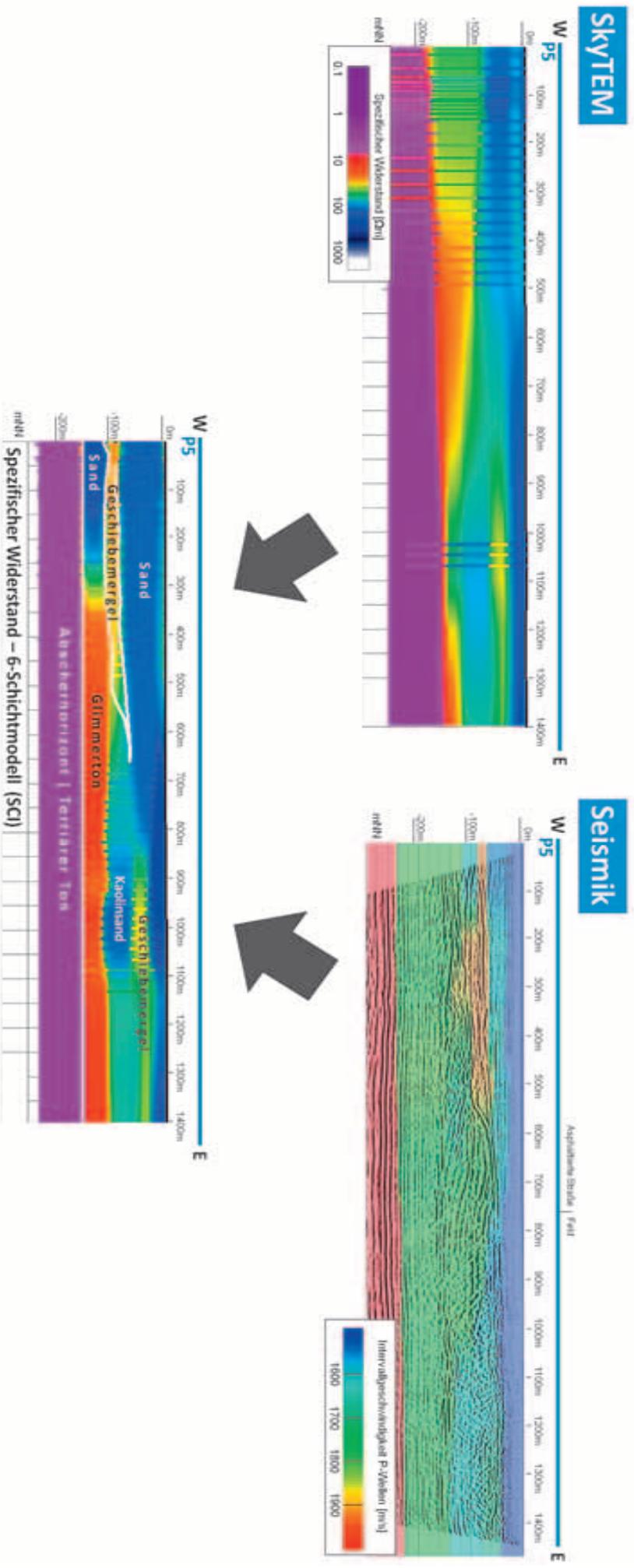


Abbildung 42: Kombination von SKYTEM und Reflexionsseismik, die Materialansprache der geologischen Schichten (Sand, Geschiebemergel, etc.) erfolgte aufgrund der spezifischen elektrischen Widerstände (nach BURSCHIL et al. 2012a).
 Combination of SKYTEM and reflection seismic, the identification of the underground layers (sand, till, etc.) is based on the specific electrical resistivities (after BURSCHIL et al. 2012a).

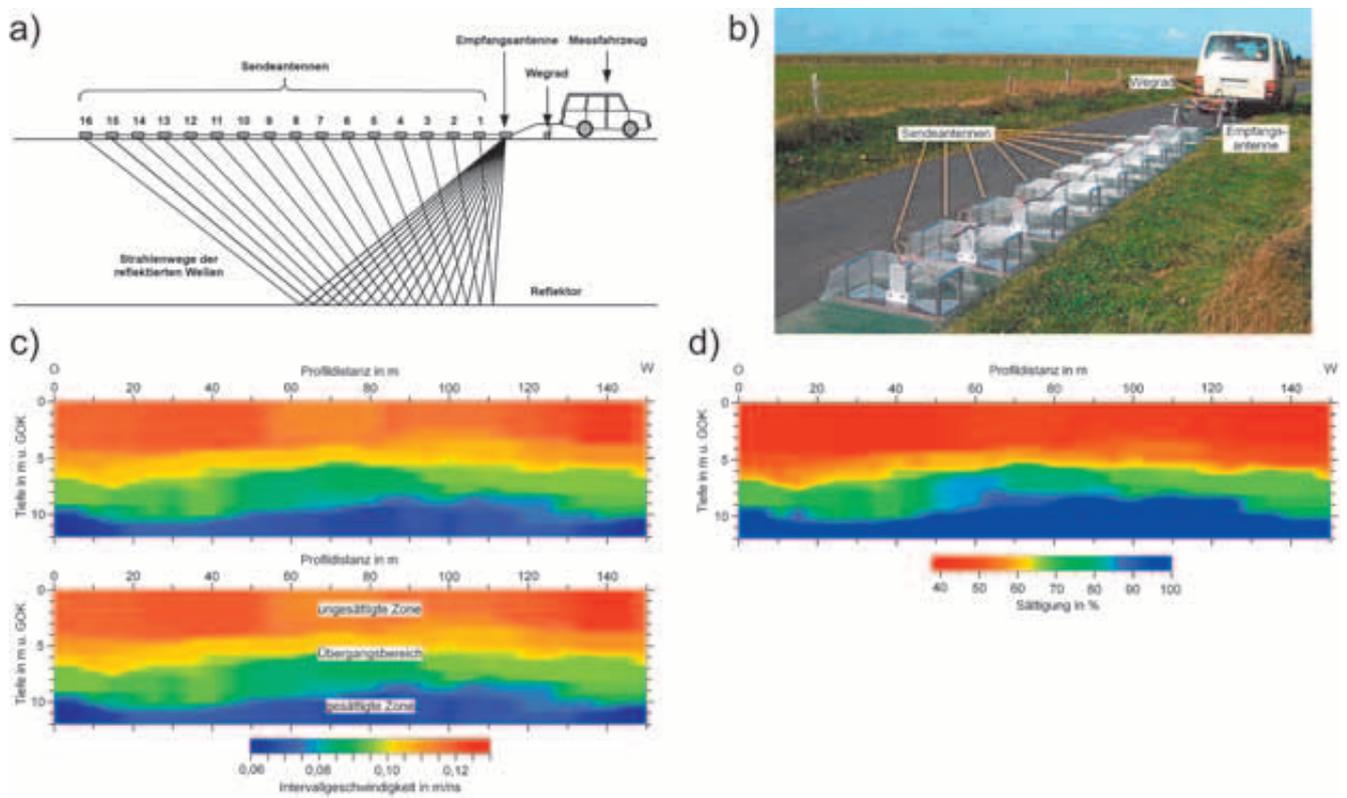


Abbildung 43: Bodenradarsystem der Universität Münster, a) Messprinzip, b) GPR Mehrkanalapparatur, c) Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarimpulses, d) daraus abgeleitete Verteilung des Wassergehalts im Untergrund (nach LESSING 2009).
 GPR system of the University of Münster, a) principle of multi-channel measurements, b) multichannel GPR instrumentation, c) radar pulse velocities obtained from multichannel GPR measurements, d) water content of the subsoil derived from radar pulse velocities (after LESSING 2009).

Ein weiteres Ziel der geophysikalischen Arbeiten auf Föhr lag in der verbesserten Interpretation von Widerstandsmessungen, u.a. auch der SkyTEM Ergebnisse. Bei Messungen im Bereich von Versalzungszone im Grundwasser werden sehr niedrige elektrische Widerstände gemessen, die sowohl auf salzwasserführende Sande als auch auf Tone zurückgeführt werden können. Eine Möglichkeit zur Unterscheidung beider Materialien ergibt sich durch NMR- (nuklear magnetische Resonanz) Messungen, bei denen die Wassermoleküle im Untergrund durch ein Magnetfeld polarisiert werden. Hierbei unterscheiden sich Sand

und Ton deutlich, unabhängig von der Salinität des Porenwassers. Die Anwendung dieses im Labor nachgewiesenen Effektes (ALALI 2011) sollte im Gelände erprobt werden. Daher wurden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Hannover) und der TU Berlin auf Föhr NMR Messungen durchgeführt, ergänzt durch Messungen der Spektralen Induzierten Polarisation (RONCZKA 2010). Die Ergebnisse sind auch hier ermutigend, es bleibt aber noch viel Arbeit, um ein einsatzfähiges Verfahren zur Unterscheidung von salzwasserführenden Sanden und Tonen zu entwickeln.



Abbildung 44: Geoelektrische Messungen der TU Berlin auf Föhr. Field crew of TU Berlin during geoelectrical measurements.

Die Ableitung hydraulischer und thermischer Untergrundparameter aus den SkyTEM Daten ist das Ziel einer weiteren Arbeit (GRABOWSKI 2012). Dazu wurden Grundwasserbohrungen, für die eine geophysikalische Bohrlochvermessung vorliegt, statistisch ausgewertet, um zu überprüfen, ob eine Korrelation zwischen der hydraulischen Durchlässigkeit des Untergrundes und dem spezifischen elektrischen Widerstand besteht. Dabei wurde eine überraschend deutliche Korrelation gefunden, die auch für andere Gebiete des Norddeutschen Küstenbereichs bestätigt wurde. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, für einen Grundwasserleiter die elektrischen Widerstände (zum Beispiel aus einer SkyTEM Befliegung) in hydraulische Durchlässigkeiten umzurechnen und so Änderungen dieser wichtigen hydraulischen Größe innerhalb des Grundwasserkörpers zu bestimmen. Da aus den SkyTEM Widerständen zwischen Sand, Ton und Geschiebemergel unterschieden werden kann und diese Materialien deutlich unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen (siehe Kapitel 8),

können aus den SkyTEM Daten auch die effektiven Wärmeleitfähigkeiten abgeleitet werden. Die Ableitung von hydraulischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit gilt allerdings lediglich für den Geestbereich, da in der Marsch bei vorherrschender Grundwasserversalzung aus den SkyTEM Widerständen nicht zwischen Ton und salzwasserführendem Sand unterschieden werden kann.

Ein geologisches Modell von Föhr, basierend auf einer Kombination von SkyTEM Daten und Bohrergebnissen, wurde von WILKE (2011) entwickelt. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, hydraulisch wichtige Kenngrößen, die aus den SkyTEM Widerständen abgeleitet werden, flächenhaft darzustellen. Beispielhaft ist in Abbildung 45 die Transmissivität (Produkt aus Mächtigkeit und hydraulischer Durchlässigkeit) des Grundwasserleiters dargestellt, wobei die von GRABOWSKI (2012) abgeleitete Relation von spezifischem elektrischen Widerstand und hydraulischer Durchlässigkeit verwendet wurde.

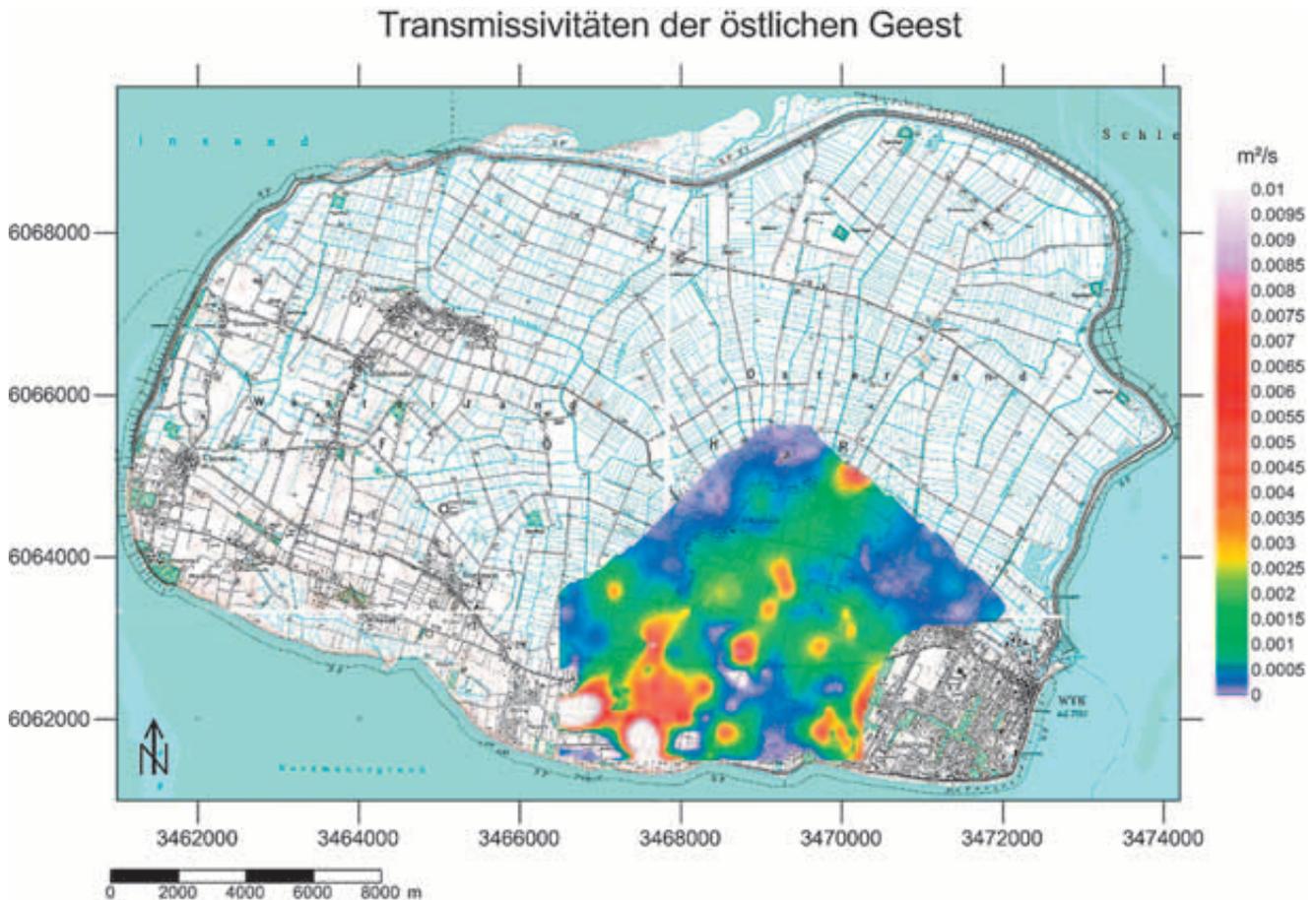


Abbildung 45: Transmissivität des Grundwasserleiters im östlichen Bereich der Insel Föhr (WILKE 2011) unter Verwendung der Relation von hydraulischer Durchlässigkeit und spezifischem elektrischen Widerstand nach GRABOWSKI (2012).
 Aquifer transmissivity in the Eastern part of the Island of Föhr (WILKE 2011), the relation of hydraulic conductivity and specific electrical resistivity from GRABOWSKI (2012) was used.

5 Ein Blick in den Untergrund der Insel Föhr

➤ **Wolfgang Scheer, Bernd König,
Frank Steinmann**

5.1 Datengrundlage und zusätzliche Untersuchungen im Rahmen des Projektes CLIWAT

Durch die Erschließungsmaßnahmen des Wasserbeschaffungsverbandes Föhr sowie durch die Arbeiten zur Ausweisung der beiden Wasserschutzgebiete der Insel lagen schon vor Beginn des Projektes viele hydrogeologische Informationen vor, die sich allerdings weitgehend auf die Bereiche um die Wasserfassungen auf den Geestkernen konzentrierten (u. a. GLA 1991, STUA SCHLESWIG 2006). Dort wurden **zahlreiche Bohrungen** zum Bau von Förderbrunnen und Grundwassermessstellen durchgeführt, deren Schichtenverzeichnisse jeweils, punktuell an ihrem Standort, einen guten Einblick in die Untergrundverhältnisse geben. Zudem existieren in den Geestgebieten noch Bohrinformationen von überwiegend flachen Hauswasserbrunnen sowie von einigen Erdwärme-Bohrungen. Dabei zeigt sich gerade in den tieferen Bohrungen ein sehr wechselhafter Schichtaufbau, der etliche

Fragen, besonders zur Entstehung und zur 3-dimensionalen Verbreitung der Gesteine aufwarf.

In der Marsch existieren, aufgrund der dünnen Besiedelung und durch das dort oberflächennah anstehende Salzwasser, das den Bau von Trinkwasserbrunnen nicht zulässt, nur wenige Informationen aus Bohrungen. Die flächenhafte Verteilung von Untergrundinformationen auf der Insel ist daher sehr ungleichmäßig.

In der Abbildung 46 wird zur Orientierung eine Übersicht der wichtigsten Bohrungen für Grundwassermessstellen (blaue Punkte) und Förderbrunnen (rote Punkte) gegeben. In der Marsch sind die Standorte der acht Sondierbohrungen markiert, die dort zur Verdichtung der Daten für das CLIWAT-Projekt durchgeführt wurden.

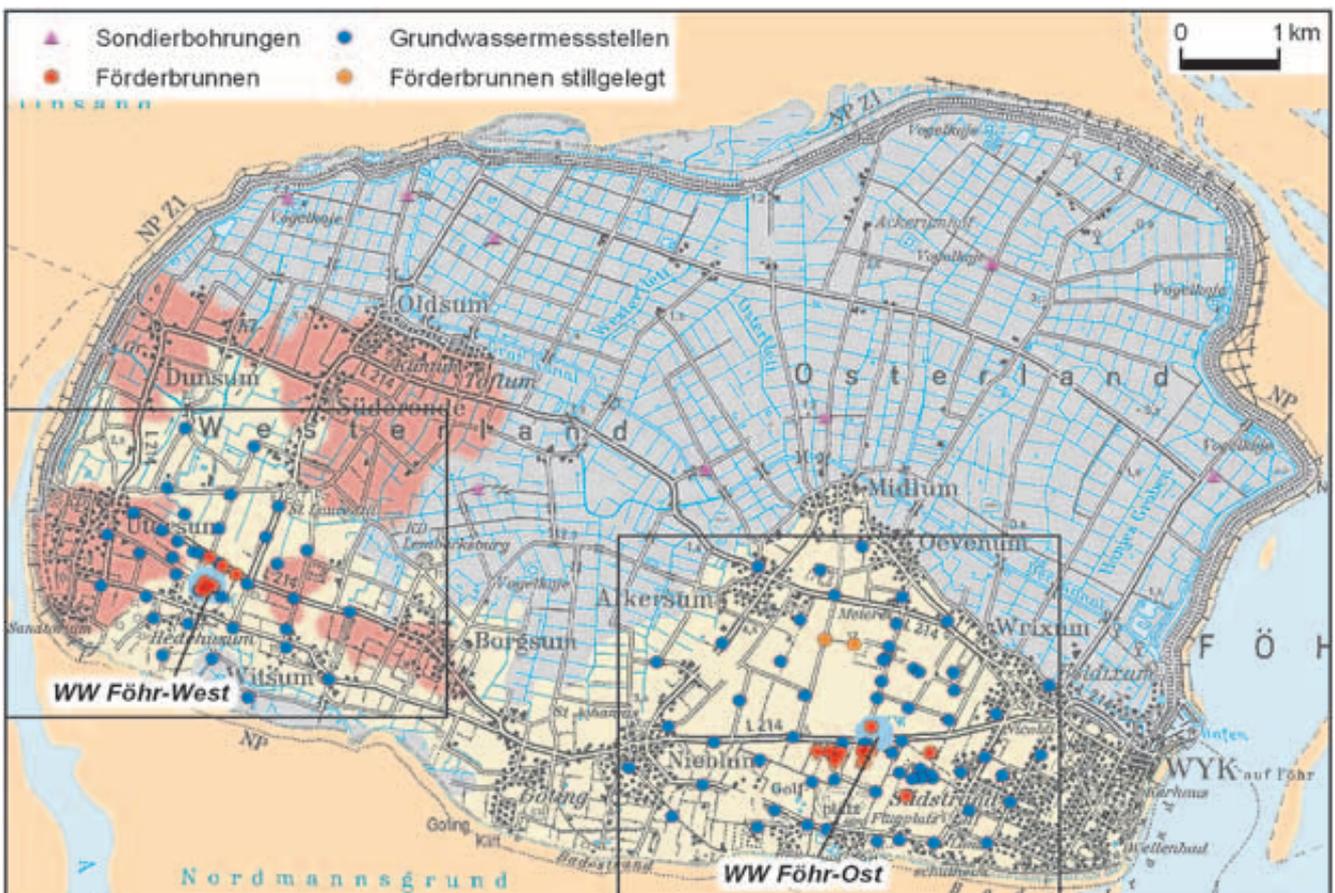


Abbildung 46: Lage der Wasserwerke, Förderbrunnen, Grundwassermessstellen und der im Jahre 2011 durchgeführten Sondierbohrungen auf der Insel Föhr (Hintergrund: Geologische Karte der oberflächennahen Schichten nach Abbildung 6).

Location map of water works, production wells, observation wells and the drillings performed 2012 (background: geological map of near surface layers shown in Fig. 6).

Um ein Untergrundmodell der gesamten Insel erstellen zu können, wurden im Projekt CLIWAT unterschiedliche geophysikalische Untersuchungsverfahren eingesetzt. Sie ermöglichen sowohl eine bessere Korrelation der Bohrdaten als auch in Bereichen, in denen keine Bohrinformationen zur Verfügung stehen, wichtige Hinweise auf den Schichtaufbau und die Süß-Salzwasserverbreitung. Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Verfahren ist im Kapitel 4 nachzulesen.

5.2 Hydrogeologischer Aufbau des Untergrundes, nutzbare Grundwasserleiter

Der Aufbau des tieferen Untergrundes ist in der Abbildung 3 (Kapitel 2) dargestellt. Die älteren Schichten sind an der Westküste nahe-

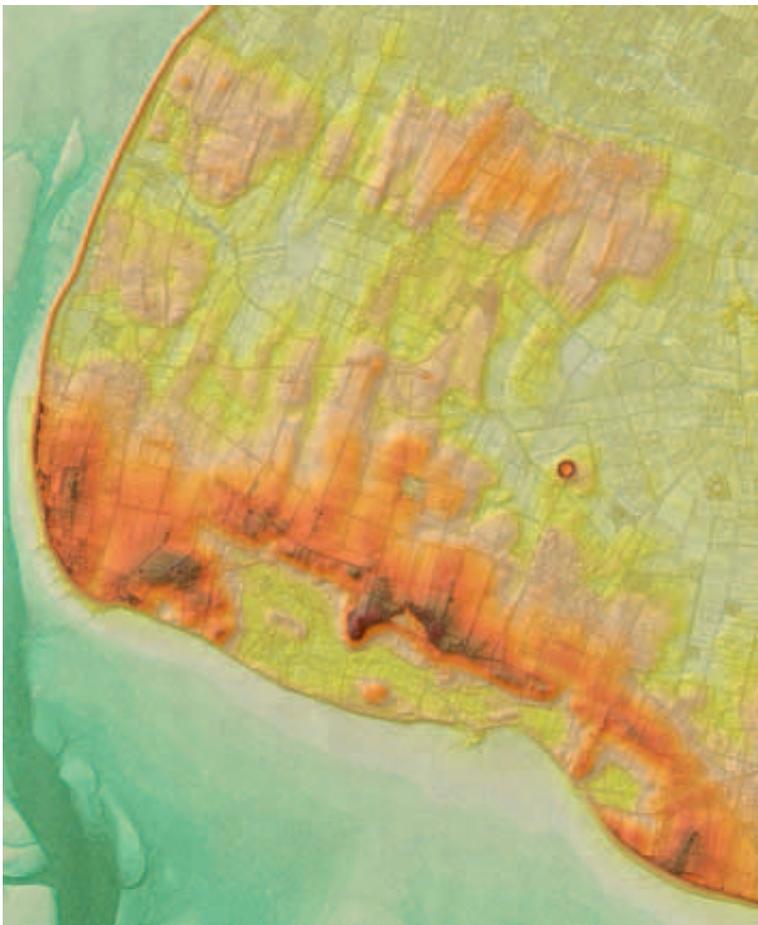


Abbildung 47: Höhenmodell der westlichen Geest, eiszeitliche Stauchungsstrukturen werden an der Geländeoberfläche nachgezeichnet (© DGM1, LVermA-SH).

Elevation model of the Western Geest area, glacial thrust structures can be traced at the terrain surface.

zu horizontal gelagert und frei von erkennbaren tektonischen Störungszonen. Die Ergebnisse der im Projekt CLIWAT auf der Insel durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen bestätigten dieses Bild, lassen aber in den jungtertiären Ablagerungen bis in eine Tiefe von etwa 150 m unter Gelände die im Kapitel 4 schon beschriebenen glazialtektonischen Stauchungsstrukturen erkennen. Das heißt, dass die Schichten bis zu einem bestimmten Tiefenbereich durch Druck und Schub des Gletschereises deformiert und aufgeschuppt wurden. Das so entstandene **Stauchungsmuster** paust sich im Westen der Insel bis an die Geländeoberfläche durch (Abbildung 47).

Die Orientierung der Stauchungen in SSW-NNE Richtung lässt auf einen Eisvorstoß aus östlicher Richtung schließen. Die Kenntnis der räumlichen Ausdehnung der Stauchungsstrukturen ist erforderlich, um die Grundwasserströmungsverhältnisse auf der Insel zu verstehen und im Modell abbilden zu können.

Wasserwirtschaftlich relevant sind in Schleswig-Holstein die Sedimente aus dem Tertiär und Quartär, da nur in diesen Gesteinen nutzbare Grundwasserleiter zu finden sind. Auf Föhr kommen für eine Nutzung als Trink- und Brauchwasser die eiszeitlichen Sande in den Geestkernen und die unterlagernden Sande des Pliozäns (Kaolinsande) in Frage. Im Bereich der Marsch überlagert nur eine geringmächtige Süßwasserschicht das dort flächenhaft bis nahe an die Geest verbreitete Salzwasser. Nutzbare Grundwasserleiter sind dort daher nicht vorhanden. In der Abbildung 48 stellen die einzelnen Linien jeweils die Fluglinien der SkyTEM Befliegung dar, die entsprechend der für eine Tiefe von ca. 10 m unter Gelände ermittelten spezifischen elektrischen Widerstände eingefärbt sind. Die roten Bereiche haben einen niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand und zeigen die Verbreitung des Salzwassers in der Marsch und in der Godel-Niederung.



Abbildung 48: Verbreitung von Süß- (blau) und Salzwasser (rot) in einer Tiefe von etwa 10 m unter Gelände als Ergebnis der SkyTEM Befliegung.

Distribution of freshwater (blue) and saltwater (red) in a depth of approximately 10 m below surface as result of the Sky-TEM survey.

5.2.1 Eiszeitliche Ablagerungen

In den oberflächennahen eiszeitlichen Ablagerungen der Geestkerne sind flächenhaft zwei Grundwasserleiter ausgebildet, die über weite Bereiche, wo geringdurchlässige Trennschichten fehlen, ein hydraulisch zusammenhängendes System bilden.

Die gesamte Schichtfolge ist weitgehend durch die Tätigkeit der Gletscher während der vorletzten Vereisungsphase (Saalevereisung) entstanden. Die Gletscher haben den Bereich des Untersuchungsgebietes überfahren und das von ihnen transportierte Gesteinsmaterial wurde während des Abtauens der Eismassen in Form von Schmelzwassersanden wechselnder Korngrößen und als tonig-schluffiges Moränenmaterial, untergeordnet auch als feinkörnige Beckensedimente, abgelagert.

In ihrem internen hydrogeologischen Aufbau unterscheiden sich die beiden Geestkerne in einigen Punkten. In den folgenden Abschnitten sind hierzu die Lagepläne mit Messstellen und Förderbrunnen der beiden Wasserwerke der Insel sowie exemplarisch zwei geologische Profilschnitte dargestellt (Abbildung 49 – 52).

Geestkern Föhr-Ost

Im gesamten östlichen Geestkörper sind flächenhaft mehrere zehner Meter mächtige eiszeitliche (pleistozäne) Schmelzwassersande verbreitet, die etwa in ihrem oberen Drittel durch die Einschaltung eines Horizontes aus schluffig-tonigen, gering wasserdurchlässigen Sedimenten in zwei Grundwasser führende Horizonte unterteilt werden:

Der **oberflächennahe Grundwasserleiter** befindet sich in dem zumeist 10-15 m mächtigen oberen Abschnitt der vorwiegend mittel- bis grobsandig ausgebildeten pleistozänen Schmelzwassersande. Er wird im überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes durch einen Horizont aus schluffig-tonigen Geschiebelehm-/Geschiebemergellagen, Beckenablagerungen und schluffigen Feinsanden hydraulisch vom unterlagernden pleistozänen Hauptgrundwasserleiter getrennt. Im höheren Bereich des oberflächennahen Grundwasserleiters fehlen schwer wasserdurchlässige Deckschichten vollständig.

Abbildung 49:
Lageplan des östlichen Geestkerns der Insel Föhr mit Förderbrunnen, Grundwassermessstellen und dem Verlauf des Profilschnittes in Abbildung 50.

Location map of the eastern Geest core with production wells, observation wells and course of the cross section shown in Fig. 50.

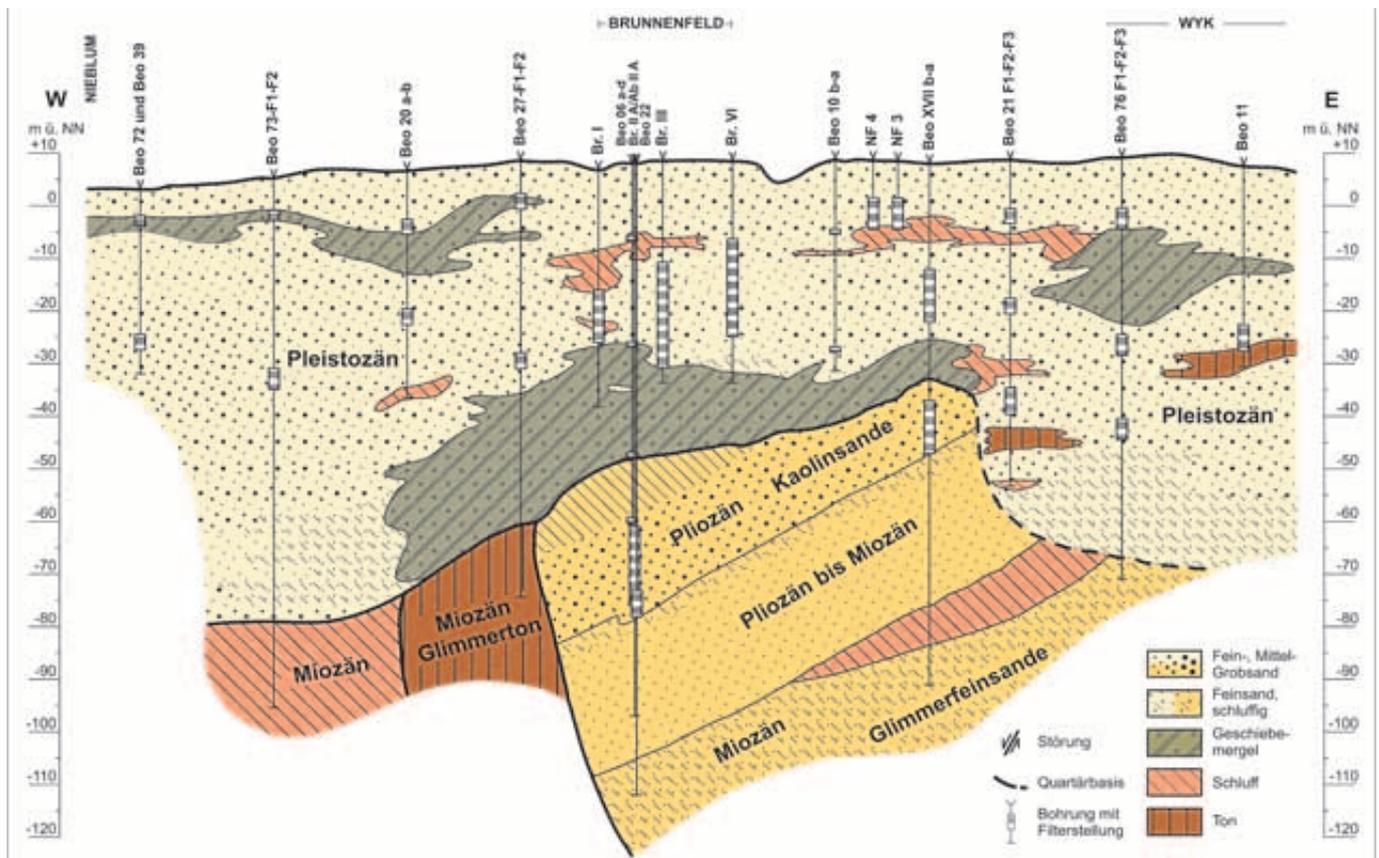
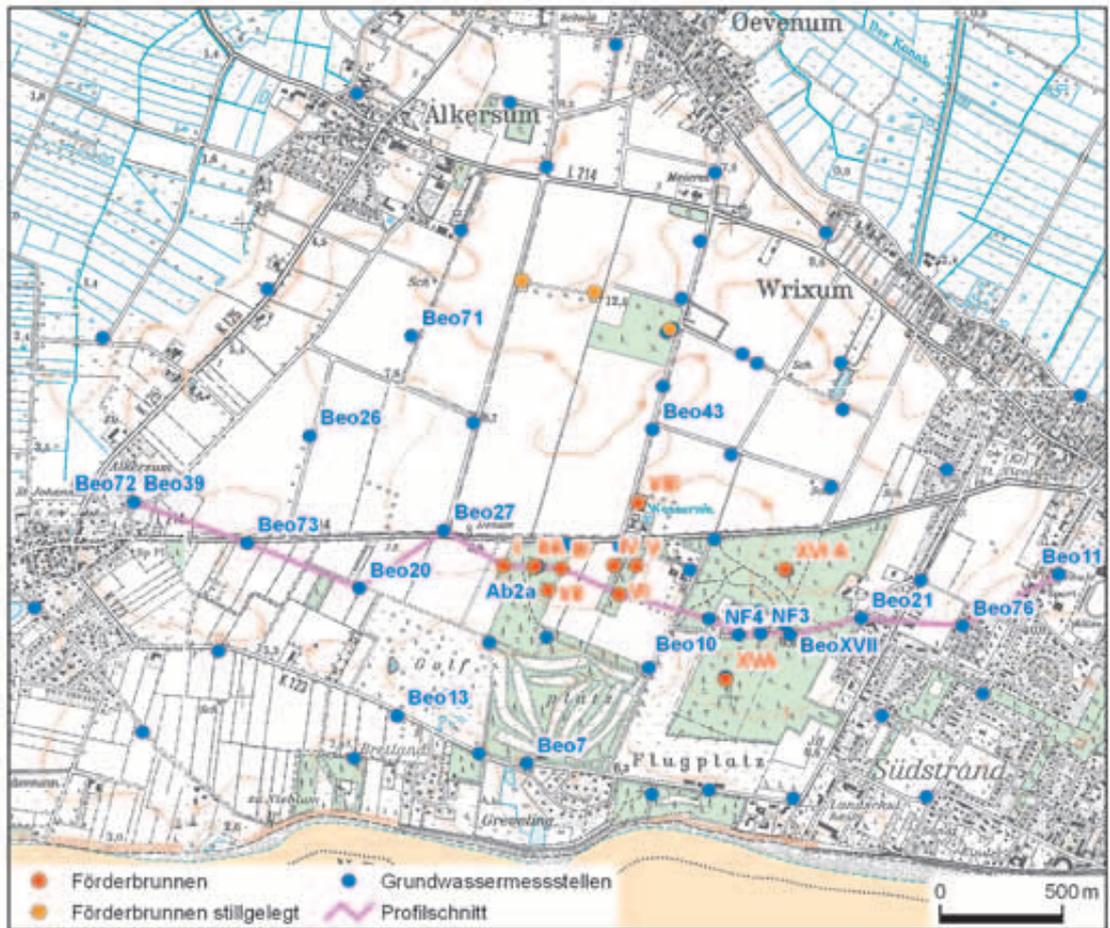


Abbildung 50: Hydrogeologischer Profilschnitt durch den östlichen Geestkern der Insel Föhr von West nach Ost (der Verlauf des Profilschnittes ist in Abbildung 49 dargestellt).

Hydrogeological cross-section through the eastern Geest core of Föhr from West to East (the course of the cross section is shown in Fig. 49).

Der **pleistozäne Hauptgrundwasserleiter** umfasst den unteren Abschnitt der Schmelzwassersande und stellt den oberen Nutzhorizont des Wasserwerkes Föhr-Ost dar, in dem mit Ausnahme der tieferen Brunnen Br. II A und Br. XVI A alle Förderbrunnen stehen. Seine Mächtigkeit variiert zumeist zwischen 15 und 25 m, größere Mächtigkeiten von 45-55 m sind vor allem am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes festzustellen. Wie der obere Abschnitt der pleistozänen Schmelzwassersande setzt sich auch der Hauptgrundwasserleiter vorwiegend aus Mittel- bis Grobsanden zusammen, wobei allerdings häufiger feinsandige Partien auftreten. In einigen Gebieten ist die oben beschriebene hydraulische Trennung zwischen dem oberflächennahen Grundwasserleiter und dem pleistozänen Hauptgrundwasserleiter nicht vorhanden.

Geestkern Föhr-West

Die Förderbrunnen des Wasserwerkes Föhr-West sind in den pleistozänen Schmelzwassersanden des westlichen Geestkörpers verfil-
 tert, die zusammen mit stellenweise unterlagernden, jungtertiären Kaolinsanden ein hydraulisch **zusammenhängendes Grundwasserleitersystem** bilden. Dieses ist im gesamten Südteil des westlichen Geestkerns ausgebildet und stellt den einzigen Nutzhorizont des Wasserwerkes Föhr-West dar. Nur in wenigen Teilbereichen des Untersuchungsgebietes sind über diesem Nutzhorizont geringmächtige, schluffig-tonige Deckschichten verbreitet. Nach unten wird der Nutzhorizont flächenhaft durch schluffige Feinsande, Schluffe und Tone des Jungtertiärs begrenzt, aus denen kein nutzbares Grundwasser gewinnbar ist. Die pleistozänen Schmelzwassersedimente

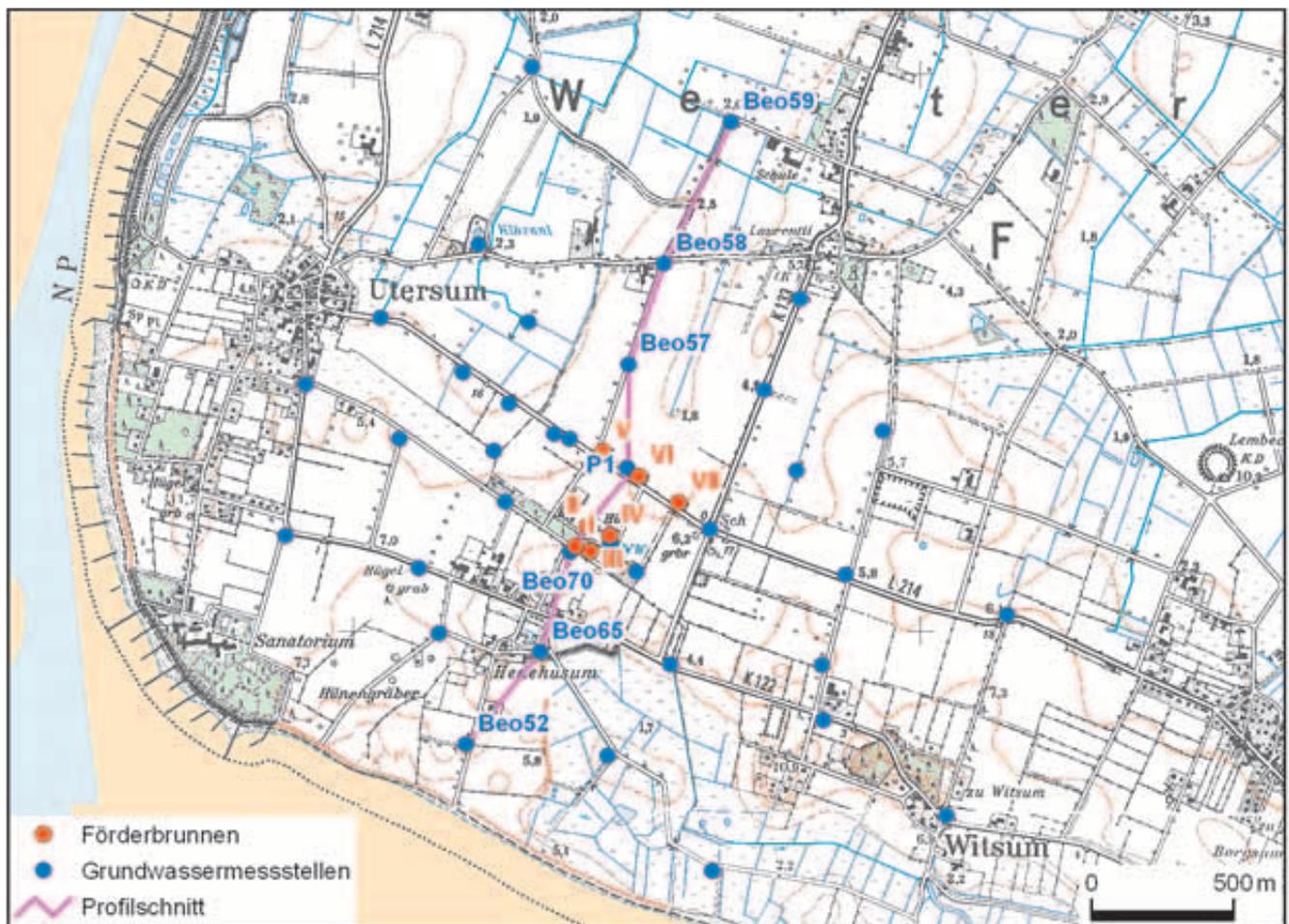


Abbildung 51: Lageplan des westlichen Geestkerns der Insel Föhr mit Förderbrunnen, Grundwassermessstellen und dem Verlauf des Profilschnittes in Abbildung 52.

Location map of the western Geest core of Föhr with production wells, observation wells and the course of the cross section shown in Fig. 52.

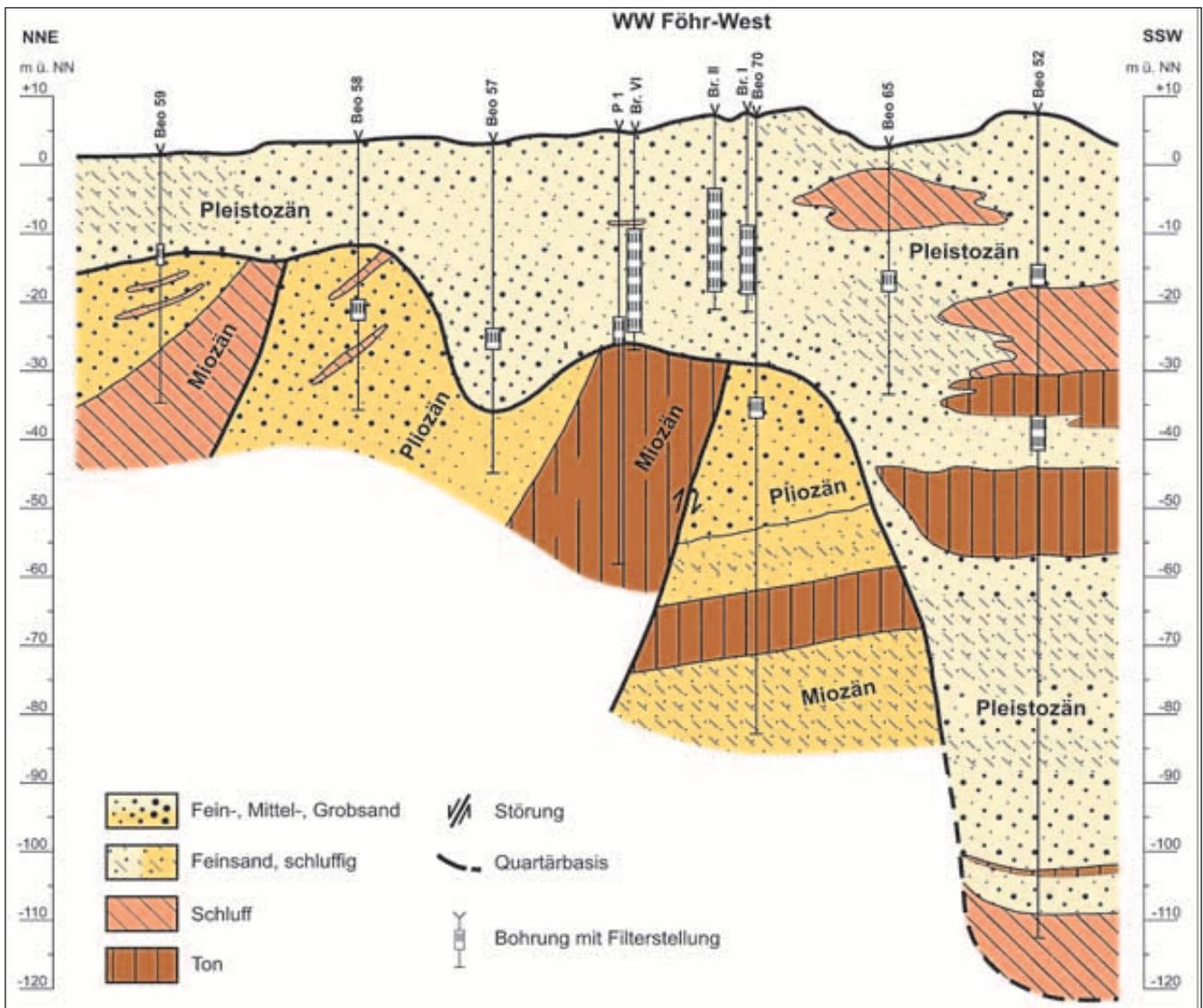


Abbildung 52: Hydrogeologischer Profilschnitt durch den westlichen Geestkern der Insel Föhr von Nord nach Süd (der Verlauf des Profilschnittes ist in Abbildung 51 dargestellt).
 Hydrogeological cross section through the western Geest core of Föhr from North to South (the course of the cross section is shown in Fig. 51).

weisen im westlichen Geestkern meistens eine Mächtigkeit von etwa 30-40 m auf und setzen sich im oberen Abschnitt vorwiegend aus Fein- und Mittelsanden zusammen. Nur in einem kleineren Bereich im NW existiert eine annähernd zusammenhängende Überdeckung des Nutzhorizontes mit gering wasserdurchlässigen Sedimenten. Hier ist oberflächennah eine wenige Meter mächtige Deckschicht aus tonigem Geschiebemergel entwickelt, die nach W und S hin auskeilt. Im weitaus größeren Teil des Untersuchungsgebietes, vor allem im Umfeld der Förderbrunnen, sind keine Grundwasser schützenden Deckschichten über dem Nutzhorizont entwickelt.

Tiefere eiszeitliche Ablagerungen

Vor allem im östlichen Geestkern werden die oberflächennahen, überwiegend sandig ausgebildeten Ablagerungen häufig von weiteren eiszeitlichen Gesteinen unterlagert, die über-

wiegend aus geringdurchlässigen Geschiebemergeln mit nur untergeordnet eingeschalteten sandigen Bereichen bestehen. Im Verlauf der **eiszeitlichen Rinnen** schneiden sich diese Sedimente bis in Tiefen von über 120 m unter Gelände in die unteren tertiären Schichten ein (Abbildung 55).

5.2.2. Jungtertiäre Ablagerungen

Die an der Basis der eiszeitlichen Schichtfolge zu findenden Sande, Schluffe und Tone aus dem Jungtertiär sind, wie schon beschrieben, in ihrer Lagerung durch eistektonische Vorgänge stark überprägt. Für die Gewinnung von Grundwasser sind nur die in einigen Bereichen vorhandenen jüngsten tertiären Schichten, die so genannten Kaolinsande relevant.

Die **Kaolinsande** des Pliozäns (Jungtertiär) stellen den unteren Nutzhorizont des Wasserwerkes Föhr-Ost dar, aus dem die beiden För-

derbrunnen Br. II A und Br. XVI A Grundwasser entnehmen. Nach den Ergebnissen der Bohrungen sind sie hier in Form einer horstartigen Untergrundstruktur (Aufwölbung) in einem räumlich eng begrenzten Bereich, der sich zwischen dem alten Brunnenfeld und dem westlichen Stadtrand von Wyk erstreckt, verbreitet. Die Ergebnisse der geophysikalischen Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass die jungtertiären Sande zudem entlang von mehreren, in NNE-SSW-Richtung verlaufenden Stauchstrukturen sowohl im östlichen wie auch im westlichen Geestkern vor der eiszeitlichen Erosion erhalten geblieben sind. Sie stellen damit wahrscheinlich mehrere, in dieser vorgegebenen Richtung parallel verlaufende lokale Grundwasserleiter dar.

5.2.3. Nacheiszeitliche Ablagerungen in der Marsch und Godel-Niederung

Die eiszeitlichen Sedimente, die in den Geestkernen im Süden der Insel flächenhaft an der Geländeoberfläche zu finden sind, tauchen in der Marsch und in der Godel-Niederung unter die in der Nacheiszeit (Holozän) im Einflussbereich der Tide vom Meer abgelagerten **Kleie und Wattsande** ab. Die Mächtigkeit dieser Sedimente variiert von wenigen Dezimetern am Geestrand bis zu über 10 m im Nordosten. Vor ihrer Eindeichung gegen Ende des 15. Jahrhunderts drang das Meerwasser bei Tidehochwasser täglich über ein weit verzweigtes System von natürlichen Prieln in diese Flächen ein. Bei Sturmfluten wurde die Marsch bis zu dieser Zeit regelmäßig vom Salzwasser der Nordsee überschwemmt.

Heute wird die Marsch durch den Landeschutzdeich geschützt und über ein regelmäßig angelegtes System von Entwässerungsgräben drainiert. Über dem im Untergrund vorhandenen Salzwasser konnte sich in der Marsch eine zwar geringmächtige, aber stabile Süß-

wasserschicht bilden, die eine Nutzung der Flächen als Weide und Ackerland ermöglicht.

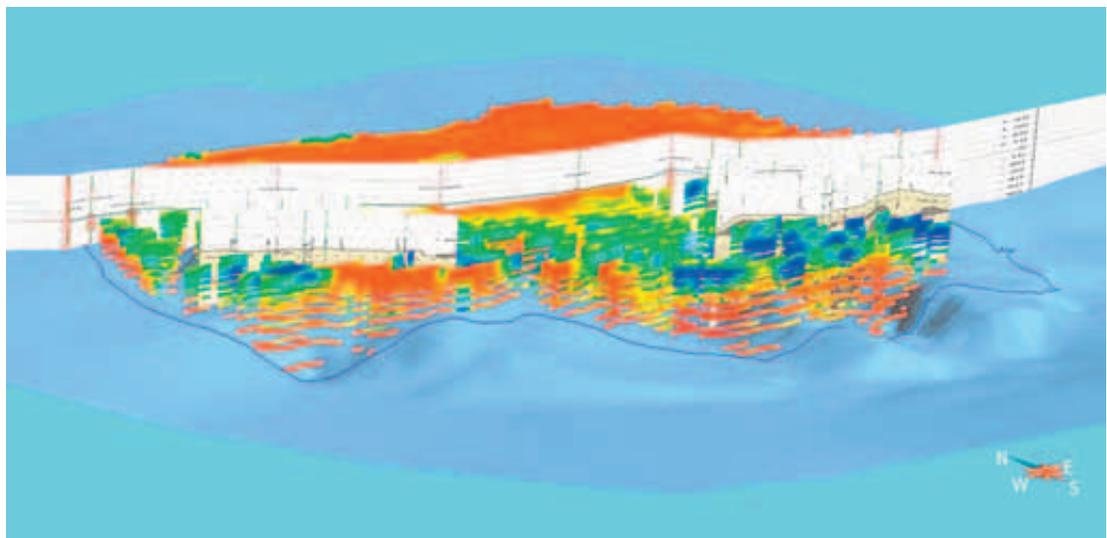
5.3. Das digitale dreidimensionale Geologische Modell

Die Modellierung durch den Geologischen Dienst Schleswig-Holstein erfolgte mit der Software GOCAD® der Firma PARADIGM, die auch von zahlreichen anderen Geologischen Diensten und Universitäten in Deutschland eingesetzt wird. Mit dieser Software lassen sich komplexe Untergrundstrukturen räumlich abbilden und bearbeiten, wobei eine Vielzahl von Werkzeugen genutzt werden kann, um zum Beispiel Daten miteinander zu verschneiden, Schichtgrenzen und -mächtigkeiten aufeinander abzustimmen oder in geophysikalischen Untersuchungen bestimmte Gesteinsparameter abzubilden.

Für das **Modell Föhr** wurden zunächst die in Form von Bohrprofilen, hydrogeologischen Profilschnitten und Karten vorliegenden analogen Daten zum Aufbau des digitalen dreidimensionalen Geologischen Modells im Rechner zu einem Ausgangsmodell zusammengeführt. In einem weiteren Schritt konnte das Modell dann anhand der ebenfalls in das Modell importierten Daten der geophysikalischen Untersuchungen ergänzt und weiter verfeinert werden (Abbildung 53). Dabei wurden die relevanten geologischen Einheiten im Modell herausgearbeitet und als flächenhaft übereinander lagernde Schichten modelliert.

In der Abbildung 54 ist als Beispiel ein Bearbeitungsschritt der Modellierung dargestellt, in dem eine Modellschicht (hier die Unterkante der tertiären Sande) an die Schichtgrenzen (aus den hydrogeologischen Profilschnitten und den geophysikalischen Daten der elektromagnetischen SkyTEM Erkundung) angepasst wird. Das Ergebnis ist letztendlich ein Modell mit

Abbildung 54:
Modellierung einer Modellfläche (Basis tertiäre Sande) mit hydrogeologischen Profilschnitten und elektromagnetischen SkyTEM Daten. Blick auf Föhr aus SSW.
Modelling of a model layer (base of Tertiary sands) using hydrogeological cross sections and electromagnetic SkyTEM data model. View direction SSW.



insgesamt 12 Schichten, das die vier eiszeitlichen und zwei tertiären Wasserleiter sowie sechs geringdurchlässige Trennschichten räumlich abbildet. In der Abbildung 55 ist als weiteres Beispiel die fertig modellierte Basisfläche der eiszeitlichen Ablagerungen dargestellt. Die tiefen, in blau eingefärbten Bereiche

markieren den Verlauf der eiszeitlichen Rinnen, in rot sind die hoch gelegenen Flächen der Quartärbasis im Westen von Föhr zu erkennen. Die drei Profilschnitte zeigen den Modellaufbau der überlagernden Schichten, wobei die blauen Linien die Basis des Hauptwasserleiters nachzeichnen.

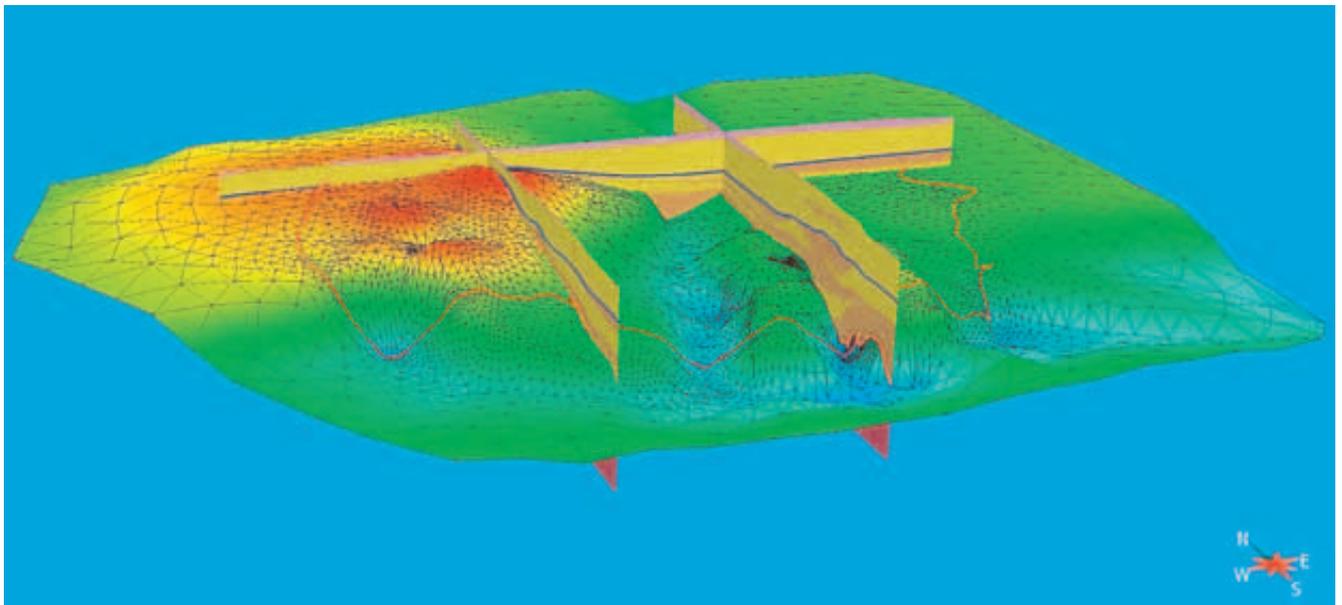


Abbildung 55: Modellergebnis: fertig modellierte Basisfläche der eiszeitlichen Ablagerungen mit drei Konstruktionsschnitten.
Modelling result: completely modelled base of Quaternary layers in 3 steps of model construction.

Der in Abbildung 56 in einem vereinfachten, im Maßstab stark überhöhten schematischen Schnitt zu erkennende Schichtaufbau zeigt zu-

sammenfassend die wichtigsten hydrogeologischen Elemente im Untergrund der Insel.

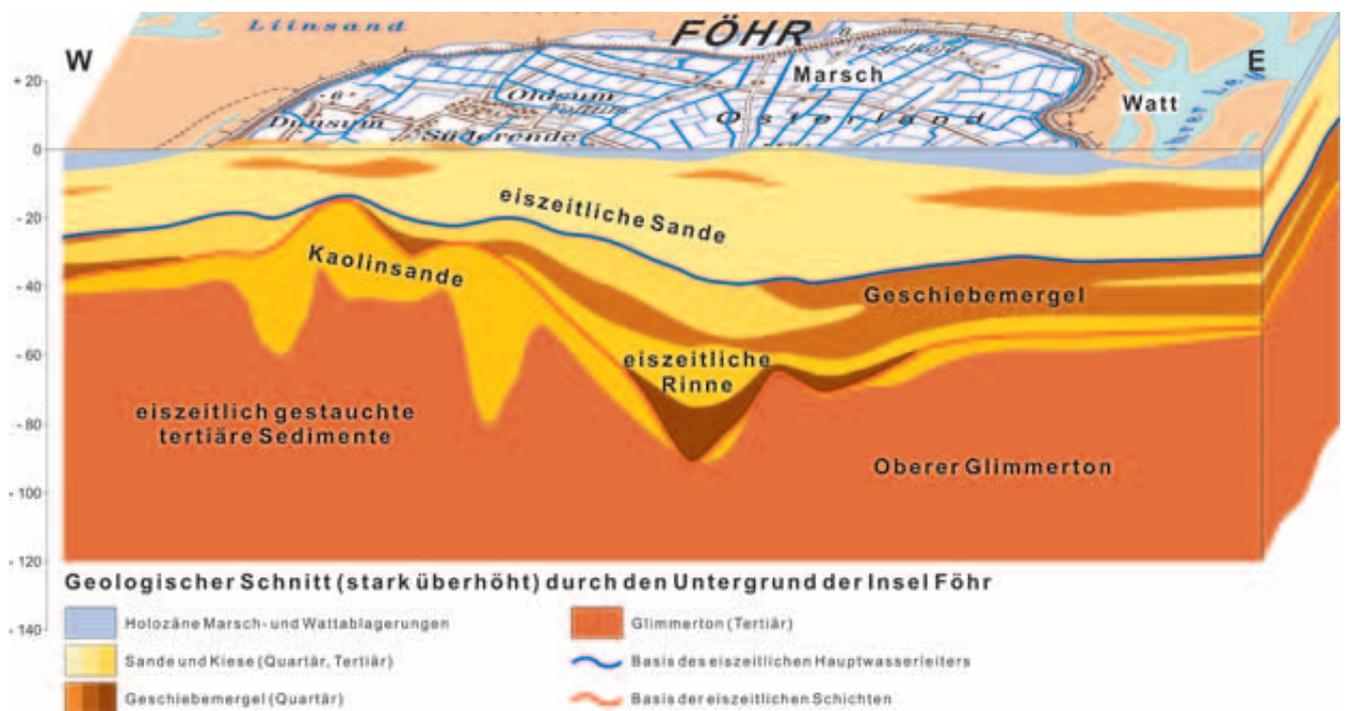


Abbildung 56: Blockbild/Geologischer Schnitt durch die Insel Föhr von West nach Ost (violett: Marsch oder Watt, hellgelb: flache eiszeitliche Sande).
Geological cross section of Föhr from West to East (purple: Marsch or tidal flat (Watt), light yellow: shallow glacial sand).

5.4 Grundwasserströmungsverhältnisse

Im Untergrund von Inseln, die von Meerwasser umgeben sind, bildet sich entsprechend den herrschenden hydrogeologischen Verhältnissen eine **Süßwasserlinse** aus, die, bedingt durch das geringere spezifische Gewicht des Süßwassers, auf dem Salzwasser schwimmt (Abbildung 57). In der Wissenschaft wird die vertikale Ausdehnung nach der GHIJZEN-

HERZBERG-Gleichung beschrieben, nach der, vereinfacht gesagt, pro Meter Süßwasser im Grundwasserleiter oberhalb des Meeresspiegels die Süßwasserlinse etwa 40 Meter unter das Meeresniveau reicht. Begrenzt wird die Süßwasserlinse lateral normalerweise etwa durch den Verlauf der Uferlinie.

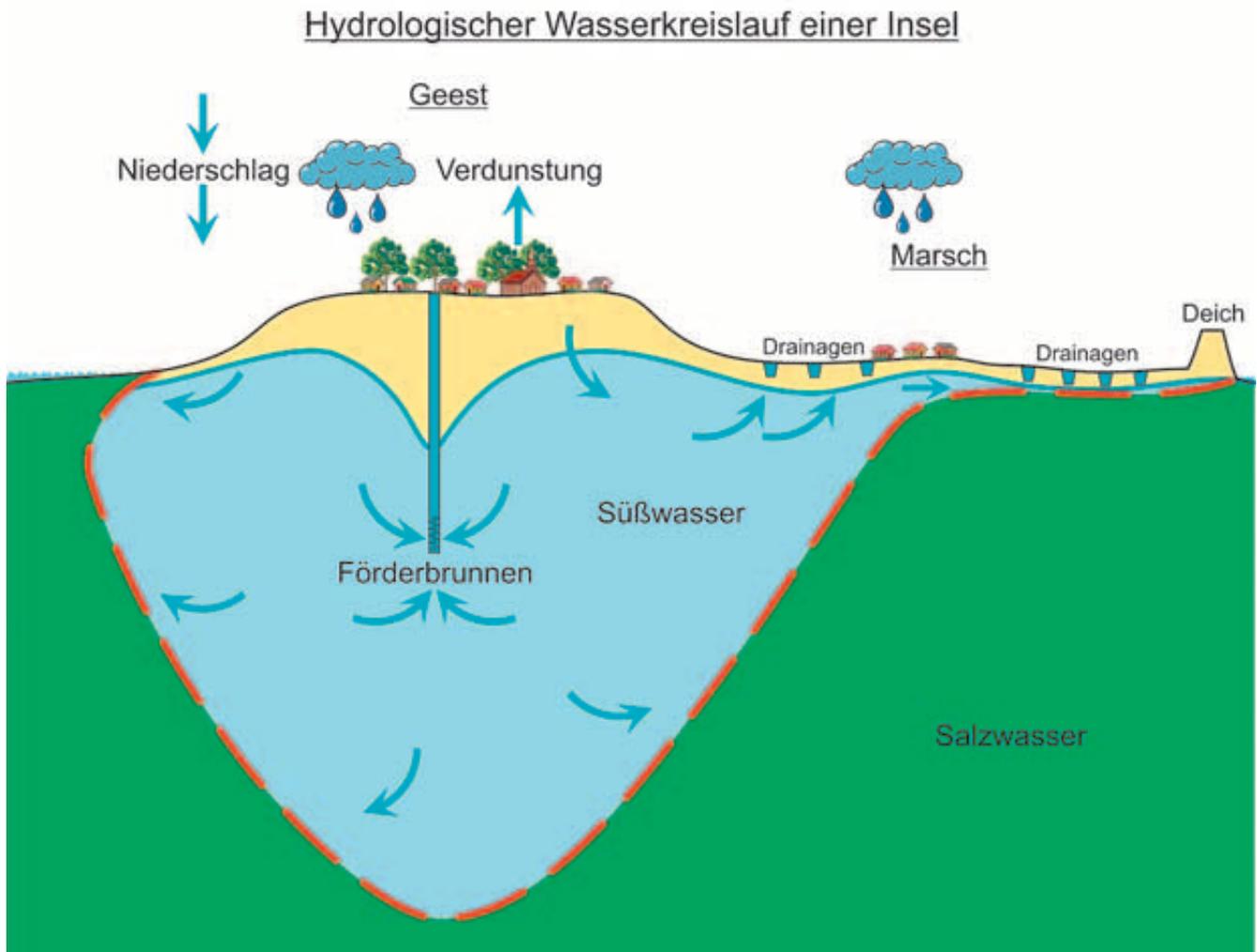


Abbildung 57: Schema des Wasserkreislaufs auf einer Insel mit Ausbildung der Süßwasserlinse.

Water cycle on an island (schematic) with freshwater lens.

Die neueren Kenntnisse über die Grundwasserströmungsverhältnisse auf der Insel Föhr wurden hauptsächlich im Rahmen der hydrogeologischen Vorarbeiten zur Veränderung der Wasserschutzgebiete (Kapitel 6.4) und zur Neubeantragung des Wasserrechts gewonnen (STUA SCHLESWIG 2006, GEOC 2010a). Gemäß der Zielsetzung dieser Untersuchungen beschränken sich die Auswertungen auf den Süßwasserbereich in den Grundwassergewinnungsgebieten der beiden Geestkerne. Dennoch bilden die aus den vorgenannten Arbeiten vorliegenden Grundwasserstandsmessungen und Gleichenspläne eine wertvolle Datengrundlage für weitere Untersuchungen und wurden im Rahmen des CLIWAT-Projektes zur

Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells herangezogen (Kapitel 7).

Abbildung 58 zeigt beispielhaft einen Grundwassergleichensplan für den pleistozänen Hauptgrundwasserleiter im Grundwassergewinnungsgebiet Föhr-Ost. Der Plan stellt die Linien gleicher Grundwasserspiegelhöhe dar, die durch Interpolation der an den Messstellen im Hauptgrundwasserleiter zum angegebenen Stichtag erhobenen Messwerte konstruiert wurden (Kapitel 3.5). Deutlich ist im Bereich des östlichen Geestkerns eine zweigeteilte Grundwasserkalotte zu erkennen. Die natürliche Grundwasserströmung, die vom Zentrum des Geestkerns allseitig zur Küste und in die

Marschenniederungen gerichtet war, wird durch die Grundwasserentnahme aus den Förderbrunnen stark überprägt. Im gesamten Bereich des Brunnenfeldes ist eine größere Pumpmulde entwickelt, die als Eindellung der Grundwasserspiegelfläche in Erscheinung tritt und die natürliche Grundwasserlinse in eine östliche und eine westliche Grundwasserkuppe teilt. Um die Förderbrunnen, die in den Wochen vor der Stichtagsmessung im Dauerbetrieb beaufschlagt waren, sind teilweise einzelne Absenkungstrichter ausgebildet. Von den flach ausgebildeten Grundwasserkuppen strömt Grundwasser nach außen in die Marsch und zur Küste hin ab. Ein Teil des Grundwassers fließt aber auch der vorgenann-

ten Pumpmulde zu und wird von den Förderbrunnen gefasst. Die magentafarbene Linie in Abbildung 58 stellt das Einzugsgebiet im Hauptgrundwasserleiter dar. Die Grundwasserströmungsverhältnisse und damit auch die Größe und die Form von Brunneneinzugsgebieten sind neben der Höhe der Grundwasserentnahme und ihrer Verteilung auf die einzelnen Brunnen auch von hydrologischen, jahreszeitlich unterschiedlichen Einflussgrößen wie Niederschlagshöhe und -verteilung abhängig. Auf der Insel Föhr ist zusätzlich der Gezeiten Einfluss zu beachten, da in den gespannten Grundwasserleitern tidebedingte Wasserstandsschwankungen auftreten.

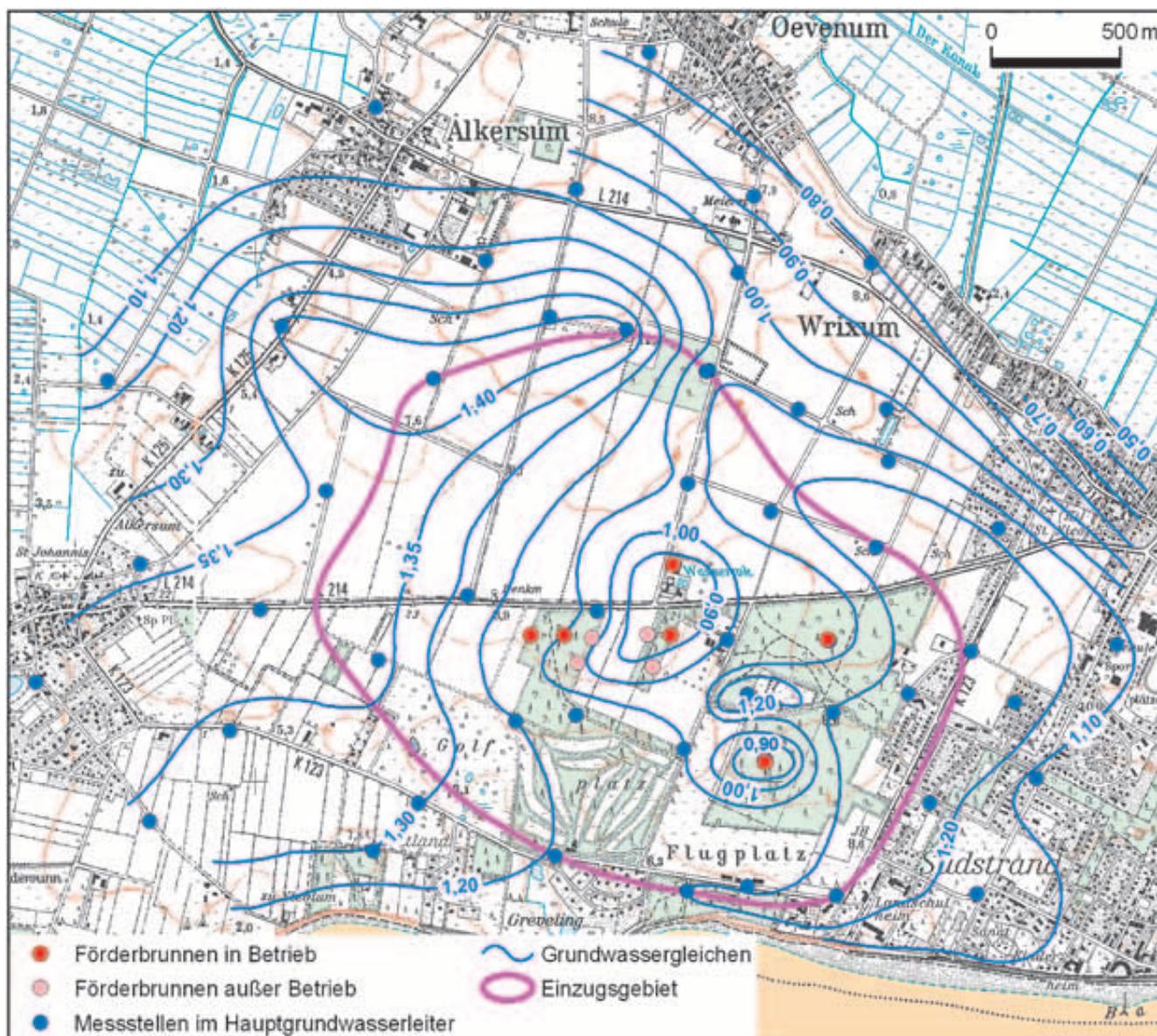


Abbildung 58: Grundwassergleichenplan für den oberen Nutzhorizont im östlichen Geestkern der Insel Föhr (Stichtagsmessung vom 27.11.2003, Tidehochwasser).

Groundwater table of the upper production horizon in the Eastern Geest core of Föhr (measured 27.11.2003 at high tide).

Die generelle Verbreitung des Süßwassers auf der Insel Föhr wird vor allem durch die Verbreitung von Geest und Marschen mit ihrem unterschiedlichen geologischen Aufbau bestimmt. Unter den Geestkernen kann sich durch die dort vorherrschenden günstigen Grundwasserneubildungsbedingungen (Geländehöhen bis über 12 m NN und sandige Böden) bis in Tiefen von über 100 m Süßwasser ausbreiten. In der Marsch dagegen findet nahezu keine Grundwasserneubildung statt, da durch die Überdeckung mit geringdurchlässigen Ablagerungen (Klei) kaum Niederschlagswasser versickern kann und Oberflächenwasser durch die Drainagen abgeführt wird. Daher sind in der Marsch unter dem Klei keine nennenswerten Mengen an Süßwasser zu finden, bis auf die Bereiche am Geestrand, in die Grundwasser aus den Geestkernen zuströmt. Hier kommt in den oberflächennahen Grundwasserleitern noch Süßwasser vor. Derzeit herrscht auf der Insel Föhr, wie in Abbildung 57 schematisch dargestellt, ein **Gleichgewicht zwischen Süß- und Salzwasser**, das sich auf die jahrzehntelange Grundwasserför-

derung eingestellt hat. Es besteht also eine ausgeglichene Wasserbilanz zwischen der Grundwasserneubildung auf der einen Seite sowie der Grundwasserentnahme durch die Wasserwerksbrunnen, den Drainagen der Marsch und dem Grundwasserabstrom ins Watt auf der anderen Seite. In welche Richtung sich dieses Gleichgewicht zukünftig durch die Auswirkungen des Klimawandels verschieben kann, soll durch die im Rahmen des CLIWAT-Projektes durchgeführte Modellierung der Grundwasserströmung abgeschätzt werden (Kapitel 7).

5.5 Grundwasserbeschaffenheit

Die Beschaffenheit des Grundwassers auf der Insel Föhr wird als Ergebnis komplexer chemischer Reaktionen des Wassers mit den Boden- und Gesteinsmaterialien von der Zusammensetzung des Niederschlagswassers, den geochemischen Sedimenteigenschaften, den Stoffeinträgen durch die Landnutzung sowie von der Süß-/Salzwasserverteilung im Untergrund beeinflusst.

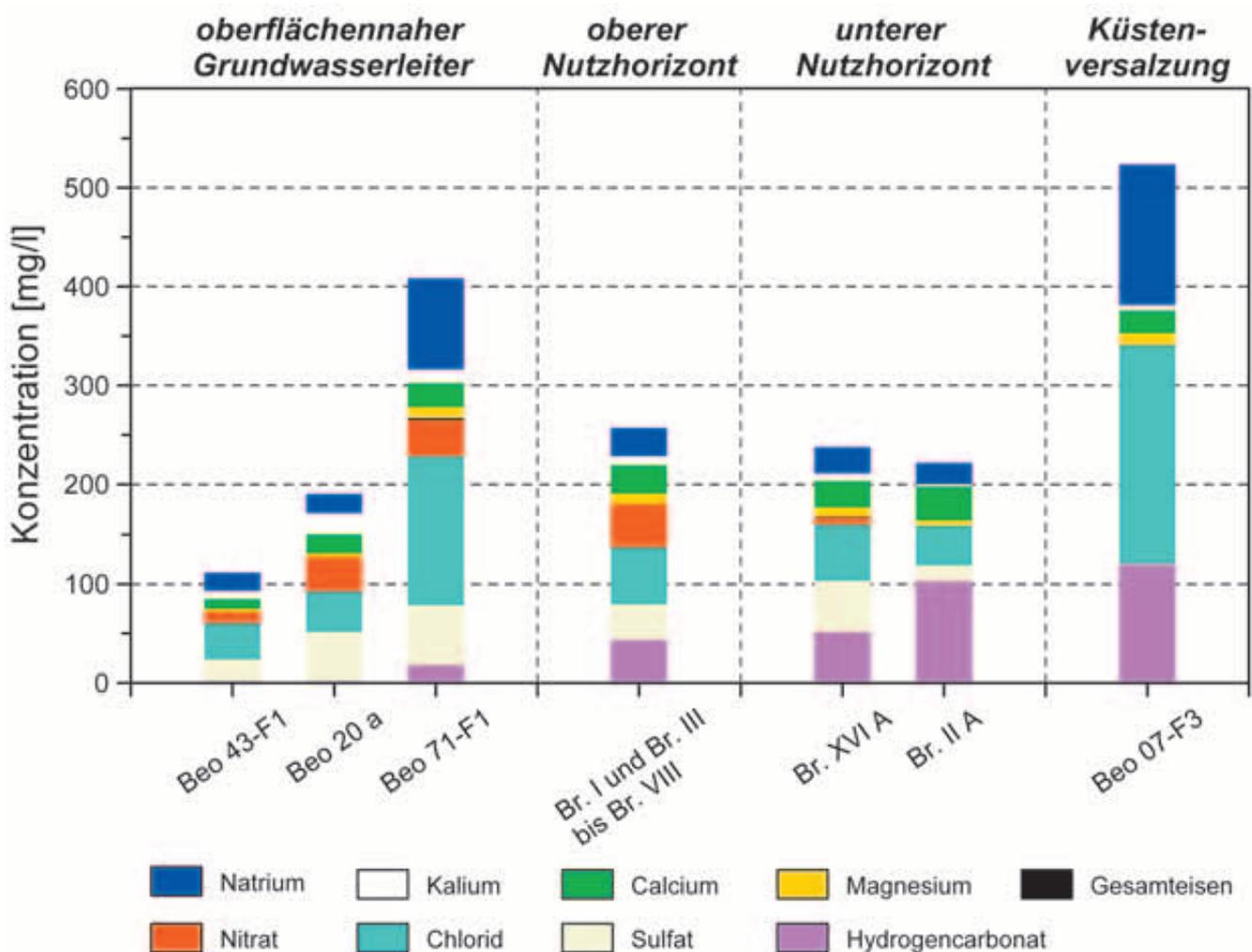


Abbildung 59: Vergleich der Hauptinhaltsstoffe im Grundwasser aus verschiedenen Brunnen und Grundwassermessstellen im Bereich des östlichen Geestkerns der Insel Föhr (die Lage der Brunnen und Messstellen ist in Abbildung 49 dargestellt).
Comparison of the main contents of the groundwater of different wells in the eastern Geest core of Föhr (well locations shown in Figure 49).

Die geförderterten **Rohwässer** sind generell schwach sauer bis schwach alkalisch und als sehr weiche Wässer in den Härtebereich 1 einzuordnen. Sie enthalten hauptsächlich die in Kapitel 3.6 beschriebenen Hauptinhaltsstoffe, die typischerweise in vielen Grundwässern Schleswig-Holsteins auftreten. Problematisch sind die zum Teil nach wie vor stark erhöhten **Nitratgehalte**. Allerdings ist zur Verwendung des Grundwassers als Trinkwasser inzwischen keine besondere Aufbereitung zur Nitratreduzierung mehr erforderlich (Kapitel 6.3).

Die Inhaltsstoffe treten in den einzelnen Grundwässern in recht unterschiedlichen Konzentrationen und Mengenanteilen auf. Am Beispiel ausgewählter Grundwasseranalysen des östlichen Geestkerns soll die verschiedene Mineralisierung der Wässer aus den einzelnen Wasserleitern verdeutlicht werden. Anhand von Analyseergebnissen aus den Jahren 2009 bis 2011 sind in Abbildung 59 für ausgewählte Brunnen und Messstellen die Konzentrationen der wichtigsten Grundwasserinhaltsstoffe dargestellt.

Die drei Grundwässer aus den Messstellen Beo 43-F1, Beo 20a und Beo 71-F1 verdeutlichen, dass insbesondere im **oberflächennahen Grundwasserleiter** eine große hydrochemische Variabilität besteht. Die gering mineralisierte Probe aus der Messstelle Beo 43-F1 ist ein Beispiel für ein anthropogen nur wenig beeinflusstes Grundwasser. Der mengenmäßig bestimmende Chloridgehalt lässt sich hauptsächlich auf die erhöhte Chloridfracht der Niederschläge zurückführen, die auf Föhr infolge der Insellage aus der Meereseiszeit stammt und naturgemäß größer ist als im Binnenland. Lediglich die Kaliumkonzentration von 8 mg/l ist etwas höher als in vergleichbaren, durch die Landnutzung unbeeinflussten Grundwässern und der Nitratgehalt liegt mit ca. 10 mg/l an der oberen Grenze der natürlichen Grundwassermineralisierung. Die anderen Stoffgehalte dieses Grundwassers sind unauffällig. Bei den beiden Messstellen Beo 20a und Beo 71-F1, die Nitratgehalte von jeweils ca. 35 mg/l aufweisen, ist ein deutlicher Einfluss durch **Stoffeinträge von der Erdoberfläche** her feststellbar. Neben Nitrat sind auch die Kaliumgehalte und im Falle der Messstelle Beo 71-F1 auch die Konzentrationen an Natrium, Chlorid und Sulfat anthropogen stark erhöht.

Für den oberen Nutzhorizont sind in Abbildung 59 vergleichend die Mittelwerte der

Rohwasseranalysen aller flachen Förderbrunnen des Wasserwerkes Föhr-Ost dargestellt. Auch der Hauptgrundwasserleiter ist nach wie vor durch Nitrat belastet, allerdings haben die durchschnittlichen Nitratgehalte im Rohwasser inzwischen den Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) von 50 mg/l unterschritten (Kapitel 6.4). Neben Nitrat zeigt auch die Kaliumkonzentration der Brunnenrohässer, die im Mittel bei ca. 9 mg/l liegt, die Belastung des oberen Nutzhorizontes durch Stoffeinträge aus der Landnutzung an. Das im Vergleich zum Hauptwasserleiter wesentlich größere natürliche Schutzpotenzial des unteren Nutzhorizontes wird anhand der Rohwasseranalysen aus den tiefen Förderbrunnen Br. XVI A und Br. II A deutlich (Abbildung 59). In Folge seiner Überdeckung mit schlecht wasser-durchlässigen Schichten ist der **untere Nutzhorizont** noch weitgehend nitratfrei. Am Brunnen Br. XVI A zeigen sich allerdings auch im tiefen Wasserleiter erste Anzeichen einer Beeinflussung. Hierauf weisen die leichte Erhöhung des Kaliumgehaltes, das Vorkommen von Nitrat und der im Vergleich zum Brunnen Br. II A deutlich höhere Sulfatgehalt hin. Der höhere Sulfatgehalt ist wahrscheinlich auf die Denitrifikation der in das Grundwasser eingetragenen Stickstoffverbindungen zurückzuführen (Kapitel 3.6), die zumindest stellenweise auch den unteren Nutzhorizont beeinflussen. Der hydrochemische **Einfluss des Meerwassers** wird am Beispiel der küstennahen Messstelle Beo 07-F3 deutlich, die in einer Tiefe von etwa 100 m verfiltert ist. Augenfällig ist der hohe meereswasserbürtige Salzgehalt mit ca. 140 mg/l Natrium und mehr als 200 mg/l Chlorid. Dieses Grundwasser entstammt der Übergangszone zwischen der Süßwasserlinse und dem unterlagernden Salzwasser am Rande der Insel Föhr.

Vor dem Hintergrund der im Laufe der 1980er Jahre stark zunehmenden Nitratbelastung im Rohwasser der flachen Förderbrunnen (Kapitel 6.4) wurden in den beiden Gewinnungsgebieten der Insel Föhr verschiedene Programme zur flächenhaften Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit und zu ihrer zeitlichen Entwicklung durchgeführt (GLA & LAWAKÜ 1989, LAWAKÜ & GLA 1990, LANU 1999, KETELSEN 2000, STEINMANN & KETELSEN 2004). Abbildung 60 zeigt am Beispiel des Messstellenstandortes Beo 20 im östlichen Geestkern die **Entwicklung der Nitratgehalte** im oberflächennahen Grundwasser (Messstelle Beo 20a) und im oberen Nutzhorizont (Messstelle Beo 20b).

Im oberflächennahen Grundwasser lag der Nitratgehalt schon zu Beginn der 1980er Jahre deutlich oberhalb des Grenzwertes der TrinkwV und stieg bis zur Mitte des Jahrzehnts weiter an. An der Messstelle Beo 20a trat die höchste Belastung mit 160 mg/l im Jahre 1985 auf (STEINMANN & KETELSEN 2004).

Seit der Ausweisung der ersten Wasserschutzgebiete im Jahre 1985 (Kapitel 6.4) ging der Nitratgehalt - zunächst unregelmäßig, ab Anfang der 1990er mehr oder weniger stetig -

auf das heutige Niveau zurück. Anhand der Entwicklungskurve der tieferen Messstelle 20b ist zu erkennen, dass die Hauptbelastung im nur unzureichend geschützten, oberen Nutzhorizont um etwa ein bis zwei Jahrzehnte verzögert auftrat. Erst mit Beginn der 2000er Jahre ging der Nitratgehalt auch im Grundwasser der Messstelle Beo 20b deutlich zurück und liegt heute, wie im Rohwasser der flachen Förderbrunnen (Kapitel 6.4), unterhalb von 50 mg/l.

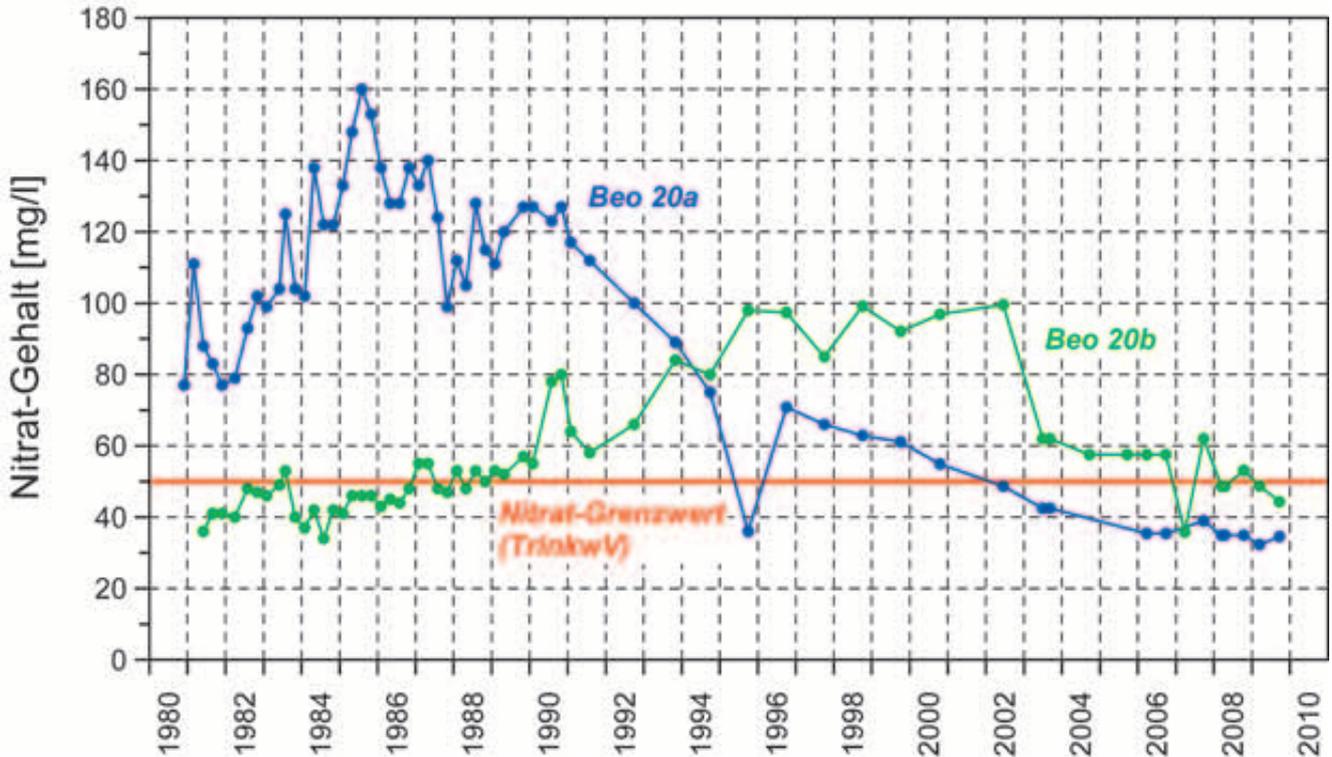


Abbildung 60: Entwicklung der Nitratgehalte im oberflächennahen Grundwasser (Grundwassermessstelle Beo 20a) und im oberen Nutzhorizont (Messstelle Beo 20b) im östlichen Geestkern der Insel Föhr.
Trends of nitrate contents of the near surface groundwater (observation well BEO 20a) and in the upper production horizon (observation well BEO 20) in the eastern Geest core of Föhr.

6 Wasserversorgung auf Föhr

➤ Hark Ketelsen, Bernd König

Für die Trinkwasserversorgung der Insel Föhr ist der Wasserbeschaffungsverband Föhr zuständig. Dazu betreibt und unterhält der Verband 17 Förderbrunnen, 2 Wasserwerke und ein rund 270 km langes Rohrnetz (Haupt- und Anschlussleitungen). Das Wasser wird aus den Grundwasserleitern der Föhrer Geest entnommen und nach einer einfachen Aufbereitung (Filtration über Calciumcarbonat - CaCO_3) über das Netz an die Kunden verteilt. Die Tabellen 1 - 3 enthalten eine Auswahl von Kennzahlen zur Wasserversorgung der Insel Föhr.

6.1 Vom Hausbrunnen zur zentralen Wasserversorgung

Die Wasserversorgung der Insulaner erfolgte bis weit ins 20. Jahrhundert hinein mittels eigener Brunnen. Die Brunnen befanden sich üblicherweise in unmittelbarer Nähe des Hauses, zumeist im Garten, und reichten nur wenige Meter tief bis ins oberflächennahe Grundwasser. Zwar hatte es schon in den 1920er Jahren Diskussionen um eine zentrale Trinkwasserversorgung für die Stadt Wyk auf Föhr gegeben, und es existieren zwei unabhängige Entwürfe aus dem Jahre 1925 für den Bau eines über 20 m hohen Wasserturms mit einem Speichervolumen von 100 m³. Aber das Projekt wurde aus finanziellen Gründen nicht realisiert, obwohl im Januar 1929 bereits die Rohrleitungen in Dagebüll angeliefert worden waren.

Daraus kann gefolgert werden, dass eine unmittelbare Notwendigkeit für den Bau einer zentralen Wasserversorgung auf Föhr damals nicht gegeben war. Ganz offensichtlich lieferten die vorhandenen Hausbrunnen sauberes, genusstaugliches Wasser in ausreichender Menge, wenngleich die hygienischen Standards der 1920er Jahre nicht mit den heutigen Vorgaben der Trinkwasserordnung (TrinkwV) im Einklang gestanden haben dürften.

Das Thema „**Zentrale Wasserversorgung**“ wurde nach Recherchen des amtierenden Bürgermeister der Stadt Wyk auf Föhr, Heinz Lorenzen, erst Mitte der 1950er Jahre im Zusammenhang mit der Anerkennung von Wyk als Heilbad wieder diskutiert, jedoch zunächst nicht weiter verfolgt. Der entscheidende Impuls kam schließlich aus dem Westen der Insel, wo es in den Ortslagen der Gemeinden Oldsum und Süderende schon immer Schwie-

rigkeiten mit der Ergiebigkeit von Brunnen gegeben hatte. Dies dürfte einerseits an den dort oberflächennah anzutreffenden lehmigen Schichten gelegen haben, die nur eine geringe hydraulische Leitfähigkeit besitzen und aus denen sich in der Regel keine größeren Wassermengen gewinnen lassen. Zum anderen stehen tonige Schichten aus dem Tertiär (miozäner Glimmerton), die überhaupt kein nutzbares Wasser enthalten, bereichsweise nur wenige Meter unter Gelände an. Worin auch immer die Ursache mangelnder Ergiebigkeit im Einzelfall bestanden haben mag, die allgemeine Versorgungslage hatte sich am Ende der 1950er Jahre verschärft und aus verschiedenen Hausbrunnen ließ sich zeitweilig kaum mehr ausreichend Wasser gewinnen. Nicht unmöglich, dass dabei auch die verbesserte Entwässerung der Föhrer Marsch im Laufe der 50er Jahre (Ausbau des Gewässernetzes, Bau von zwei Schöpfwerken) eine Rolle gespielt hat, die zu einer Absenkung des Grundwasserspiegels auf der benachbarten Geest geführt haben dürfte. Letztlich gab die Wasseranalyse aus einem Hausbrunnen, dessen Wasser nach Aussage des beauftragten Labors für den „Verzehr durch Mensch und Tier aus hygienischen Gründen nicht geeignet“ war, den entscheidenden Ausschlag für eine zentrale Wasserversorgung.

Um die Trinkwasserversorgung im Westen der Insel Föhr sicherzustellen, wurde am 12. Juni 1961 der Wasserbeschaffungsverband Föhr - zunächst als Wasserbeschaffungsverband Föhr-West - von den Gemeinden Oldsum, Süderende und Utersum gegründet. Die Entwicklung des Verbandes schritt schnell voran - massiv bezuschusst (70 % der Kosten) aus dem Programm Nord, das zur Modernisierung und Stärkung des äußerst strukturschwachen nördlichen Landesteils von Schleswig-Holstein am 24.02.1953 von der Landesregierung aufgelegt worden war. Binnen weniger Jahre wurden die meisten Inselgemeinden Mitglieder des Wasserbeschaffungsverbandes Föhr. Die Stadt Wyk auf Föhr, deren Haushalte heutzutage mehr als die Hälfte des Föhrer Trinkwassers verbrauchen, trat dem Verband erst 1967 bei. Der Beitritt war seinerzeit heftig umstritten. Dabei spielten offenbar nicht allein die Anschlusskosten eine Rolle, vielmehr verfügten die Wyker Bürger durchweg über Brunnen, aus denen sich Wasser in ausreichenden Mengen und hoher Qualität gewinnen ließ. Dies erscheint plausibel, liegt doch der weit

überwiegende Teil des Wyker Stadtgebiets im Bereich der Geest, deren sandiger Untergrund eine hohe Wasserleitfähigkeit besitzt und damit ergiebige Brunnen ermöglicht. Als letzte Gemeinde der Insel Föhr wurde Dunsum im Jahr 1971 Verbandsmitglied.

Als erstes der beiden Wasserwerke nahm Föhr-West in Hedehusum 1964 den Betrieb auf. Das Wasserwerk Föhr-Ost in Wrixum ging 1971 in Betrieb (Abbildung 61). Zeitgleich mit dem Ausbau der **zentralen Wasserversorgung** erfolgte im Zuge der Flurbereinigung (Programm Nord) die Aussiedlung etlicher landwirtschaftlicher Betriebe aus der Enge der Ortslagen in die Föhrrer Marsch. Diese Betriebe wurden allesamt an das Netz des Verbandes angeschlossen und von Föhr-West aus versorgt.

Tabelle 1: Allgemeine Informationen zum Wasserbeschaffungsverband Föhr.

Gründungsjahr	1961
Versorgungsgebiet	die Insel Föhr (82 km ²)
Mitglieder	die 12 Inselgemeinden
Einwohner	8.700
Nebenwohner	2.800
Übernachtungsgäste	190.000 pro Jahr
Grundwasserentnahme (2011)	980.000 m ³
Trinkwasser ab Werk (2011)	960.000 m ³
Bedarf am Spitzentag	5.500 m ³
Stundenspitze	450 m ³
Verbrauch pro Kopf	170 l/d
Wasserpreis inkl. 7 % MwSt.	0,64 EUR/m ³
Mitarbeiter in Vollzeit	7



Abbildung 61: Das Gebäude des Wasserbeschaffungsverbandes Föhr am Wasserwerk Föhr-Ost in Wrixum (Foto: Günter Hilmes).
The building of the WBV Föhr at the waterworks Föhr-Ost in Wrixum.

6.2 Wassergewinnung und Wasserabgabe

Der Wasserbeschaffungsverband Föhr gewinnt sein Wasser aus dem Untergrund der Föhrer Geest. Die Geest besteht aus sandigen Sedimenten, die während der vorletzten Eiszeit durch das Schmelzwasser der Gletscher vor dem Eisrand abgelagert wurden. Diese Schmelzwassersande sind etwa 25 bis 50 m mächtig. Das Grundwasser ist in den Poren zwischen den Sandkörnern gespeichert. Der vom Grundwasser erfüllte Hohlraumanteil, die Porosität, beträgt ca. 25-30 %. Eine detaillierte Darstellung der Grundwasserverhältnisse liefert Kapitel 5.

Die **Erneuerung des Grundwassers** erfolgt ausschließlich durch die Versickerung von Niederschlagswasser. Von den 850 mm Jahresniederschlag auf Föhr versickert im Durchschnitt ein Anteil von 40-45 %, so dass mit einer Grundwasserneubildung von 350 - 400 mm im Jahr zu rechnen ist. Dies entspricht einer alljährlich neu verfügbaren Wassermenge von 350.000 - 400.000 m³ pro 100 ha Geestfläche. Für die Erneuerung der Grundwasserreserven sind die Winterniederschläge (im langjährigen Mittel 452 mm von Oktober - März) maßgeblich, weil bei geringer Verdunstung in der kalten Jahreszeit der Großteil des Niederschlags versickert. Der Niederschlag im Sommerhalbjahr hat aufgrund der hohen Verdunstung für die Erneuerung der

Grundwasserreserven nur eine geringe Bedeutung.

Tabelle 2: Kennzahlen der Wasserwerke.

	Föhr-Ost	Föhr-West
Brunnen	10 aktive (3 stillgelegt)	7
Maximale Förderkapazität pro Tag	5.400 m ³	2.400 m ³
Behälterraum (Speicher)	1.500 m ³	320 m ³
Netzpumpen	6	4
Grundwasserentnahme (2011)	900.000 m ³ /a	80.000 m ³ /a
Trinkwasser ab Werk (2011)	770.000 m ³ /a	190.000 m ³ /a

Das Grundwasser wird von Brunnen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit (10 - 50 m³/h) aus mittleren Tiefen zwischen 20 und 80 m gefördert und in die Wasserwerke gepumpt. Die jährliche Grundwasserentnahme unterschreitet seit dem Jahr 2005 die Marke von 1 Mio. m³ und lag in 2011 bei rd. 980.000 m³. Davon entfielen über 90 % (ca. 900.000 m³) auf das Wasserwerk Föhr-Ost. Von der in Föhr-Ost gewonnenen Menge wurden ca. 110.000 m³ zum Wasserwerk Föhr-West weitergeleitet und der dort gewonnenen Menge beigemischt. Die Entwicklung der Grundwasserentnahme seit 1980 zeigt Abbildung 62.

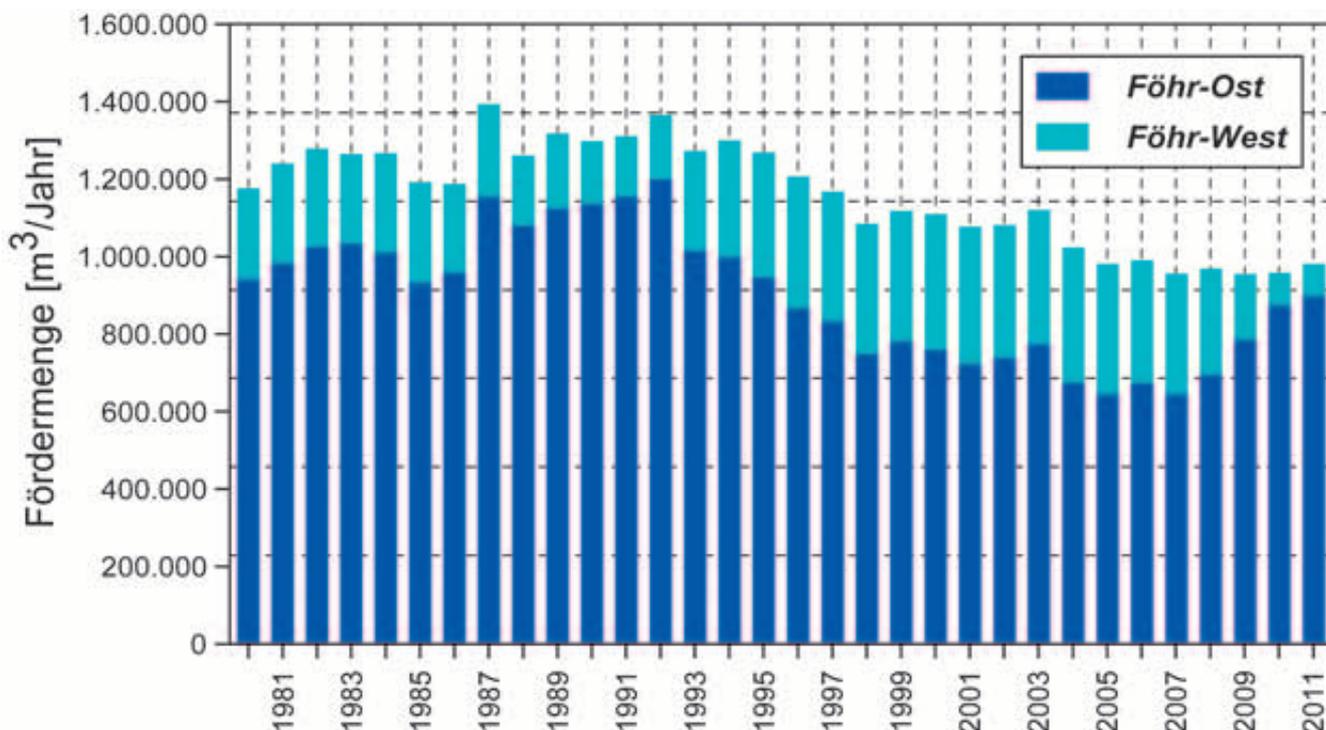


Abbildung 62: Entwicklung der jährlichen Grundwasserentnahmen der Wasserwerke Föhr-Ost und Föhr-West.

Annual groundwater abstraction of the water works Föhr-Ost and Föhr-West.

Die geltende **Bewilligung zur Grundwasserentnahme** räumt dem Wasserbeschaffungsverband Föhr das Recht ein, mit den Wasserwerken Föhr-Ost und Föhr-West jährlich bis zu 1,35 Mio. m³ Grundwasser zu entnehmen. Diese Menge wird derzeit nur zu etwa 70 % ausgeschöpft. Allein das Wasserwerk Föhr-Ost verfügt über eine bewilligte Entnahmemenge von 1,0 Mio. m³/a. Auch langfristig gibt das Grundwasserdargebot keinen Anlass zur Besorgnis. Zwar wird im Zuge des vielfach diskutierten Klimawandels mit größerer sommerlicher Trockenheit gerechnet, wodurch der Wasserbedarf gegebenenfalls steigen könnte. Gleichzeitig aber werden für Norddeutschland tendenziell höhere Winterniederschläge erwartet, die für die Grundwasserneubildung maßgeblich sind. Da der Wasserbeschaffungsverband Föhr nur einen vergleichsweise kleinen Teil dessen fördert, was im langjährigen Mittel

auf der Föhrer Geest zur Versickerung gelangt (Grundwasserdargebot > 4 Mio. m³/a), erscheint die Wasserversorgung der Insel über einen weiten Bereich möglicher Klimaszenarien gesichert (siehe Kapitel 7). Auch eine längere Serie niederschlagsarmer Jahre würde zu keiner Gefährdung der Trinkwasserversorgung führen, weil unter der Geest Grundwasserreserven von grob geschätzt rund 100 Mio. m³ gespeichert sind.

Der **Trinkwasserbedarf** auf Föhr unterliegt im Jahresverlauf ganz erheblichen Schwankungen. In der hochsommerlichen Hauptsaison des Tourismus (Juli/August) ist der Bedarf wesentlich höher als im Winterhalbjahr. Abbildung 63 vermittelt am Beispiel der monatlichen Grundwasserentnahmen einen Eindruck dieser Bedarfsschwankungen.

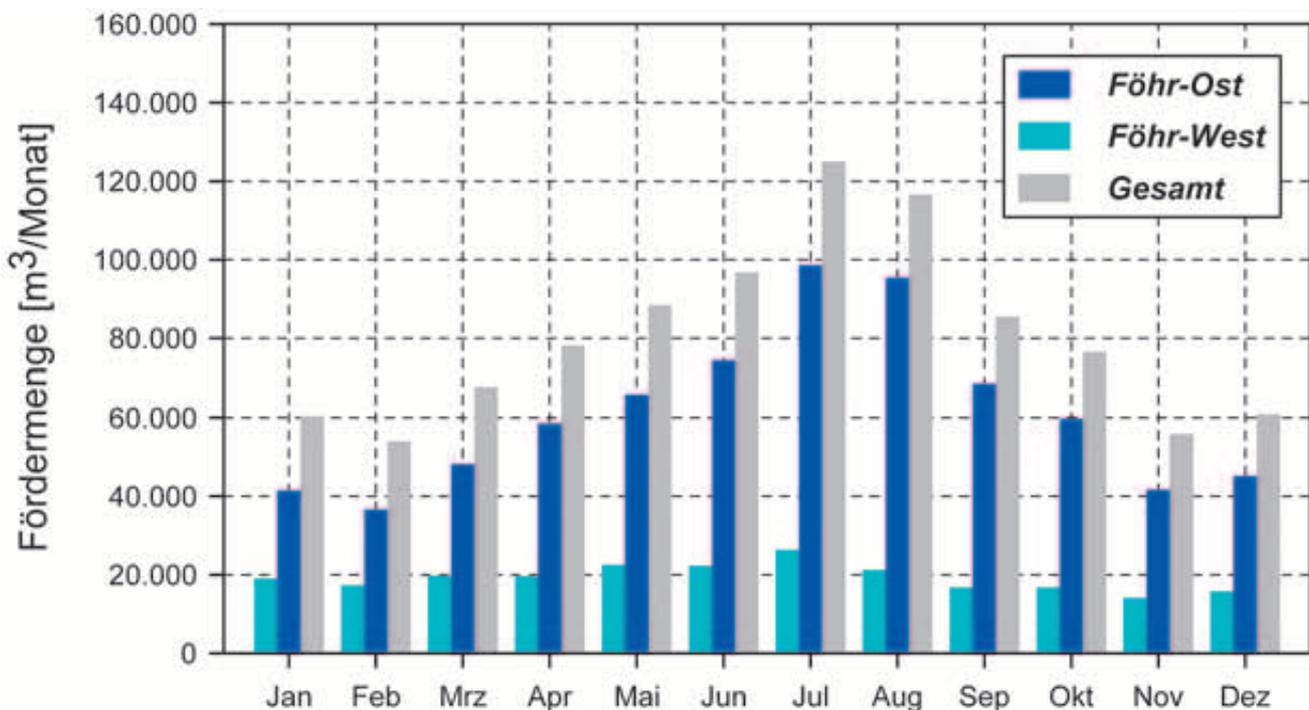


Abbildung 63: Mittlere monatliche Grundwasserentnahmen 2007 - 2011 der Wasserwerke Föhr-Ost und Föhr-West.
Mean monthly groundwater abstraction 2007 – 2011 of the waterworks Föhr-Ost and Föhr-West.

In 2011 wurden insgesamt rund 960.000 m³ Wasser ins Netz eingespeist. Der „Löwenanteil“ von 770.000 m³ (80 % der Gesamtmenge) entfiel - trotz der Lieferung von 110.000 m³ zum Wasserwerk Föhr-West - auf das Werk Föhr-Ost, das somit die Hauptlast der insularen Wasserversorgung trägt.

Tabelle 3: Kennzahlen des Rohrnetzes

Länge Hauptleitungen	115 km
Länge Anschlussleitungen	156 km
Hausanschlüsse	4.500
Hydranten	536

6.3 Trinkwasserqualität

Die Nutzung von Grundwasser aus Porengrundwasserleitern für die Trinkwassererzeugung hat im Vergleich zu anderen Quellen (z. B. Talsperrenwasser oder Uferfiltrat) den großen Vorteil, dass Grundwasser in der Regel bakteriologisch einwandfrei (keimfrei) ist. Dies hängt mit der oft jahrzehntelangen Aufenthaltszeit im Untergrund zusammen - potenzielle Krankheitserreger überleben dort aufgrund ungünstiger Nährstoffverhältnisse zumeist nur wenige Wochen - und es trifft auch auf das Föhrer Grundwasser zu. Das entnommene Grundwasser bedarf in dieser Hinsicht daher keiner weiteren Behandlung.

Eine **einfache Aufbereitung** über Filteranlagen, die mit feinkörnigem Kalzit (CaCO_3) gefüllt sind und zur Entsäuerung, Enteisung und Entmanganung dienen, reicht aus, um aus dem Grundwasser Trinkwasser herzustellen. Die Entsäuerung des Rohwassers führt zu einer Aufhärtung des Wassers, sodass das Trinkwasser an beiden Wasserwerken dem Härtebereich „mittel“ zuzuordnen ist.

Das Grundwasser der Föhrer Geest ist aus Ermangelung schützender Deckschichten sehr verwundbar gegenüber Stoffeinträgen von der Erdoberfläche. Vor etwa 20 Jahren bereitete die **Einhaltung des Nitratgrenzwertes** der Trinkwasserverordnung von 50 mg/l zunehmend Probleme. Dies hing mit Intensivierungen in der Landwirtschaft (u. a. Anbau von Silomais und Umstellung auf Güllewirtschaft) zusammen. Am Wasserwerk Föhr-West wurde dadurch der Bau einer biologischen Denitrifikationsanlage erforderlich, die 1993 in Betrieb ging und bis zum Jahr 2009 erfolgreich arbeitete. Der Nitratwert am Werksausgang Föhr-West lag bei durchschnittlich etwa 10 mg/l.

In Föhr-Ost konnte der Nitratwert des Trinkwassers durch den Bau der drei Tiefbrunnen II A, XV A und XVI A deutlich abgesenkt werden. Der Brunnen II A (Entnahmetiefe 69 - 84 m) ist seit Inbetriebnahme im Jahr 1989 nitratfrei. Der Nitratgehalt der Brunnen XV A und XVI A, die beide seit 1984 in Betrieb stehen, liegt seit Jahren relativ konstant bei etwa 10-15 mg/l.

Aufgrund des seit 1992 rückläufigen Trinkwasserbedarfs (Abbildung 62) konnte die kostenintensive Denitrifikationsanlage in Föhr-West im August 2009 außer Betrieb genommen werden. Seither wird Rohwasser aus Föhr-Ost über die im Frühjahr 2009 gebaute, 8 km lange Rohwasserleitung herangeführt und der in Föhr-West gewonnenen Grundwassermenge beigemischt. Der Nitratgrenzwert von 50 mg/l wird heute an beiden Werksausgängen sicher unterschritten. Im Jahre 2011 lag die mittlere Nitratkonzentration am Werksausgang Föhr-Ost bei 25,6 mg/l, am Ausgang des Wasserwerkes Föhr-West betrug sie 33,3 mg/l.

Abgesehen von Nitrat gab und gibt es Beeinträchtigungen des Föhrer Grundwassers durch **Pflanzenschutzmittel bzw. deren Metabolite**.

Bis vor einigen Jahren konnte das seit 1991 verbotene Herbizid Atrazin in Brunnen VII des Wasserwerkes Föhr-West in Spuren nachgewiesen werden, und seit dem Frühjahr 2007 wird der Metabolit Desphenylchloridazon in 11 der 17 Brunnen des Verbandes in unterschiedlichen Konzentrationen beobachtet. Desphenylchloridazon ist ein Abbauprodukt des Herbizids Chloridazon, das in früheren Jahren im Futterrübenanbau verwendet wurde. Die Futterrübe wird im Einzugsgebiet des Wasserwerkes Föhr-Ost seit mindestens 25 Jahren und im Einzugsgebiet Föhr-West seit über 10 Jahren nicht mehr angebaut. Hieraus kann gefolgert werden, dass Desphenylchloridazon im Grundwasserbereich offensichtlich kaum weiter abgebaut wird und daher langfristig mit dem Grundwasserabstrom aus dem Wasserleitersystem ausgetragen werden muss.

Das Umweltbundesamt (UBA) rechnet Desphenylchloridazon den so genannten nicht relevanten Metaboliten (nrM) zu. Nach Auffassung des UBA ist der Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 0,1 µg/l für Pflanzenschutzmittelwirkstoffe und deren relevante Metabolite auf die nrM und damit auf Desphenylchloridazon nicht anwendbar. Deshalb haben das UBA und das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) für Desphenylchloridazon einen gesundheitlichen Orientierungswert (GOW) von 3 µg/l festgelegt, der dauerhaft zu dulden ist und quasi Grenzwertcharakter besitzt. Die Desphenylchloridazon-Messwerte lagen in 2011 am Werksausgang Föhr-Ost zwischen 0,12 und 0,16 µg/l und in Föhr-West zwischen 0,31 und 0,38 µg/l. Der GOW von 3 µg/l wurde somit jeweils weit unterschritten.

Unabhängig hiervon gibt der Wasserbeschaffungsverband Föhr sein Trinkwasser derzeit auf Basis einer Ausnahmegenehmigung nach § 9 (6) der TrinkwV ins Netz ab, da die Trinkwasserhygienekommission des Landes Schleswig-Holstein die Auffassung vertritt, der Grenzwert der TrinkwV von 0,1 µg/l für Pflanzenschutzmittelwirkstoffe sei auch auf die nrM anzuwenden und diese Vorgehensweise den Gesundheitsämtern empfiehlt. Die Ausnahmegenehmigung erlaubt die Abgabe von Trinkwasser mit einer Desphenylchloridazon-Konzentration von maximal 10 µg/l.

6.4 Grundwasserschutz und Wasserschutzgebiete

Die durch die Wasserwerke Föhr-Ost und Föhr-West genutzten Grundwasservorkommen haben eine große wasserwirtschaftliche Bedeutung für die öffentliche Trinkwasserversorgung auf der Insel Föhr. In Anbetracht der seit Anfang der 1980er Jahre erheblichen Probleme hinsichtlich der Nitratbelastung im Grundwasser wurden daher für die beiden Wasserwerke bereits im Jahre 1985 Wasserschutzgebiete (WSG) ausgewiesen. Die erste **Wasserschutzgebietsverordnung Föhr** (WSG-VO Föhr) wurde im Jahre 1991 durch die Aufnahme weitergehender Einschränkungen für die Landwirtschaft maßgeblich geändert (Gebot der ausschließlichen Dauergrünlandnutzung, Verbot des Umbruchs von

Dauergrünland, weitere Düngebeschränkungen).

Seit den 1990er Jahren konnte die Grundwasserqualität in Bezug auf den Nitratgehalt verbessert werden. Vor allem in Föhr-Ost waren die Nitratwerte in den vergangenen 20 Jahren deutlich rückläufig. Die mittlere Nitratkonzentration der 7 flacheren Förderbrunnen (Entnahmetiefe 12 - 39 m) sank im Zeitraum 1990 - 2011 von 63 auf 43 mg/l (Abbildung 64). Im oberflächennahen, jüngsten Grundwasser finden sich mittlerweile Werte von weniger als 20 mg/l. Hier zeigt sich eindeutig die positive Wirkung der Wasserschutzgebiete.

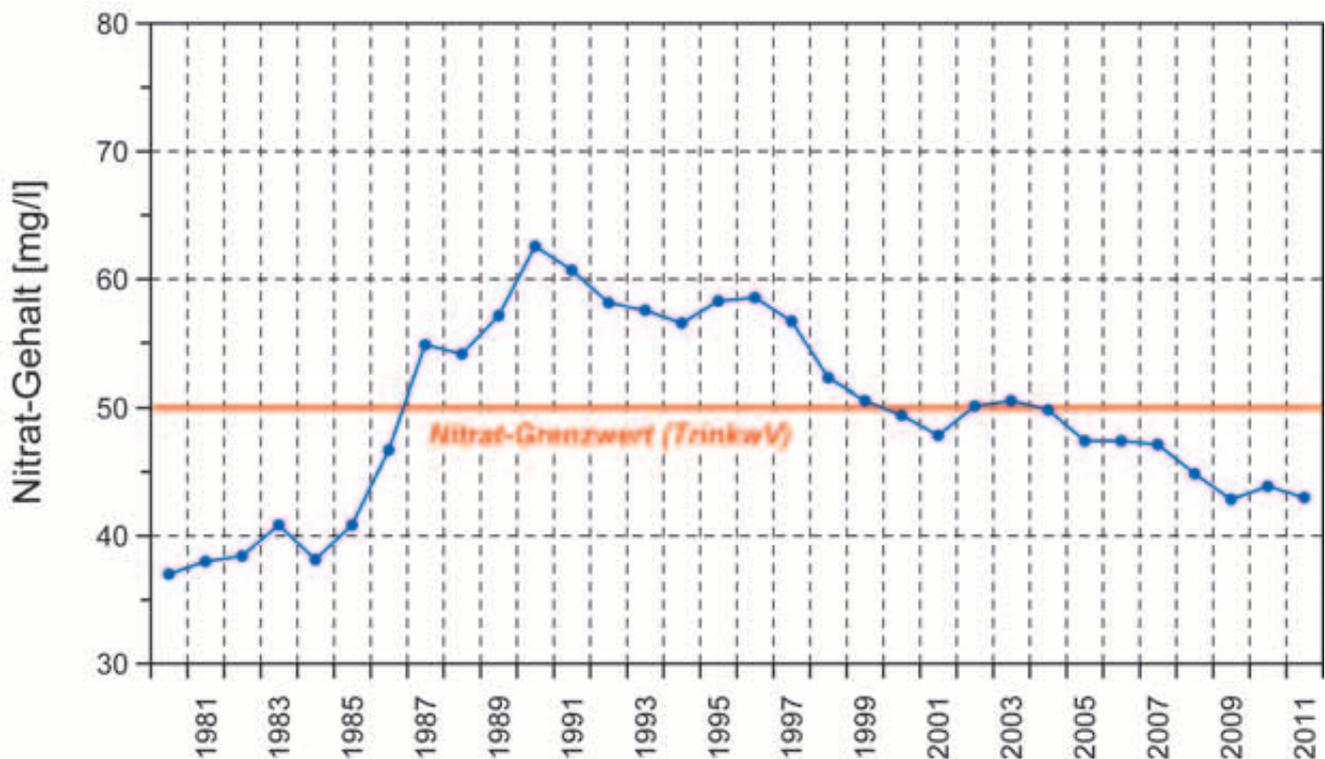


Abbildung 64: Durchschnittliche Entwicklung der Nitratgehalte im Rohwasser der flacheren Förderbrunnen des Wasserwerkes Föhr-Ost (Jahresmittelwerte der Brunnen Br. I und Br. III bis Br. VIII).

Averaged nitrate content of the raw water from the shallower production wells of the water works Föhr-Ost (annual mean values of wells I and III – VIII).

Seit 1985 haben sich durch den Rückgang des Wasserbedarfs und die Stilllegung von Förderbrunnen zahlreiche Änderungen in Bezug auf die Grundwassergewinnung ergeben, die zu einer Veränderung der Einzugsgebiete geführt haben. Aus diesem Grunde wurden die Einzugsgebiete der beiden Wasserwerke im Jahre 2005 auf der Basis der aktuellen Grundwasserbewirtschaftung ermittelt und die Wasser-

schutzgebiete neu bemessen. Beide WSG wurden im Jahr 2005 der Einzugsgebietsgröße der Wasserwerke angepasst. Mit der neuen WSG-VO Föhr vom 02. Februar 2010 (in Kraft getreten am 26. Februar 2010) besitzen die Wasserschutzgebiete heute eine Größe von ca. 372 ha (WSG Föhr-Ost) und von ca. 158 ha (WSG Föhr-West) (Abbildung 65).

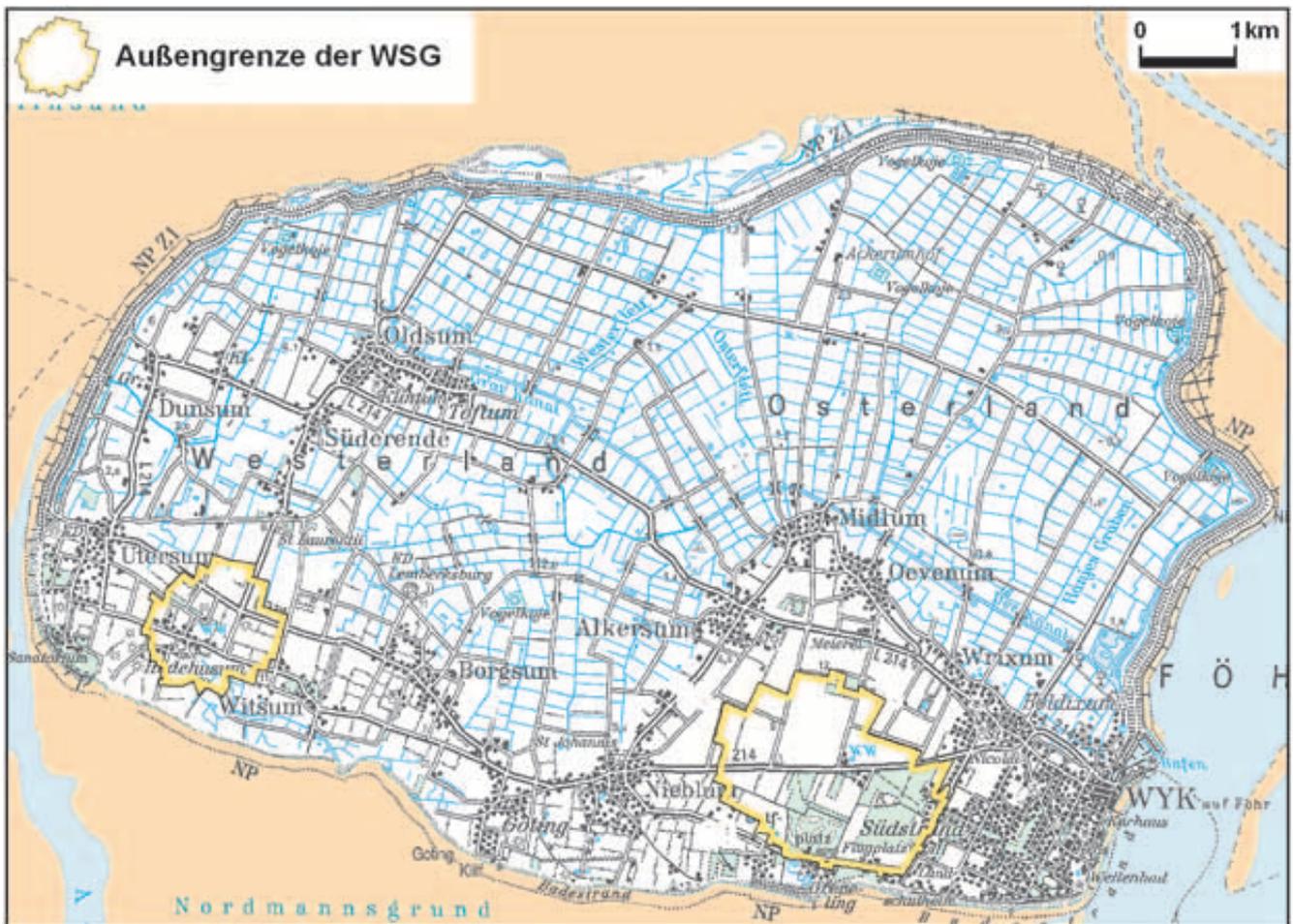


Abbildung 65: Außengrenzen der im Jahre 2010 neu festgesetzten Wasserschutzgebiete Föhr-Ost und -West (WSG-VO Föhr vom 02. Februar 2010).
Outer boundaries of the water protection areas Föhr-Ost and Föhr-West (established 2010).

Die neue WSG-VO lässt Ackerbau in eingeschränktem Umfang im Rahmen einer Wechselgrünlandfruchtfolge wieder zu. Silomais, dessen Anbau in Wasserschutzgebieten aufgrund der nachweislich erhöhten Nitratverluste als kritisch zu bewerten ist, darf am gleichen Standort nur alle 4 Jahre angebaut werden, so dass Monokulturen ausgeschlossen sind. Die neue WSG-VO enthält darüber hinaus weitere **Vorschriften für die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen**. So ist Getreideanbau nur in Form von Sommergetreide zugelassen und zur Vermeidung unnötiger Nitratbelastungen des Grundwassers ist eine ganzjährige Bodenbedeckung vorgeschrieben, die im Ackerbau durch Anbau von Zwischenfrüchten und Grasuntersaaten bei Silomais erreicht werden kann. Des Weiteren wird die Winterbeweidung des Grünlandes durch die Festlegung maximaler Besatzzahlen stark eingeschränkt, und die Stickstoffdüngung unterliegt einer Mengenbegrenzung in Abhängigkeit von der Nutzungsart. Auch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln mit den Wirkstoffen Isoproturon, Mecoprop, Terbutylazin und Bentazon, die vergleichsweise mobil sind und andernorts verschiedentlich im Grundwasser nach-

gewiesen wurden, ist laut WSG-VO verboten. Die Erfahrungen des Verbandes mit dem Metaboliten Desphenylchloridazon und dem Wirkstoff Atrazin zeigen, dass die Sorge vor Grundwasserbelastungen durch Pflanzenschutzmittel nicht unbegründet ist.

Ein wichtiger Baustein im flächenhaften Grundwasserschutz ist der **Anbau von Zwischenfrüchten**. Diese werden im Ackerbau nach der Ernte der Hauptfrucht angebaut und können im Spätsommer und Herbst beachtliche Stickstoffmengen (Nitrat) aus dem Boden aufnehmen. Dadurch wird die Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser mit dem winterlichen Sickerwasser erheblich reduziert, was sich positiv auf die Grundwasserbeschaffenheit und damit auf die Qualität des Föhrer Trinkwassers auswirkt. Ein schönes Beispiel für einen gelungenen Zwischenfruchtanbau (Gelbsenf nach Sommergerste) zeigt Abbildung 66. Die Fläche liegt unmittelbar nördlich des Wasserwerks Föhr-West. Die Zwischenfrucht hat sich infolge eines sehr frühen Saatens (vor Mitte August) hervorragend entwickelt und dürfte die noch im Boden vorhandenen Nitratreste größtenteils aufnehmen.



Abbildung 66: Gelungener Zwischenfruchtanbau (Gelbsenf (*Brassica alba* L.) nach Sommergerste) auf Ackerflächen im Wasserschutzgebiet Föhr-West (Foto: H. Ketelsen, 24.09.2011).

Effective growing of intertillage (Catch Crop (*Brassica alba* L.) following spring barley) in the water protection area Föhr-West.

Die Landwirte werden bei der praktischen Umsetzung der Auflagen aus der WSG-VO durch ein Beratungsunternehmen unterstützt, das sich auf die **Grundwasserschutzberatung** spezialisiert hat. Sie erhalten für die Einschränkungen der landwirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten, die ihnen aus der WSG-VO erwachsen, eine Ausgleichszahlung, die vom Wasserbeschaffungsverband abgewickelt wird. Unklar ist bislang, ob die Wiedereinführung des Ackerbaus in den WSG einen Wiederanstieg der Nitratwerte bewirken könnte. Es muss daher sehr genau auf die Einhaltung der Auflagen aus der WSG-VO in Bezug auf die Fruchtfolgegestaltung und den Anbau von Zwischenfrüchten bzw. Untersaaten geachtet werden.

Die Lage im WSG Föhr-Ost ist diesbezüglich jedoch relativ entspannt, da die landwirtschaftliche Nutzfläche dort mittlerweile einen Anteil von nur noch 44 % ausmacht. Allein 25 % der WSG-Fläche (94 ha) entfallen auf Waldgebiete, die in der Regel einen positiven Einfluss auf die Grundwasserqualität haben. Der Wasserbeschaffungsverband Föhr hat mit der Hilfe von Förderprogrammen des Landes in den vergangenen Jahrzehnten 40 ha Neuwald im WSG Föhr-Ost geschaffen und damit nachhaltig zum Schutz des Grundwassers beigetragen.

6.5 Grundwasserüberwachung (Monitoring)

Größere Grundwasserentnahmen, wie der Betrieb der beiden Wasserwerke auf der Insel Föhr, stellen einen Eingriff in den Wasserhaushalt dar und können infolge der Grundwasserabsenkung zu unerwünschten Auswirkungen führen. Sie unterliegen daher nach dem Wasserrecht einer behördlichen Regelung und erfordern ein eigens vorgeschriebenes Genehmigungsverfahren, in dem geprüft wird, ob Beeinträchtigungen von Mensch, Natur, Umwelt und sonstigen Sachgütern oder der Grundwasserressource selbst zu erwarten sind. Grundsätzlich ist durch eine standortangepasste Brunnenbewirtschaftung dafür Sorge zu tragen, dass die Auswirkungen der Grundwasserentnahme minimiert werden. Da aber nicht alle entnahmebedingten Auswirkungen, vor allem langfristige Entwicklungen im Grundwassersystem, mit Sicherheit vorhergesagt und beurteilt werden können, verpflichtet die wasserrechtliche Genehmigung den Wasserversorger zur Durchführung eines Grundwassermonitorings. Die einzelnen Überwachungs- und Meldepflichten, die hierzu erforderlich sind, werden als Nebenbestimmungen in den **wasserrechtlichen Genehmigungsbescheid** der Wasserbehörde aufgenommen. Die Durchführung des Monitorings obliegt dem Wasserversorger.

Wie bei allen Wasserwerken umfasst das für die beiden Wasserwerke des WBV Föhr wasserrechtlich festgelegte Monitoring zunächst eine punktuelle Überwachung des Grundwassers am unmittelbaren Ort der Entnahme, also an den Förderbrunnen selbst. Hierzu gehören

neben der Messung und Aufzeichnung der an den einzelnen Brunnen entnommenen Grundwassermengen (Tages-, Monats- und Jahreswerte) auch eine jährliche hydrochemische Vollanalyse (Kapitel 3.6) des Rohwassers aus jedem Brunnen. Auf der Insel Föhr muss das Grundwassermonitoring darüber hinaus aufgrund der konkreten Gefährdung der genutzten Grundwasservorkommen die Entwicklung der Grundwassermenge und der -qualität in den gesamten Einzugsgebieten und in allen Grundwasserleitern erfassen. Das vom WBV Föhr betriebene Monitoringmessnetz umfasst derzeit insgesamt 63 Grundwassermessstellen an 39 verschiedenen Standorten (Abbildung 67). An allen 63 Messstellen werden dabei die Grundwasserstände regelmäßig gemessen, an 18 dieser Messstellen, die sich im Nahfeld der Förderbrunnen befinden, erfolgt eine kontinuierliche Erfassung der Grundwasserstände mit Hilfe automatischer Messdatensammler. Eine jährliche Untersuchung der Grundwasserbeschaffenheit (Vollanalyse) ist an insgesamt 33 Grundwassermessstellen an 21 Standorten vorgeschrieben (Abbildung 67). Die Überwachung sowohl der **Grundwassermenge** als auch der **Grundwasserqualität** zielt darauf ab, mögliche nachteilige Umweltauswirkungen durch die Grundwasserentnahme erkennen und erforderliche Gegenmaßnahmen rechtzeitig einleiten zu können. Gleichzeitig erfüllt der überdurchschnittliche Umfang des vorgeschriebenen Monitoringprogramms auf Föhr auch die Anforderungen an die Eigenüberwachung des Wasserversorgers.



Abbildung 67: Im Rahmen des Grundwassermonitorings überwachte Grundwassermessstellen in den Einzugsgebieten der Wasserwerke Föhr-West (a) und Föhr-Ost (b).

Observation wells in the catchment areas of the water works Föhr-West (a) and Föhr-Ost (b) surveyed in the groundwater monitoring program.

Mit Hilfe der **Grundwasserstandsmessstellen** wird das kurz- bis langfristige Verhalten des Grundwasserspiegels kontrolliert. Kurzfristige Messungen dienen beispielsweise zur Kontrolle der Reichweite der Absenkungstrichter in jahreszeitlich bedingten, hydrologischen Extremsituationen wie Trockenperioden. Messreihen des Grundwasserspiegels über viele Jahre erlauben eine Auswertung der Ganglinien hinsichtlich ihres langfristigen Trendverhaltens. So kann zum Beispiel erkannt werden, ob eine Übernutzung der Grundwasserleiter auf Dauer zu sinkenden Grundwasserständen führt oder sich die prognostizierte Erhöhung des Grundwasserspiegels infolge des Meeresspiegelanstiegs langfristig bemerkbar macht (Kapitel 7). Weiterhin kann die Messung der Grundwasserstände zur Beweissicherung bei Betroffenheiten Dritter dienen, wenn unerwünschte Auswirkungen der Grundwasserentnahme nicht auszuschließen sind.

Durch die Grundwasserentnahme an den Förderbrunnen ändern sich zwangsläufig die Fließwege und -geschwindigkeiten des Grundwassers gegenüber dem Naturzustand, was auch Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit hat. Infolge der Druckentlastung im Nutzhorizont, die mit der Grundwasserentnahme einhergeht, können Nähr- und Schadstoffe dem genutzten Grundwasserleiter von oben her schneller zusickern, oder versalzenes Grundwasser kann seitlich oder von unten in den Nutzhorizont eindringen. Daher ist zum einen eine Überwachung der Grundwasserqualität im Einflussbereich der Förderbrunnen erforderlich. Zum anderen dienen die **Beschaffenheitsmessstellen** der Überwachung flächenhafter Gefährdungspotenziale in den Grundwassergewinnungsgebieten. Gerade bei den Einzugsgebieten der beiden Föhrer Wasserwerke, die ein nur geringes natürliches Schutzpotenzial besitzen, ist das Ausmaß des Stoffeintrags in das Grundwasser von der Art der Landbewirtschaftung abhängig und unterliegt Veränderungen, die zu überwachen sind. Weiterhin ist die besonders für den Wasserversorger wichtige Funktion von **Vorwarnmessstellen**, mit deren Hilfe der direkte Anstrombereich der Förderbrunnen hinsichtlich akuter Gefährdungen überwacht wird, im Monitoringkonzept berücksichtigt. Und letztlich muss infolge der küstennahen Lage der

Grundwassergewinnungsgebiete auf Föhr generell eine potenzielle Gefährdung der Süßwasservorkommen durch eindringendes Meerwasser angenommen werden - auch wenn bisher keine Anzeichen für eine zunehmende Grundwasserversalzung erkennbar sind. Auch für diese Überwachungsaufgabe sind im Monitoringprogramm geeignete Messstellen berücksichtigt.

Die vorgenannten Gefährdungspotenziale für das Grundwasser werden sich durch die prognostizierten **Auswirkungen des Klimawandels** vermutlich verschärfen (Kapitel 7). Dem umfassenden und kontinuierlichen Grundwassermonitoring kommt daher als Grundlage für Datenvergleiche und -auswertungen auch weiterhin eine große Bedeutung zu. Die Ergebnisse des Grundwassermonitorings werden in jährlichen Überwachungsberichten, die langfristige Grundwasserganglinien und Zeitreihen der gemessenen Grundwasserinhaltsstoffe enthalten, übersichtlich zusammengestellt und der zuständigen Wasserbehörde beim Kreis Nordfriesland vorlegt.

Neben dem oben beschriebenen Grundwassermonitoring bestehen bei einer öffentlichen Trinkwasserversorgung selbstverständlich auch **gesundheitsbehördliche Überwachungsaufgaben** nach der TrinkwV. Hierbei stehen der Schutz der menschlichen Gesundheit und die Gewährleistung der Genussauglichkeit und Reinheit des abgegebenen Trinkwassers im Vordergrund. Die Überwachungspflichten umfassen daher vor allem Untersuchungen des vom Wasserwerk abgegebenen Reinwassers, die am Wasserwerksausgang und an weiteren Zapfstellen im Leitungsnetz durchgeführt werden. In besonderen Fällen, wie beim Auftreten des Metaboliten Desphenylchloridazon im Föhrer Grundwasser (Kapitel 6.3), kann die Gesundheitsbehörde auch Rohwasseranalysen an den Förderbrunnen veranlassen.

Ausschließlich im Rahmen der Eigenüberwachung werden vom WBV Föhr Sonderuntersuchungen durchgeführt, z. B. die ständige Leitfähigkeitsmessung in einigen Förderbrunnen zur Soforterkennung einer möglichen Grundwasserversalzung und die kontinuierliche Nitratbestimmung im Reinwasser an den beiden Wasserwerksausgängen.

7 Grundwasser im Klimawandel – Ergebnisse des Projektes CLIWAT für die Insel Föhr

➤ **Wolfgang Scheer, Bernd König,
Martin Lilienfein**

7.1 Klimawandel – womit müssen wir rechnen?

In den zahlreichen Studien, die die Auswirkungen des Klimawandels auf Umwelt und Gesellschaft zum Thema haben, wurden die möglichen Veränderungen, die den unterirdischen Teil des Wasserkreislaufs betreffen, bisher nur wenig beachtet. Das Projekt CLIWAT hat sich zum Ziel gesetzt, die Zusammenhänge zwischen den aktuellen Projektionen und den daraus abgeleiteten Auswirkungen auf die Grund- und Oberflächenwassersysteme zu erklären und die daraus resultierenden Folgen aufzuzeigen. Im folgenden Abschnitt sind die Kernaussagen aus den gemeinsamen Untersuchungen in den sieben Pilotgebieten stark vereinfacht zusammengefasst.

Allen bisherigen Untersuchungen ist gemein, dass sie von bestimmten Eckdaten ausgehen, die in der unten stehenden Aufstellung (Tabelle 4) kurz dargestellt sind:

- das Wetter wird insgesamt extremer
- die Durchschnittstemperaturen steigen
- die jährliche Menge und zeitliche Verteilung der Niederschläge ändert sich
- es fallen geringere Niederschläge im Sommer
- die Starkregenereignisse im Sommer nehmen jedoch zu
- es fallen zunehmende Niederschläge im Winter
- der Meeresspiegel steigt

Die im CLIWAT Projekt berücksichtigten Szenarien lehnen sich an das sogenannte A2 Szenario des UN Weltklimarats Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) an, das von einem moderaten Wachstum der Weltwirtschaft ausgeht. In der Tabelle 4 ist als Beispiel das aktuelle Szenarium für die deutsche Nordseeküste aus dem Norddeutschen Klimaatlas zitiert.

Tabelle 4: Mögliche klimatische Änderungen an der deutschen Nordseeküste bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071-2100) im Vergleich zu heute (1961-1990) (www.norddeutscher-klimaatlas.de, Stand 11/2011, MEINKE & GERSTNER 2009).

	Jahr	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Durchschnittliche Temperatur (°C)	+ 2,8 °C	+ 2,5 °C	+ 2,8 °C	+ 3,0 °C	+ 3,0 °C
Niederschlag (%)	+ 6 %	+ 9 %	- 19 %	+ 12 %	+ 25 %
Mittlere Windgeschwindigkeit (%)	+ 2 %	+ 2 %	- 2 %	+ 1 %	+ 5 %
Sturmintensitäten (%)	+ 1 %	+ 1 %	- 2 %	+ 1 %	+ 5 %
Sonnenscheindauer (%)	- 7 %	- 11,0 %	+ 1 %	- 4 %	- 18 %

Wenn die prognostizierten Veränderungen eintreten, können sie regional und lokal schwerwiegende Folgen für Umwelt und Gesellschaft haben:

- der Grundwasserspiegel wird in weiten Bereichen ansteigen,
- zeitweilige bis dauerhafte Überflutungen in Niederungsgebieten nehmen zu,
- durch die zunehmenden Überflutungen kommt es zu Problemen in der Infrastruktur,
- die Standsicherheit von Gebäuden, Straßen- und Eisenbahntrassen ist gefährdet,
- Bauwerke zur Entwässerung sind zunehmend unterdimensioniert,
- längere Dürreperioden im Sommer steigern die Grundwasserentnahmen für die Feldbewässerung,
- die Grundwasserspiegel können im Sommer regional stärker absinken,
- an den Küsten und auf den Inseln kommt es verstärkt zu Salzwasserintrusionen,
- in den flachen Küstenbereichen und auf den Inseln bewirkt der Meeresspiegelanstieg einen zusätzlichen Anstieg des Grundwassers,

- in den flachen Küstenbereichen und auf den Inseln kommt es verstärkt zu einem Aufstieg von Salzwasser.

Die Veränderungen werden sich nach den derzeitigen Berechnungen über einen langen Zeitraum vollziehen und zunächst kaum wahrnehmbar sein. Daher sind langfristige Planungen erforderlich, um rechtzeitige Anpassungsstrategien entwickeln zu können.

Die Ergebnisse des Projekts für die 7 Projektgebiete sind in dem gemeinsamen Bericht: „Groundwater in a Future Climate - The CLIWAT Handbook“ zusammengefasst (CLIWAT WORKING GROUP 2011).

In der hier vorgelegten Broschüre geht es speziell um das Projektgebiet Föhr. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Grundwassermodellierung mit den zu erwartenden Änderungen für den Wasserhaushalt der Insel Föhr vorgestellt.

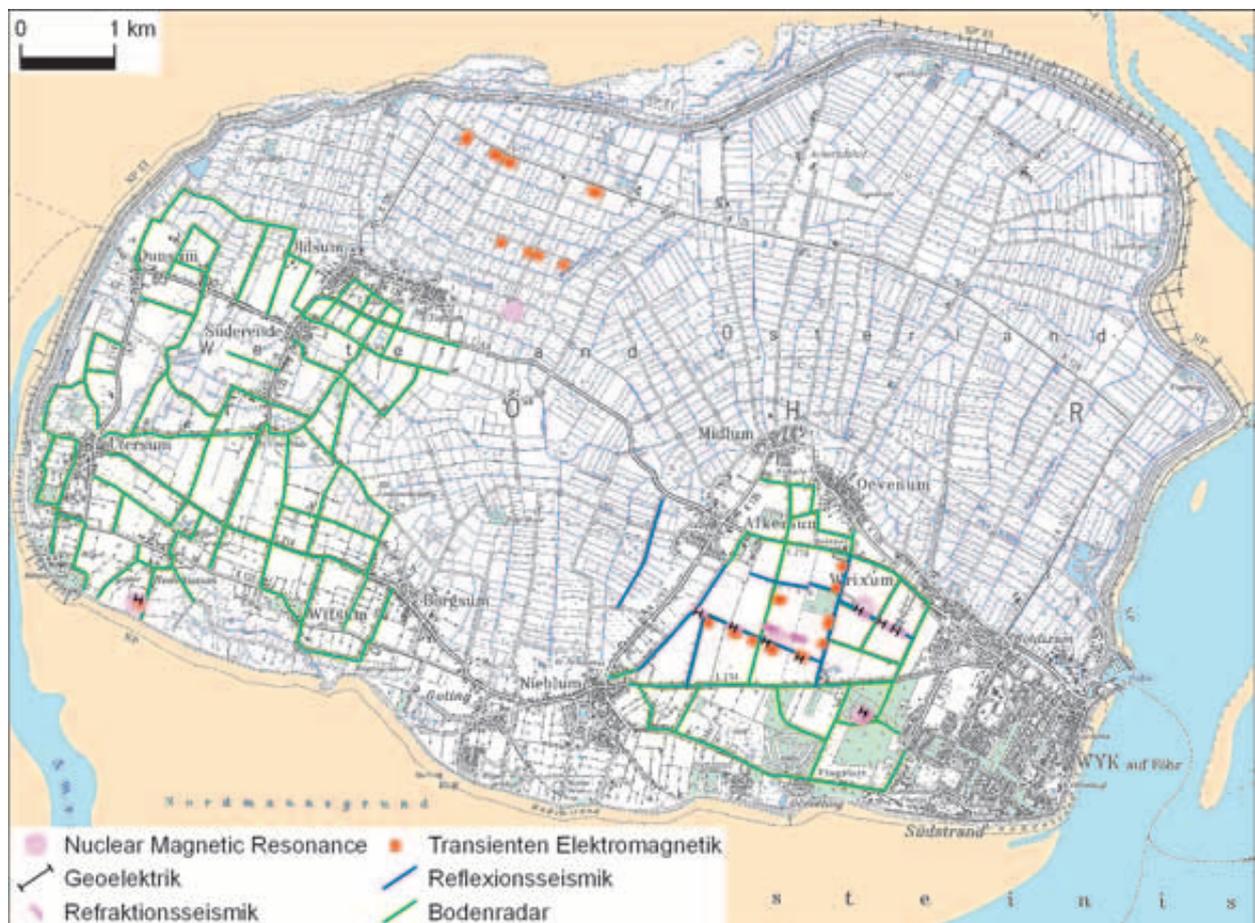
wie zur Ausweisung der Wasserschutzgebiete der Wasserwerke Föhr-West und Föhr-Ost vor. Die Bereiche um die beiden auf den Geestkernen gelegenen Wasserfassungen waren durch zahlreiche Brunnen- und Messstellenbohrungen recht gut erkundet (Kapitel 5). Ein vom Wasserbeschaffungsverband Föhr im Jahr 2007 in Auftrag gegebenes numerisches Grundwasserströmungsmodell berücksichtigte alle bis zu diesem Zeitpunkt vorliegenden hydrogeologischen und hydraulischen Daten. Da das Aussagegebiet dieses Modells entsprechend seiner Zielsetzung aber auf die weitere Umgebung der Wasserwerke beschränkt war, bedurfte es zusätzlicher Erkundungen, um die geplanten Modellierungen der gesamten Insel zu ermöglichen. Aus diesem Grunde wurden die in Kapitel 4 beschriebenen geophysikalischen Untersuchungen durchgeführt. So wurde es möglich, ein digitales dreidimensionales Geologisches Modell der Insel zu entwerfen, das die Basis für die Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Insel bildet.

7.2 Das hydrogeologische und geophysikalische Untersuchungsprogramm auf Föhr

Zu Beginn der Untersuchungen im Projekt CLIWAT lagen auf der Insel vor allem Daten aus den hydrogeologischen Arbeiten zur Erschließung der Grundwasservorkommen so-

Die Abbildung 68 zeigt die Lokalitäten, an denen während der Projektlaufzeit geophysikalische Untersuchungen durchgeführt wurden. Nicht dargestellt sind die Fluglinien der SkyTEM Befliegung, die die ganze Insel mit Ausnahme der bebauten Gebiete abdeckte. Diese finden sich in den Abbildungen 35, 37 und 48.

Abbildung 68: Lageplan der geophysikalischen Untersuchungen - ohne Fluglinien der SkyTEM Befliegung. Location map showing geophysical investigations - without flightlines of the SkyTEM survey.



Vor allem durch die Ergebnisse der seismischen und aeroelektromagnetischen Messungen konnte ein erheblicher Wissenszuwachs hinsichtlich des geologischen Untergrundaufbaus sowie der Verbreitung von Süß- und Salzwasser auf der Insel gewonnen werden (Abbildung 69 für die Tiefe von 10-20 Meter, Abbildung 37 für 20-30 Meter).

Die wichtigsten Ergebnisse der seismischen und der aeroelektromagnetischen Messungen sind:

Seismik

- Nachweis der im Untergrund vermuteten glaziotektonischen Stauchungsstrukturen,
- Bestimmung der Tiefenlage der Quartärbasis,

- Nachweis von eiszeitlichen Rinnen,
- Bestimmung von Gesteinseigenschaften entlang der seismischen Profile.

Aeroelektromagnetik (SkyTEM)

- Bestimmung von Richtung und räumlicher Ausdehnung der glaziotektonischen Stauchungsstrukturen (Unterscheidung Grundwasserleiter und –geringleiter),
- Bestimmung der räumlichen Ausdehnung der Süßwasserlinse (Abbildung 69),
- Abgrenzung von Süß- und Salzwasser zwischen Geest und Marsch,
- Abgrenzung des Abstrombereichs von Süßwasser in die Marsch,
- Bestimmung von Bereichen mit Grundwasserab- oder -zustrom an der Küstenlinie.

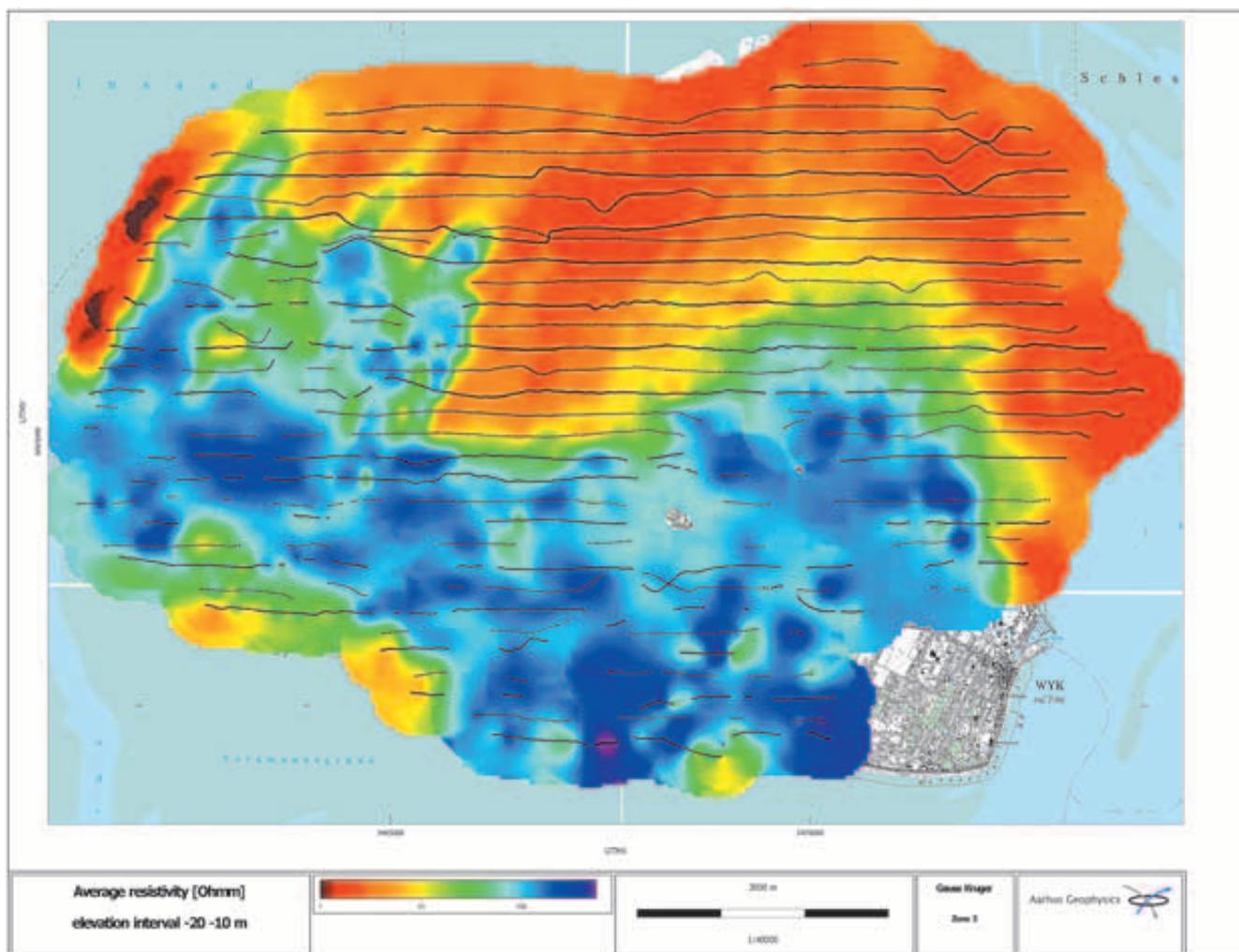


Abbildung 69: Karte der elektrischen Gesteinswiderstände in 10 bis 20 m unter Gelände (SkyTEM Befliegung 2008), rot und gelb: Salz- und Brackwasser, blau und grün: Süßwasser.

Result of the SkyTEM survey 2008: electrical resistivities in the depth range 10 – 20 m below ground, red and yellow: salt water or brackish water, blue and green: fresh water.

Die Ergebnisse des geologisch-geophysikalischen Untersuchungsprogramms sind in das im Kapitel 5 beschriebene digitale Geologische Modell eingeflossen. Dieses Geologische Mo-

dell bildet die Basis für das Grundwassermodell, das zur Simulation der Auswirkungen des Klimawandels dient und im Folgenden beschrieben wird.

7.3 Grundwassermodell

7.3.1 Der Weg zum Grundwassermodell

Vor Aufstellung eines hydrogeologischen 3D-Grundwassermodells steht ein geologisch-hydrogeologisches Modellkonzept zum Entwickeln des Systemverständnisses. Das Konzept umfasst Informationen zum Strömungs-geschehen auf der Insel wie

- Verbreitung und Verbindungen der Grundwasserleiter,
- Anbindung der Grundwasserleiter an die Vorfluter,
- Abfluss von Grund- und Oberflächenwasser durch die Drainagen
- sowie die Grundwasserneubildung.

Dies erfordert zusätzlich zum Geologischen Modell eine umfassende Recherche und Inventarisierung von hydrologischen Daten und Zusammenhängen wie beispielsweise meteorologische Daten, Wasserstand und Tidenhub der Nordsee, Sickerwasserrate, die hieraus abgeleitete Grundwasserneubildung und die Drainagen. Weitere Parameter dienen zur Überprüfung und Kalibrierung des Modells, beispielsweise Grundwasserstands-Zeitreihen, Stichtagmessungen und Abflussmengen.

Die Eichung oder auch Kalibrierung des Grundwassermodells erfolgt über Variation von Gesteinskennwerten (beispielsweise die hydraulische Durchlässigkeit) bis zur Anpassung der berechneten an gemessene Wasserstands- und Abflussdaten zu festgelegten Zeitpunkten (Stichtagmessungen oder Ganglinien). Nach Abschluss der Kalibrierung erfolgt eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Empfindlichkeit des Modells auf die Variation von Eingangs- und Gesteinsparametern. Nach dem Nachweis der Schlüssigkeit kann das geeichte Modell für Prognoserechnungen eingesetzt werden.

7.3.2 Datengrundlage

Umfangreiche **meteorologische Tagesdaten** des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden für den Zeitraum 1937 bis 2011 zusammengestellt. Aus den Daten zu Niederschlag, Sonnenscheindauer, Temperatur und Windgeschwindigkeit konnte die Verdunstungsrate als Grundlage für die Berechnung der Sickerwasserrate bestimmt werden.

Vom LLUR wurden digitale **Bodennutzungs- und Bodenformenkarten** zur Verfügung gestellt; anhand dieser Informationen sowie der Verdunstungsrate und der Niederschlagsdaten wurden die Sickerwasserrate (Niederschlag

abzüglich Verdunstung) und die Grundwasserneubildung berechnet.

Grundwasserstände wurden vorwiegend durch den WBV Föhr und das LLUR zur Verfügung gestellt: Für das Wassergewinnungsgebiet Ost liegen 1,5 Millionen Daten seit 1965, für das Wassergewinnungsgebiet West 270.000 Daten seit 1974 vor. Die ersten umfassenden Stichtagmessungen wurden 2003 und 2004 im Rahmen der Schutzgebietenbearbeitung durch das Land Schleswig-Holstein durchgeführt, seit 2006 misst der WBV ein kleineres Programm an 2 Stichtagen pro Jahr. In insgesamt 22 ausgewählten Messstellen wird der Wasserstand per Datenlogger seit 2006 automatisch aufgezeichnet.

Tidewasserstände (Tabelle 5) werden seit 1994 automatisch erfasst und konnten vom Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz (LKN) Husum bereitgestellt werden.

Tabelle 5: Statistische Daten des Pegels Wyk (LKN Husum, 11/1994 - 12/2010).

	mNN	Differenz zum MW
NNW (niedrigster Wasserstand)	-3,18	3,24 m
MNW (mittleres Niedrigwasser)	-1,63	1,69 m
MW (Mittelwasser)	0,06	-
MHW (mittleres Hochwasser)	1,44	-1,38 m
HHW (höchster Wasserstand)	3,80	-3,74 m

Das **Entwässerungssystem** besteht aus einem Hauptsielzug zwischen dem Schöpfwerk Mitte im Norden der Insel und dem Laglumsiel (auch Sommerstau) nördlich von Wyk, in den ein weit verzweigtes Netz von Drainagegräben entwässern. Die Lage der wichtigsten Drainagegräben wurde der topografischen Karte entnommen, die topografische Höhe stammt aus dem sehr detaillierten digitalen Geländemodell (DGM1, LVermA-SH). Die über Pumpstunden berechneten Pumpmengen von 2 Schöpfwerken lieferte der Deich- und Sielverband Föhr. Die Hauptentwässerung der Insel findet über einen freien Ablauf am Sommerstau statt; Da-

ten liegen hierzu nicht vor, daher können die Entwässerungsmengen nur überschlägig mittels Überfallwehr bei ca. 3,5 Stunden Öffnungszeit der Fluttore pro Tide mit im Mittel 9,5 Mio m³/a abgeschätzt werden.

7.3.3 Auswahl und Aufstellung des Modells

Hydrogeologisches Modellkonzept

Die in Kapitel 5 beschriebenen grundwasserleitenden Schichten mit ihren teilweise komplizierten Lagerungsbedingungen werden zur Modellierung in 6 Grundwasserleitern zusammengefasst, die zum Teil in hydraulischer Verbindung miteinander stehen, beispielsweise in den eiszeitlichen Rinnen.

Im Einzelnen gilt:

- im Norden der Insel ist der erste Grundwasserleiter in der Marsch mit nach Norden mächtiger werdenden Kleischichten abgedeckt,
- auf den Geestkernen fehlt die Abdeckung weitgehend und das Grundwasser ist ungespannt,
- die über das gesamte Modellgebiet vertretenen ersten und zweiten Grundwasserleiter weisen bereichsweise eine zwischengelagerte Trennschicht auf,
- bis auf den Nordwesten der Insel sind die tiefer liegenden Grundwasserleiter 3 und 4 verbreitet, sie werden weitgehend durch Deckschichten abgedeckt,
- lokal bestehen Kontakte zwischen dem quartären 4. Grundwasserleiter und den Kaolinsanden (5. Grundwasserleiter), besonders in den Bereichen der eiszeitlichen Rinnen,
- die tertiären Kaolin- und Feinsande (Grundwasserleiter 5 und 6) sind, bedingt durch die glaziotektonischen Stauchungen, in mehrere, überwiegend in Nord-Süd-Richtung gestreckte Grundwasserleiterabschnitte unterteilt,
- die tertiären Kaolin- und Feinsande sind größtenteils hydraulisch verbunden, lediglich im östlichen Geestkern ist eine zwischengeschaltete Trennschicht nachgewiesen,
- die Basis des Modells bilden jungtertiäre Tone.

Die grundwasserführenden Schichten enden nicht an der Inselgrenze, sondern setzen sich im Wattbereich fort. Die südliche Fahrrinne, das Tief zwischen Amrum, Sylt und Föhr sowie das Tief östlich von Föhr schneiden in den ersten und teilweise auch in den zweiten Grundwasserleiter ein. Durch die Tideströmung ist eine Kolmatierung, also das Sedimentieren von

Schlick und Feinkorn, nicht zu erwarten. Es ist daher davon auszugehen, dass in diesem Bereich eine sehr gute Anbindung des Vorfluters Nordsee an den ersten und zweiten Grundwasserleiter besteht, im Wattbereich dagegen ist die Verbindung durch Schlick und toniges Substrat eingeschränkt. Im Wattbereich liegt eine permanente Wasserbedeckung mit Salzwasser entlang der Niedrigwasserlinie bei Ebbe an, entlang dieser Linie verläuft die angenommene Süß-Salzwassergrenze. Es ist davon auszugehen, dass diese Grenze in Richtung Insel relativ steil abtaucht, die SkyTEM-Daten weisen entlang der Küste mit Geestkern vorwiegend Süß- bis Brackwasser bis in eine Tiefe von ca. 30 m nach (siehe Kapitel 5). Im Mittel- und Hochwasserbereich des Watts diffundiert Salzwasser mit höherer Dichte als Brackwasser in den Süßwasserabstrom der Insel.

Nach Norden strömt Süßwasser aus der Geest in den Marschenbereich ab, hier werden im Schnitt 5,5 Mio m³ Drainagewasser pro Jahr in die Nordsee gepumpt, dazu fließen geschätzt 9,5 Mio m³ pro Jahr frei über das Laglumsiel ab.

Modellauswahl

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Zellgrößen bzw. Dichte der Knotenabstände wurde aus Gründen der Recheneffektivität ein Finite-Elemente-Modell mit unregelmäßigem Dreiecksgitter gewählt.

Die Grundwassermodellierung erfolgte mit dem dreidimensionalen finite-Elemente Modell MicroFEM (HEMKER & DE BOER 1997), das den folgenden Anforderungen entspricht:

- Abbildung mehrerer grundwasserleitender und -geringleitender Schichten,
- Verdichtung der Modellzellen entlang der Rinnenflanken im 10er-Meter-Bereich, um die Brunnen herum und entlang der Drainagen im Norden der Insel,
- Berücksichtigung der Grundwasserneubildung sowie von Brunnen und Drainagen,
- stationäre (Gleichgewichtszustand) und instationäre Berechnung (Änderungen der Randbedingungen wie Förderrate, Meeresspiegel, Grundwasserneubildung etc.).

Die Modellgrenze umfasst die Insel einschließlich des umgebenden Watts (Abbildung 70).

Die Lage der Modellknoten wurde so gewählt, dass alle Messstellen, Brunnen, Rinnenflanken und ausgewählte Drainagegräben zwanglos abgebildet werden können. Das Modell besteht aus 6 Grundwasserleitern, 6 Grundwassergingleitern als Trennschichten sowie einer hydraulisch dichten Modellbasis (Abbildung 71).

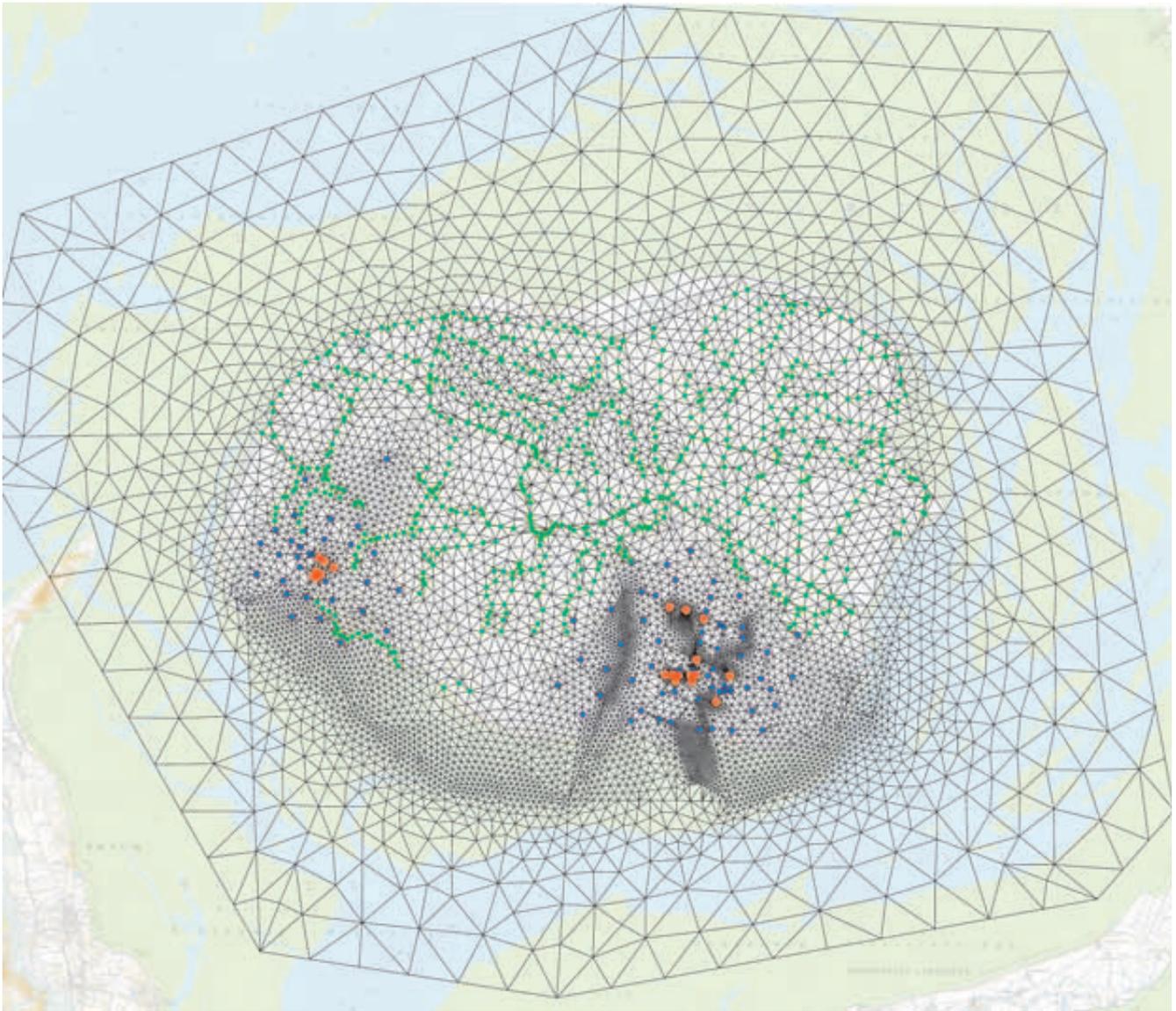
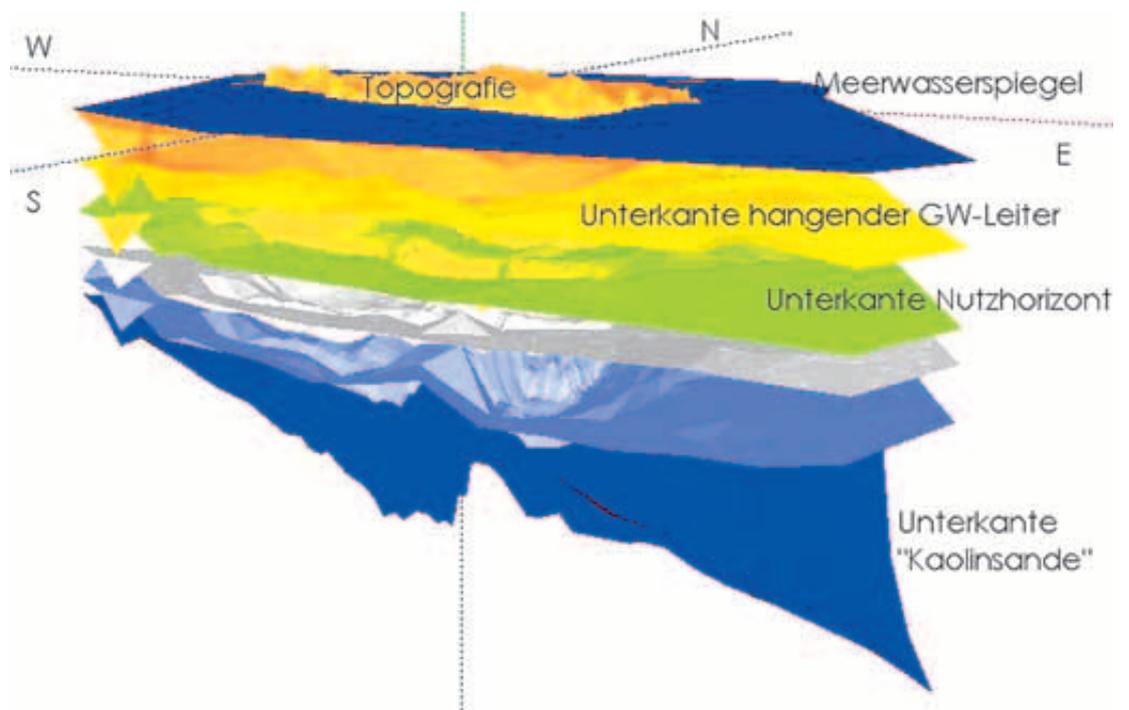


Abbildung 70: Horizontale Diskretisierung (Festlegung der Gitterknoten) des Modells, blau: Messstellen, rot: Brunnen, grün: Drainagen.
 Horizontal model discretisation, blue: observation well, red: production well, green drainage.

Abbildung 71:
 Vertikale Untergliederung der Modellschichten: Unterkanten der Grundwasserleiter, Blickrichtung NW.
 Vertical model discretisation: base of aquifers, viewing direction north-west.



Ausgangssituation

Für die Berechnung des Ist-Zustandes liegen die Grundwasserneubildung auf Basis der Wetterdaten der hydrologischen Jahre 2001 bis 2010 (das hydrologische Jahr reicht vom 1. November bis zum 31. Oktober des Folgejahres), der korrespondierende mittlere Nordseewasserstand und die mittleren Förderdaten der Brunnen auf Föhr aus 2010 zugrunde.

Beide Geestkerne sind Grundwasser-Neubildungsgebiete, in denen das Sickerwasser als Grundwasserneubildung dem Grundwasser aufgeschichtet wird. Die höchsten Wasserstände sind nordwestlich des Wassergewinnungsgebietes Ost mit 2,0 mNN (2003) und östlich des Wassergewinnungsgebietes West mit 2,1 mNN (2004) nachgewiesen.

Über die Förderbrunnen des WBV Föhr und des Golfclubs Föhr wird Grundwasser entnommen, was im Wasserwerksbereich zu einer signifikanten Absenkung in den Nutzhorizonten führt. Dies paust sich deutlich erkennbar in den hangenden Grundwasserleiter durch, der mit dem zweiten Grundwasserleiter in direkter Verbindung steht. Das Grundwasser strömt von den Geestkernen allseitig in Richtung der Drainagen im Norden und der Nordsee im Süden ab, wobei die größten Mengen in die Drainagen in den Bereichen ohne bzw. mit geringer Kleimächtigkeit und niedrigem Bemessungswasserstand (Soll-Wasserstand der Drainage) abfließen. Dies ist

vor allem im Hauptzielzug nördlich des östlichen Geestkerns der Fall. Im Westen sind die Abstrommengen deutlich geringer im Vergleich zum östlichen Geestkern, da dort die Bemessungswasserstände der Drainagen deutlich höher als am Hauptzielzug sind und das Grundwasserneubildungsgebiet im westlichen Geestkern kleiner und von Drainagen stark eingegrenzt ist.

Die Entnahme aus dem tertiären Grundwasserleiter (Grundwasserleiter 5) im Einzugsgebiet Föhr-Ost wird über Verbindungen zu den hangenden Wasserleitern aus dem Grundwasserneubildungsbereich bis hin zum Golfplatz ausgeglichen.

Grundlagen für die Prognoserechnungen

Die Prognoserechnungen basieren auf dem Emissionsszenario A2 des IPCC. Dies stellt eine von vielen möglichen Entwicklungen im Hinblick auf Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung, Ressourcennutzung und Technikeinsatz dar. Das Szenario bleibt noch erheblich hinter den in den letzten Jahren weltweit beobachteten Ausstößen von Treibhausgasen zurück. Die demnach erwarteten Änderungen der Klimaparameter werden den mittleren hydrologischen Basisdaten des Zeitraums 2001-2010 aufgeschlagen und hieraus die Sickerwasser- und Grundwasserneubildungsrate berechnet (Tabelle 6).

Tabelle 6: Basisdaten für die Prognoserechnung – aufbauend auf den Projektionen des Norddeutschen Klimaatlas (siehe Tabelle 4)

Datum		Addition			Zunahme [%]		
von	bis	Temp. Winter [°C]	Temp. Sommer [°C]	Pegel [m]	Niederschlag Winter	Niederschlag Sommer	Wind
Okt-2000	Sep-2010	Startdaten					
Okt-2010	Sep-2015	0,05	0,05	0,01	0,5%	0,0%	0,0%
Okt-2015	Sep-2020	0,10	0,10	0,02	1,0%	0,0%	0,0%
Okt-2020	Sep-2025	0,15	0,15	0,04	1,5%	0,0%	0,0%
Okt-2025	Sep-2030	0,20	0,25	0,06	2,0%	-0,5%	0,5%
Okt-2030	Sep-2035	0,30	0,35	0,09	3,0%	-0,5%	0,5%
Okt-2035	Sep-2040	0,40	0,50	0,12	4,0%	-0,5%	0,5%
Okt-2040	Sep-2045	0,50	0,65	0,16	5,0%	-1,0%	1,0%
Okt-2045	Sep-2050	0,65	0,80	0,20	6,0%	-1,0%	1,0%
Okt-2050	Sep-2055	0,80	1,00	0,25	7,5%	-1,0%	1,0%
Okt-2055	Sep-2060	0,95	1,20	0,30	9,0%	-1,5%	1,5%
Okt-2060	Sep-2065	1,15	1,45	0,36	10,5%	-1,5%	1,5%
Okt-2065	Sep-2070	1,35	1,70	0,43	12,0%	-2,0%	2,0%
Okt-2070	Sep-2075	1,55	1,95	0,50	13,5%	-2,0%	2,0%
Okt-2075	Sep-2080	1,80	2,25	0,58	15,5%	-2,5%	2,5%
Okt-2080	Sep-2085	2,05	2,55	0,66	17,5%	-3,0%	3,0%
Okt-2085	Sep-2090	2,30	2,90	0,75	20,0%	-3,5%	3,5%
Okt-2090	Sep-2095	2,60	3,25	0,84	22,5%	-4,0%	4,0%
Okt-2095	Sep-2100	2,90	3,60	0,94	25,0%	-5,0%	5,0%

Die Temperatur steigt nach diesem Szenario um durchschnittlich 3 °C bis zum Ende des Jahrhunderts, die Windgeschwindigkeit relativ gering um 5 % und der Winterniederschlag um 25 %. Im Sommer nimmt der Niederschlag dagegen ab, insgesamt führen diese meteorologischen Veränderungen zu einer Zunahme der Sickerwasserrate von ca. 8 %, da die Neubildung vorwiegend im Winter stattfindet.

Der Meeresspiegel wird nach dieser Klimaprojektion zunächst gering und dann stetig stärker um insgesamt 0,94 m auf 1,0 mNN steigen. Dies liegt in der von den verschiedenen Modellen ausgespannten Bandbreite (0,6 bis 1,4 m) des erwarteten weltweiten Meeresspiegelanstiegs. Die festen Druckspiegelhöhen im ersten und zweiten Grundwasserleiter rücken sukzessive entsprechend des Meeresspiegelanstiegs höher und näher an die Strandlinie heran.

In den Prognoserechnungen wird von einem Halten des Bemessungswasserstandes aller Drainagen ausgegangen, dies schließt die Godel, das einzige Fließgewässer auf Föhr, mit ein.

7.4 Ergebnisse der Grundwassermodellierung für Föhr

Erwartungsgemäß zeigten sich bei der Modellierung deutliche Reaktionen auf die sich im betrachteten Zeitraum verändernden Eingabeparameter. Die Modellergebnisse geben dabei Hinweise, in welcher Größenordnung sich die Wasserbilanz auf der Insel zukünftig verschieben kann. Die Tabelle 7 gibt die wichtigsten Veränderungen wieder, die den Wasserhaushalt auf der Insel betreffen werden.

Tabelle 7: Erwartete Änderung der Wasserbilanz der Insel 2010 – 2100 als Ergebnis stationärer Modellrechnungen

Berechnungszeitpunkt	2010	2100	Änderungen
Pegelstand Nordsee [mNN]	+0,06	+1,00	0,94 m
Grundwasserneubildung in der Geest m ³ /a	8.530.779	9.278.994	9%
Grundwasserneubildung auf der Insel (Gesamtmenge)[m ³ /a]	19.976.781	21.570.632	8%
Drainagen aus der Marsch [m ³ /a]	17.351.364	20.918.113	21%
Abstrom aus den Geestkernen in die Marsch [m ³ /a]	2.790.000	3.450.000	24%
lateraler Ab- und Zustrom über die Strandlinie in den Wattbereich:			
Wyk (O) [m ³ /a]	192.000	116.000	-40%
Wyk (S) [m ³ /a]	368.200	371.300	1%
Flugplatz (S) [m ³ /a]	596.500	502.000	-16%
Godelniederung/Utersum (S) [m ³ /a]	451.600	233.400	-48%
Utersum/Dunsum (W) [m ³ /a]	150.700	13.000	-91%
Nordküste (N) [m ³ /a]	-59.400	-611.700	560%
Ostküste/Sommerstau (O) [m ³ /a]	-84.800	-748.000	882%

In der **Geest** bewirken die steigenden Niederschlagsmengen, besonders durch die Zunahme im Winterhalbjahr, eine um neun Prozent erhöhte jährliche Grundwasserneubildung und führen so zu steigenden Grundwasserständen. Gleichzeitig nimmt auch der Abstrom von Grundwasser in Richtung Marsch zu.

In Abbildung 72 wird beispielhaft der im Modell errechnete Anstieg des Grundwasserspiegels in den Messstellen Beo 71 und Beo 75 gezeigt. Für die im zentralen Bereich der östlichen Geestinsel gelegene Messstelle Beo 71 wird danach bis zum Jahr 2100 ein Anstieg des Grundwasserstandes von 38 cm im ers-

ten und 32 cm im zweiten Grundwasserleiter erwartet. An der Südküste steht dem zunehmenden Abstrom in Richtung Watt das steigende Niveau des Meeresswassers entgegen. Aus diesem Grunde ist dort mit einem zusätzlich verstärkten Anstieg der Grundwasserstände zu rechnen. So wurde für die nahe der Küstenlinie gelegene Messstelle Beo 75 für den zweiten Grundwasserleiter eine Zunahme des Grundwasserspiegels von 59 cm berechnet. Der größte flächenhafte Anstieg des Grundwassers wird vor allem den östlichen Geestkernen und die Küstenstreifen der Insel betreffen (Abbildung 73).

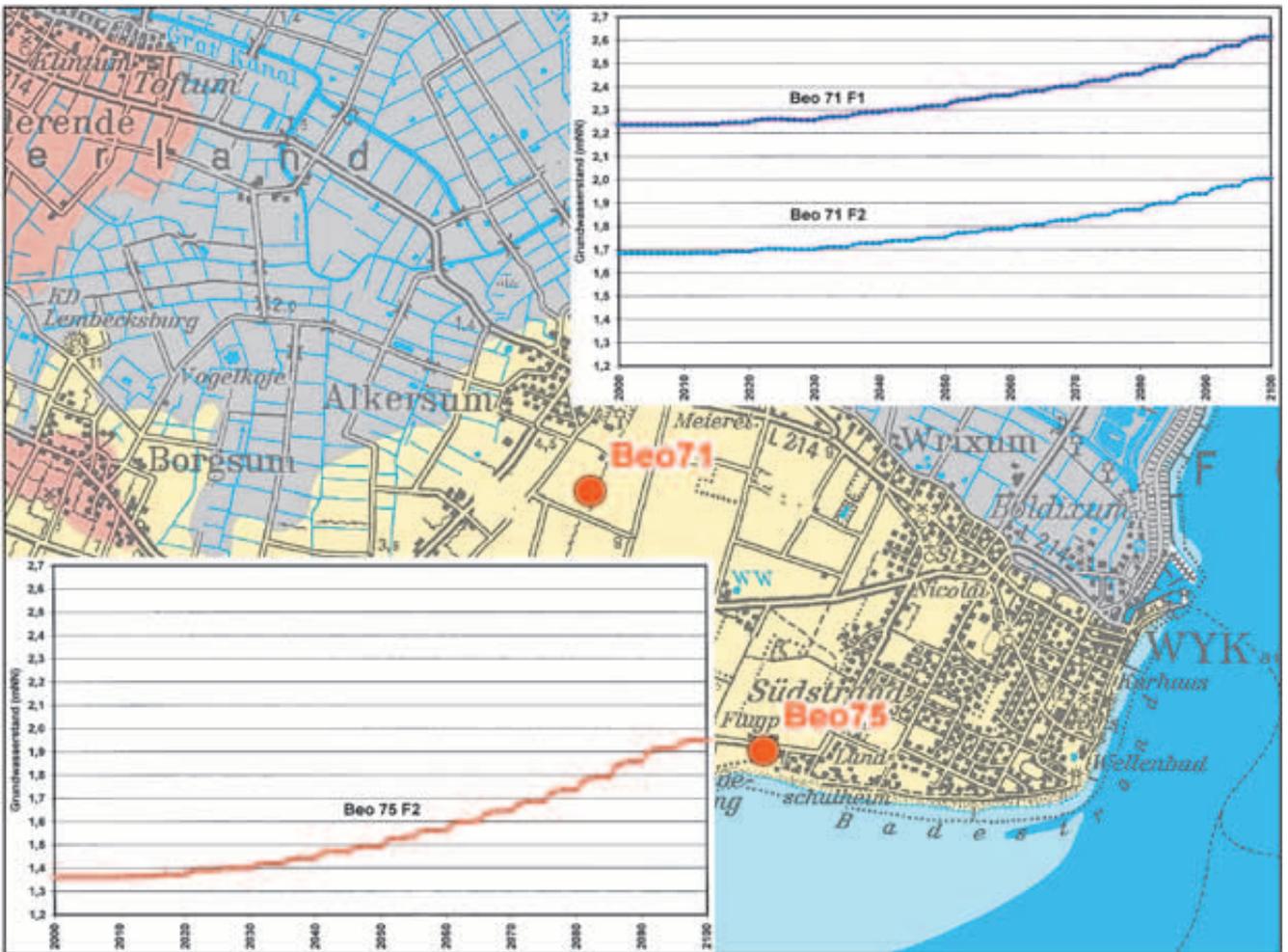


Abbildung 72: Berechneter Anstieg des Grundwasserstandes in der Messstellen Beo 71 und Beo 75. F1, F2 Filterstellung im ersten bzw. zweiten Grundwasserleiter.

Calculated increase of groundwater table at observation wells Beo 71 and Beo 75.



Abbildung 73: Berechneter Anstieg des Grundwasserspiegels im oberflächennahen Grundwasserleiter bis 2100, Differenzplan 2010 - 2100.

Calculated increase of groundwater table of the near surface aquifer, differential map 2010 - 2100.

In der **Marsch** wird der Grundwasserstand durch das enge Netz an Entwässerungsgräben und die Wasserhaltungsmaßnahmen geregelt. Die zunehmenden Niederschlagsmengen werden dort nicht zu einer signifikant wachsenden Grundwasserneubildung führen, da sie nahezu unmittelbar über den Oberflächenabfluss abgeführt werden. Die dadurch ansteigenden Wassermengen, die über die Schöpfwerke und Siele abgeführt werden müssen, werden zusätzlich durch den vermehrten Zustrom von Grundwasser aus den Geestkernen erhöht. Insgesamt wird bis Ende des Jahrhunderts eine Zunahme der in der Wasserhaltung der Marsch anfallenden Oberflächenwassermenge um mehr als 20 Prozent prognostiziert (siehe Tabelle 7).

Durch den Meeresspiegelanstieg geraten weite Flächen unter Meeresniveau (Abbildung 74). Dadurch wird an den Küsten zunehmend ein Druckgefälle in Richtung auf die Marsch entstehen, so dass der seitliche Zustrom von Salzwasser aus dem Watt in Richtung auf die Marschflächen zunimmt. In Abbildung 75 sind die im Modell errechneten horizontalen Grundwasserströme für den oberflächennahen Wasserleiter in einer Karte dargestellt. Die Pfeile geben dabei die Richtung und Menge des fließenden Grundwassers an. In Blau ist der heutige Strömungszustand abgebildet, in Rot der Zustand im Jahre 2100. Die Größe der Pfeile ist dabei analog zur fließenden Menge. Zu erkennen ist besonders der erheblich verstärkte Zustrom von Meerwasser in die Marsch im Küstenstreifen der östlichen und nördlichen Inselgrenze sowie der zunehmende Abstrom von der östlichen Geest in Richtung Marsch. In der Karte sind es die Bereiche, in denen die roten Strömungspfeile (2100) die blauen (2010) deutlich überlagern. In den zentralen Gebieten der Marsch sind dagegen nur geringe horizontale Grundwasserströme zu erkennen.

Die berechneten Veränderungen der Grundwasserströme über die Inselränder sind in der Abbildung 76 für die Marsch- und Geestbereiche zur Veranschaulichung quantifiziert. Dabei ist besonders der stark ansteigende Anteil an Meerwasser bemerkenswert, der, wie in Abbildung 75 gezeigt, hauptsächlich in den Ostteil der Marsch eindringt.

Gleichzeitig wird das in geringer Tiefe im Untergrund schon heute vorhandene Salzwasser weiter aufsteigen, so dass sich die nur geringmächtige Süßwasserlinse in der Marsch verringert. Verstärkt wird dieser Effekt noch durch die für die Bewirtschaftung der Flächen nötige Wasserhaltung, durch die erhebliche Anteile des Süßwassers als Oberflächenwasser abgeführt werden. In der Abbildung 77 ist der Prozess des Salzwasseraufstiegs in der Marsch schematisch dargestellt. Bis in den Wurzelraum der Nutzpflanzen aufsteigendes Brack- und Salzwasser kann zu schwerwiegenden Beeinträchtigungen der landwirtschaftlich genutzten Flächen führen, die durch Niederschlagsdefizite und längere Trockenperioden im Sommerhalbjahr zusätzlich verschärft werden können.

Godelniederung

In der Godelniederung, die nicht durch ein Deichbauwerk geschützt wird, ist bei steigendem Meeresspiegel mit einer Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Überflutungen zu rechnen. Dadurch gelangt zunehmend Salzwasser in die Niederungsflächen und vermischt sich mit dem aus der Geest zuströmenden Süßwasser. Die geophysikalischen Messungen zeigen, dass hier schon heute Salzwasser landeinwärts in Richtung des westlichen Geestkerns vorgedrungen ist, ein Effekt, der sich zukünftig weiter verstärken kann.

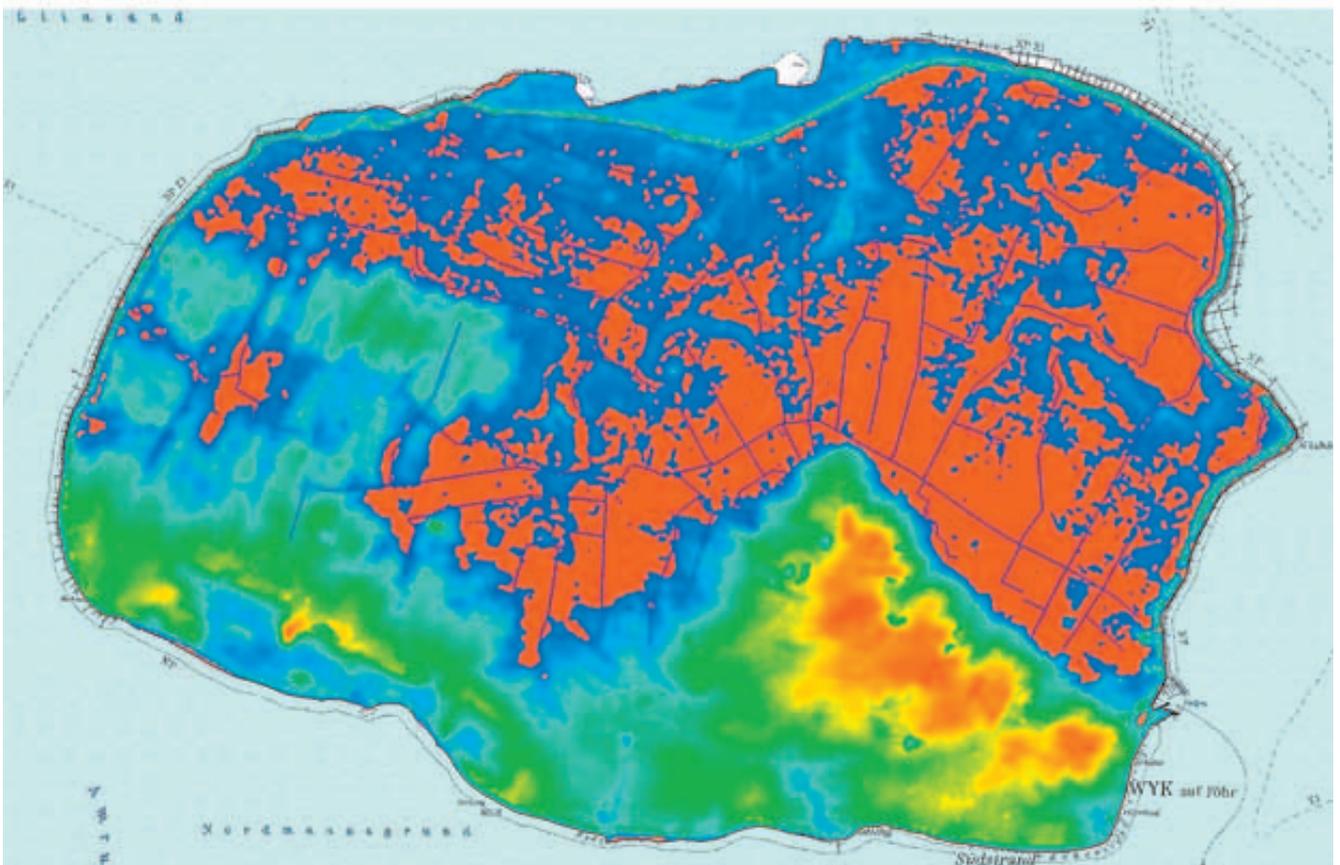
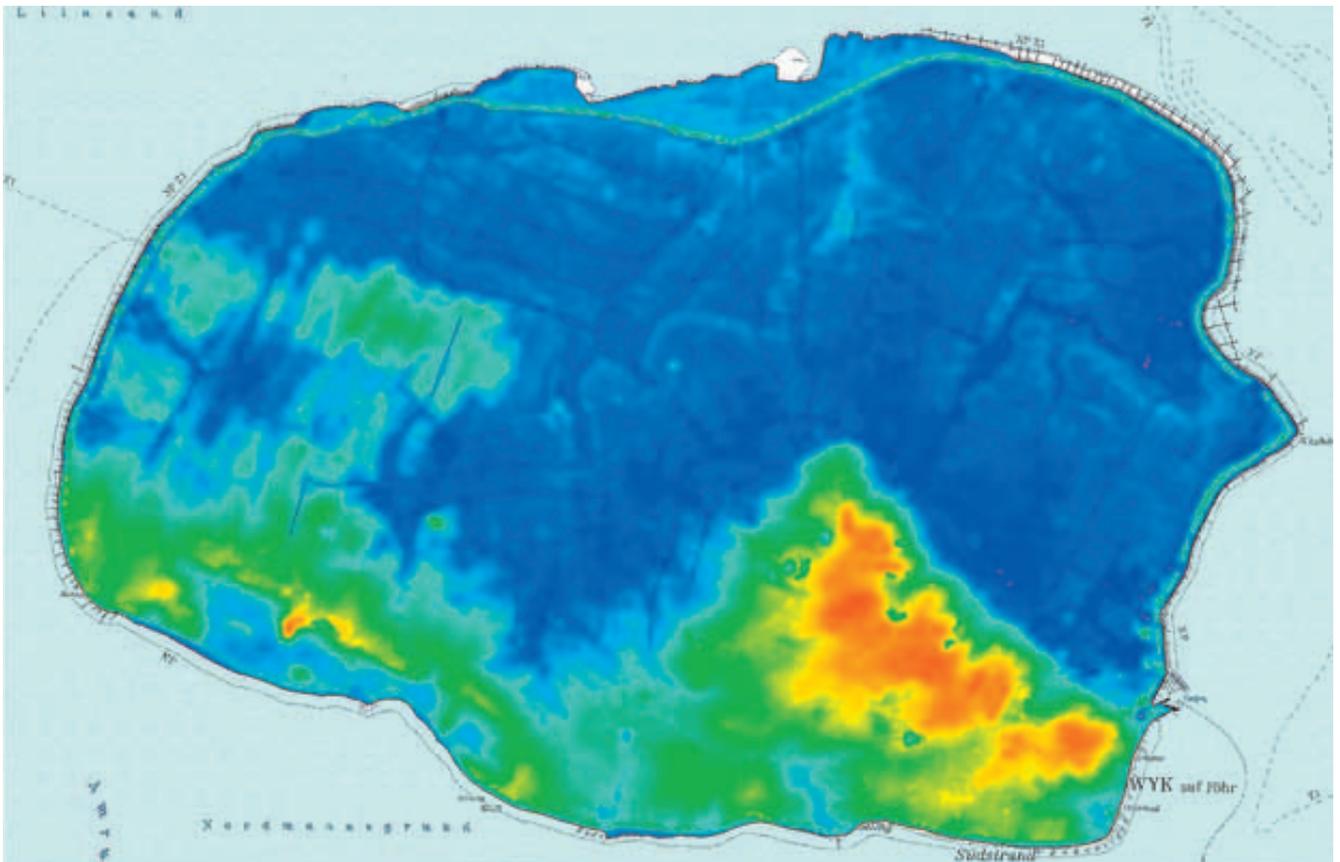


Abbildung 74: Höhenmodell der Insel, oben: 2010, unten: 2100; rot: Flächen, die beim Anstieg des mittleren Meeresspiegels bis 2100 um ca. 1 m unter dem Meeresniveau liegen werden.

Height model of the island, red: areas below sea level as a consequence of the assumed sea level rise until 2100.



Abbildung 75: Grundwasserströmung. Die Pfeile geben die errechnete Richtung und Menge der horizontalen Grundwasserströmungen im oberen Grundwasserleiter an, blau: Grundwasserströmung 2010, rot: Grundwasserströmung 2100.
 Groundwater flow. Arrows are indication direction and quantity of horizontal groundwater flow in the upper aquifer, blue: groundwater flow 2010, red: groundwater flow 2100.

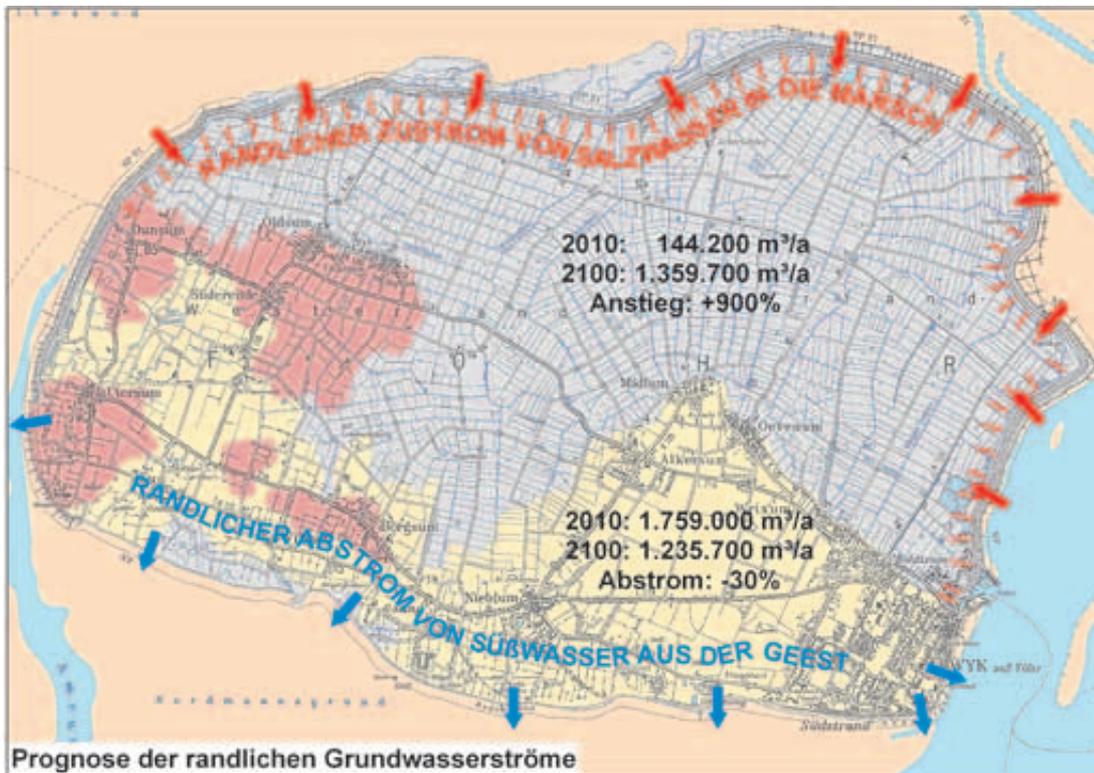


Abbildung 76: Salzwasserzustrom und Süßwasserabstrom über den Inselrand, rot: Salzwasserzustrom in die Marsch, blau: Süßwasserabstrom aus der Geest. Saltwater intrusion and freshwater run off at the island boundary, red: saltwater intrusion into the Marsh, blue: freshwater run off out of the Geest.

Salzwasseranstieg in der Marsch

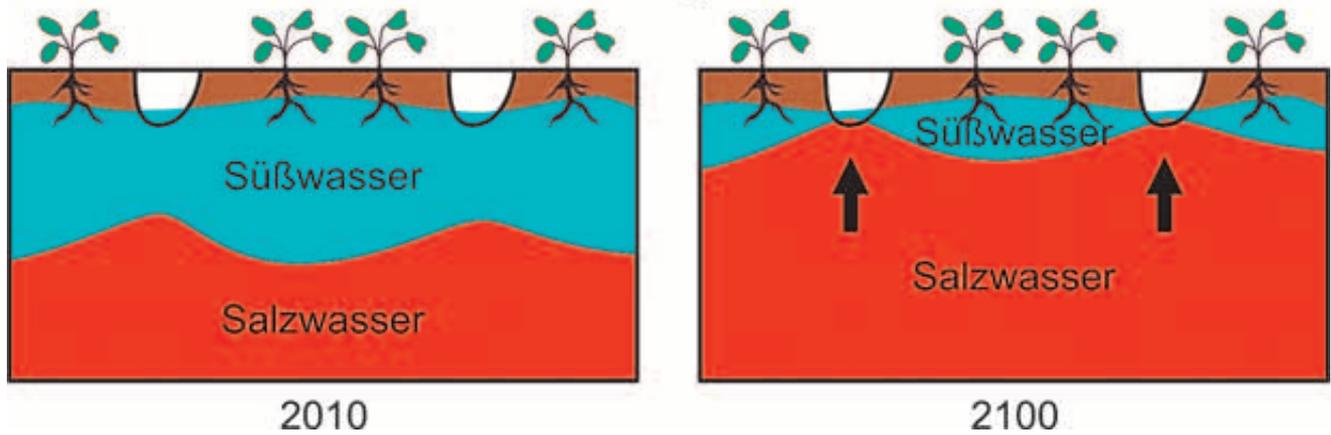


Abbildung 77: Auswirkung von Salzwateraufstieg und Ausdünnung der Süßwasserlinse in der Marsch (schematisch).
Consequences of saltwater rise and thinning of the freshwater lens in the Marsh (schematically).

7.5 Ausblick und mögliche Anpassungsmaßnahmen

7.5.1 Geest

Die wichtigsten zu beachtenden Auswirkungen, die in der Geest zukünftig zu erwarten sind, betreffen einerseits die in den meisten Bereichen moderat steigenden durchschnittlichen Grundwasserstände, zum anderen wird sich die Süß-Salzwatergrenze an der Küstenlinie verlagern. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand sind hier für den überwiegenden Teil der Geest bisher keine gravierenden Folgen zu erwarten. Für den westlichen Geestkern, vor allem an der Grenze zur Godelniederung, gilt dieses nur mit Einschränkung, da dort ein sehr sensibles Gleichgewicht zwischen Süßwaterabstrom aus der Geest und Salzwaterzustrom von der Küste besteht. Aus diesem Grunde ist es ratsam, im Südwesten der Insel zur Sicherung der Trinkwassergewinnung ein entsprechendes Grundwassermonitoring hinsichtlich einer möglichen landseitigen Verlagerung der Süß-Salzwatergrenze zu betreiben.

7.5.2 Marsch

In der Marsch deuten sich in den Ergebnissen der Modellierung zwei Themen an, die zukünftig Anpassungen an die sich verändernde Grund- und Oberflächenwassersituation erforderlich scheinen lassen. Es wird zum einen nötig sein, deutlich höhere Mengen an Oberflächenwasser aus den Flächendrainagen von der Insel abzuleiten. Des Weiteren bewirkt der Meeresspiegelanstieg ein flächenhaftes Aufsteigen sowie einen wachsenden seeseitigen Zustrom von Salzwater in die oberflächennahen Grundwasserleiter.

Derzeit wird der größte Anteil der Entwässerung bei Niedrigwater über das Laglumsiel abgeleitet. Durch den steigenden Meeresspiegel nimmt das hierfür erforderliche Potenzialgefälle zwischen dem Drainagesystem der Inselentwässerung und dem Waterstand der Nordsee ab. Zusätzlich wird die zur Entwässerung während des Tideniedrigwaters zur Verfügung stehende Zeit deutlich geringer. Eine Anpassung der Infrastruktur zur Waterhaltung in der Marsch an die sich ändernden Gegebenheiten wird somit, besonders im Ostteil der Marsch, erforderlich sein.

Im Projekt CLIWAT wurde auch in den anderen an der Nordseeküste und auf den Inseln gelegenen Untersuchungsgebieten das Problem der zunehmenden Versalzung des oberflächennahen Grundwaters in Niederungsgebieten als eine besonders schwerwiegende Folge von Meeresspiegelanstieg und klimatischen Veränderungen deutlich.

Durch ein angepasstes Management der Entwässerung soll in einigen Gebieten versucht werden, zukünftig möglichst viel Süßwater im System zu halten, um dem Salzwateranstieg entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit ist beispielsweise, während der Zeit der größten Grundwasserneubildung im Winter, den Waterstand in den Entwässerungsgräben hoch zu halten und dadurch die Süßwaterlinse aufzufüllen, um so einen ausreichenden Puffer für die Vegetationszeit im Sommer vorzuhalten. Eine weitere Maßnahme stellt das Abfangen des von der Küste seitlich zuströmenden Salzwaters durch geeignete Drainagen dar.

7.5.3 Was bleibt zu tun?

Durch die Untersuchungen im Rahmen des INTERREG Projekts CLIWAT konnten umfangreiche Daten gesammelt werden, die eine in sich stimmige Prognose der Folgen des Klimawandels für die Insel Föhr ermöglichen. Gleichwohl blieben einige Fragen offen, die mit den zur Verfügung stehenden personellen und finanziellen Mitteln erwartungsgemäß auch nicht beantwortet werden konnten:

- So wären weitere Erkundungen der hydrogeologischen Verhältnisse sowie der räumlichen Verbreitung der Süßwasserlinse in der Marsch wünschenswert, um in diesem sensiblen Bereich sichere Aussagen machen zu können.
- Erkundungen der geologischen Verhältnisse im Watt würden zum besseren Verständnis der hydraulischen Verbindungen der Grundwasserleiter über den Inselrand hinaus beitragen.

- Für eine genauere Wasserbilanz der Insel ist die Erhebung der realen Zahlen der Entwässerungsmengen nötig.
- Eine dichteabhängige hydraulische Modellierung von Süß- und Salzwasser würde verbesserte Prognosen ermöglichen.

Die Kombination der eingesetzten hydrogeologischen und geophysikalischen Untersuchungsverfahren zusammen mit der Nutzung von digitalen dreidimensionalen Geologischen Modellen als Basis für Grundwassermodelle bietet sich als ein gutes Werkzeug für die Bearbeitung des Themenkomplexes um die Folgen des Klimawandels – wie Meeresspiegelanstieg, Versalzung des küstennahen Grundwassers und Grundwasserbewirtschaftung – an.

Es liegt nahe, den hier vorgestellten Verfahrensablauf auch für andere Bereiche Schleswig-Holsteins, z.B. die übrigen Nordseeinseln oder die großen Niederungsgebiete der Küstenregionen, einzusetzen.

8 Wärme aus der Tiefe – Geothermische Nutzung des Untergrundes von Föhr

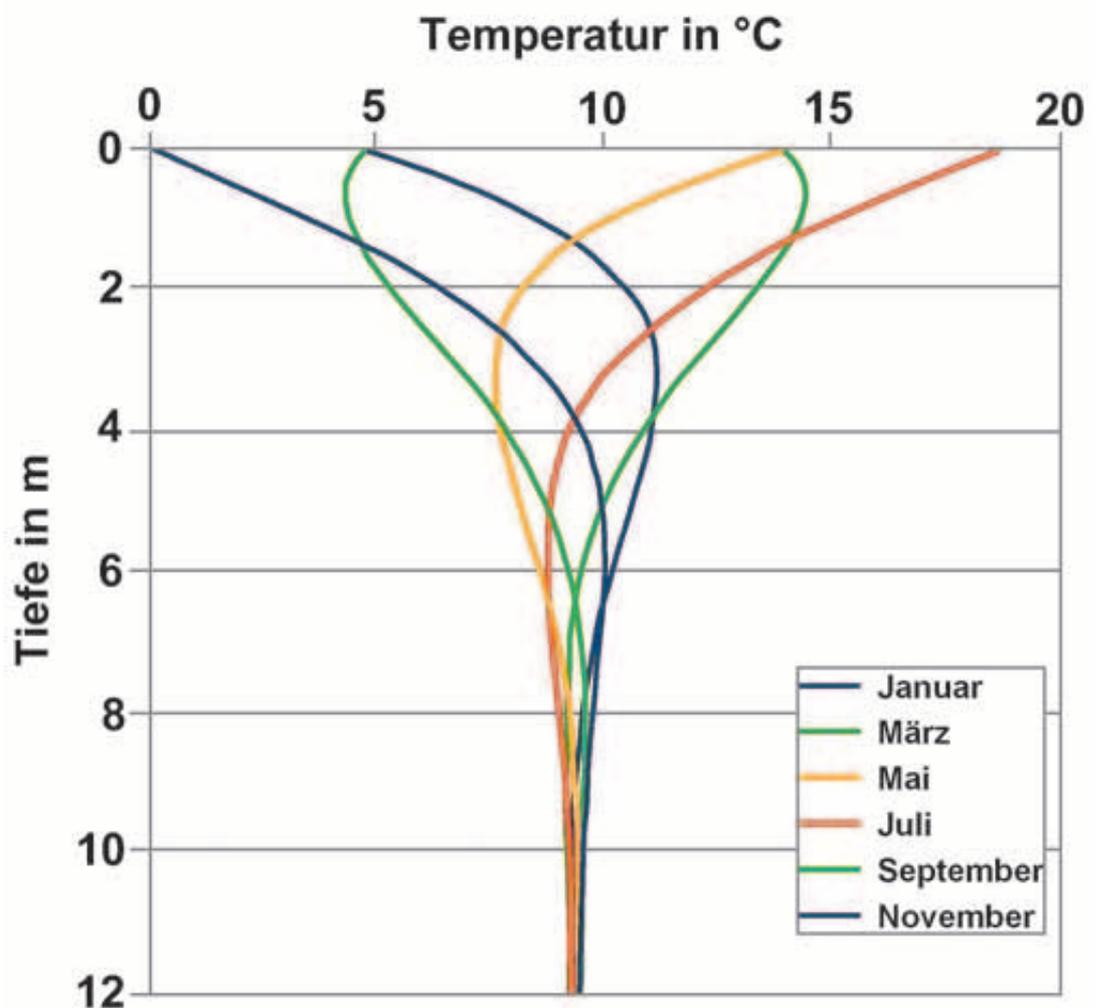
➤ **Reinhard Kirsch, Claudia Thomsen, Anja Wolf**

8.1 Die Heizung aus dem Untergrund

Minusgrade, Schneedecke, dick gefrorener Boden – wie kann man damit heizen? Zwar ist die Erde ein heißer Planet, die Temperatur nimmt im Bereich der Erdkruste mit etwa 3 °C pro hundert Meter zu und die für eine moderne Raumheizung erforderliche Vorlauftemperatur von 30 – 40 °C wäre in 800 – 1.000 m Tiefe erreicht – aber muss man wirklich so tief

bohren? Es gibt natürlich eine andere Option, wie Abbildung 78 zeigt. Saisonale Temperaturschwankungen dringen nicht sehr tief in den Untergrund ein, bereits ab etwa 10 m Tiefe herrscht ganzjährig eine konstante Temperatur von 10 – 12 °C. Das reicht, um mit einer Wärmepumpe zu heizen und, falls erforderlich, im Sommer auch zu kühlen.

Abbildung 78: Temperaturverlauf im Untergrund zu unterschiedlichen Jahreszeiten (LLUR 2011). Seasonal variations of underground temperatures (LLUR 2011).



8.2 Technik der oberflächennahen Geothermie

Die wichtigsten Komponenten einer Erdwärmehheizung sind in Abbildung 79 dargestellt. Benötigt werden eine oder mehrere Erdwärmesonden als Wärmetauscher im Untergrund, eine Wärmepumpe, mit der die aus dem Untergrund gewonnene Wärmeenergie auf ein zum Heizen nutzbares Temperaturniveau ge-

bracht wird sowie im Haus ein Heizungssystem, das mit einer möglichst geringen Vorlauftemperatur arbeiten kann. Alternativ zur Erdwärmesonde kann mit flach verlegten Erdwärmekollektoren gearbeitet werden, sofern ein genügend großes Gelände zur Verfügung steht (Abbildung 79b).

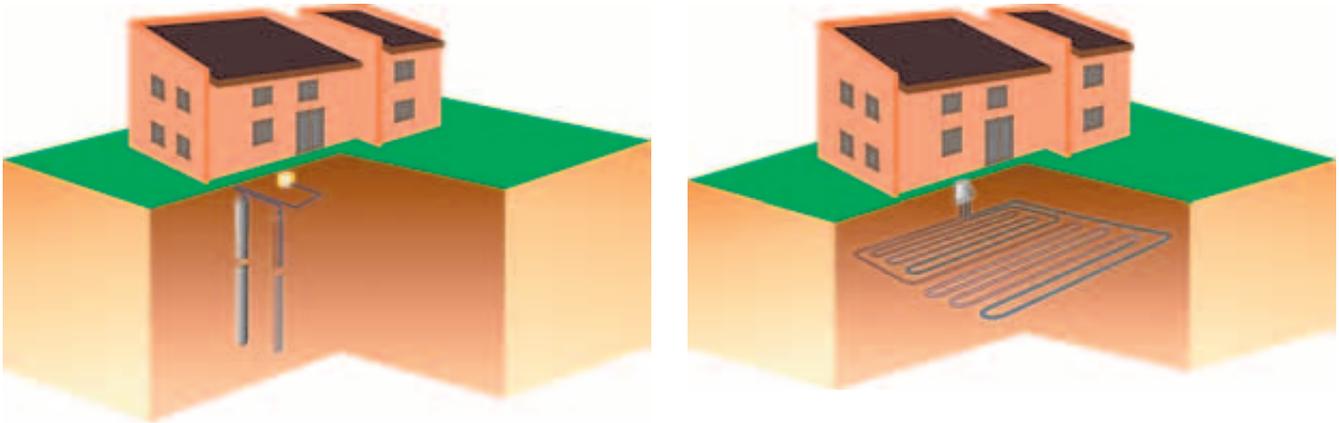


Abbildung 79: Schematische Darstellung von a) Erdwärmesonden (links) und b) Erdwärmekollektoren (rechts).
Schematic view of ground heat exchangers (left) and ground heat collectors (right).

Voraussetzung für den Bau einer **Erdwärmesonde** ist eine Bohrung (Abbildung 80). Die Bohrtiefe bzw. Sondenlänge hängt von der geforderten Heizleistung und den thermischen Eigenschaften des Untergrundes ab. Typische Bohrtiefen liegen bei etwa 100 m, bei dem heutigen Sondenmaterial sind maximal 200 m Sondenlänge realisierbar. Nach Abschluss der Bohrarbeiten werden die Sonden aus PE-Rohr in die Bohrung eingeführt. Meistens sind dies Doppel-U-Rohre (Abbildung 81), es werden aber auch Koaxialrohre verwendet. Nach Einbau der Sondenrohre werden die verbleibenden Zwischenräume zwischen den Sondenrohren und der Bohrlochwandung mit einem Spezialzement verfüllt. Diese Zementation dient sowohl zur guten thermischen Anbindung der Sondenrohre an das umgebende Erdreich als auch zur Abdichtung des Bohrlochs, damit beispielsweise verhindert wird, dass potenzielle Kontaminationspfade für die Infiltration von Schadstoffen in den Grundwasserleiter entstehen. In den Sondenrohren zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit, heute meistens Wasser mit einem Frostschutzmittel. Früher wurden auch Salzlösungen verwendet, daher der gebräuchliche Name „Sole“ für die Wärmeträgerflüssigkeit.

An den Solekreislauf ist über einen Wärmetauscher die **Wärmepumpe** angeschlossen (Abbildung 82). Der Arbeitskreislauf der Wärmepumpe enthält eine Flüssigkeit mit geringer Verdampfungstemperatur. Dieses Arbeitsmedium nimmt am Wärmetauscher von der Erdwärmesonde Wärme auf und verdampft. Dabei wird die Sole der Erdwärmesonde um ca. 4 - 5 °C abgekühlt. Das gasförmige Arbeitsmedium der Wärmepumpe wird komprimiert, erwärmt sich dabei und gibt die Wärme an das Heizsystem ab. Dabei kühlt sich das Arbeitsmedium wieder unter die Verdampfungstemperatur ab, erreicht im flüssigen Zustand den Wärmetauscher der Erdwärmesonde, nimmt Wärme auf, verdampft und der Kreislauf be-



Abbildung 80: Bohrarbeiten zur Installation von Erdwärmesonden.
Drilling for the installation of ground heat exchangers.

ginnt von neuem. Dieser Vorgang ist der gleiche wie in einem Kühlschrank, nur dass dort die Wärmequelle das Innere des Kühlschranks ist und die Wärme am Kondensator an die Raumluft abgegeben wird. Tatsächlich werden in Wärmepumpen auch Komponenten aus Kühlaggregaten verbaut, sie sind besonders robust und haltbar.

Bei der Wärmepumpe unterscheidet man zwischen der Wärmeleistung, die zum Heizen zur Verfügung steht, und der Kälteleistung, die am Wärmetauscher der Sole und damit dem Untergrund entnommen wird. Die Effizienz der Wärmepumpe wird durch die **Leistungszahl COP** (coefficient of performance) definiert, sie gibt das Verhältnis der unter kontrollierten Prüfbedingungen an die Heizung abgegebenen Wärmeleistung zu der aus dem Stromnetz entnommenen elektrischen Antriebsleistung an. Ein COP von 4 bedeutet, dass das Vierfache der Antriebsleistung als Wärmeleistung zur Verfügung steht. Da die Antriebsleistung ebenfalls in Wärme umgewandelt wird und mit für die Heizung zur Verfügung steht, ist die Wärmeleistung die Summe aus der dem Untergrund entnommenen Kälteleistung und der Antriebsleistung.

Je höher der COP, umso weniger Strom wird verbraucht (und muss bezahlt werden), und umso besser fällt die Umweltbilanz der Erdwärmeheizung aus. Der COP sollte mindestens 4 betragen, um die bei der Stromproduktion im Mittel anfallenden CO₂-Emissionen auszugleichen. Das sieht der Gesetzgeber genauso: Im Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz – EEWärmeG) ist gefordert, dass die **Jahresarbeitszahl** von erdgekoppelten Wärmepumpen in Neubauten mindestens 4 betragen muss. Die Jahresarbeitszahl erfasst die gesamte jährliche Wärmeabgabe und setzt sie zu dem jährlichen Stromverbrauch der Wärmepumpe einschließlich der Solepumpe in Beziehung, sie ist also eng mit dem COP verknüpft. Eine gute Jahresarbeitszahl kann nur erreicht werden, wenn der COP der Wärmepumpe unter allen Betriebsbedingungen möglichst hoch ist.

8.3 Die Effektivität der Erdwärmeheizung

Die Wärmepumpe muss die Temperaturdifferenz zwischen der Sole als Wärmeträgerflüssigkeit der Erdwärmesonde und der Heizung überbrücken. Je höher diese Temperaturdifferenz ist, umso höher ist die Leistungsaufnahme für den Antrieb der Wärmepumpe, umso geringer ist der COP. In Abbildung 82 sind die COP-Werte von Wärmepumpen in Abhängigkeit von der Soletemperatur und der Vorlauf-

temperatur der Heizung gezeigt. Dabei wird klar, dass durch eine Heizung mit geringer Vorlauftemperatur (zum Beispiel eine Fußbodenheizung) ein hoher COP erreichbar ist. Wichtig ist aber auch eine möglichst hohe Soletemperatur, also die Temperatur, die aus dem Untergrund geliefert wird.

Wie entwickelt sich die Untergrundtemperatur beim Betrieb einer Erdwärmesonde? Die in der Abbildung 78 genannte über die Jahreszeiten konstante Untergrundtemperatur von 10 – 12 °C gilt natürlich nur für den ungestörten Untergrund. Beim Betrieb einer Erdwärmesonde wird dem Untergrund Wärme entzogen, er kühlt sich ab. Das führt dazu, dass auch die Soletemperatur im Verlauf der Heizperiode absinkt.

Die **Entwicklung der Soletemperatur während der Heizperiode** kann modelliert werden (zum Beispiel mit dem Programm Earth Energy Designer EED, HELLSTRÖM UND SANNER 2000). Eingabeparameter für die Modellierung sind u.a. die geforderte Wärmelast, die Länge der Erdwärmesonde(n) und als wichtiger Parameter, mit dem wir uns noch befassen müssen, die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Das Ergebnis ist in Abbildung 83 gezeigt, die Temperatur nimmt von 9,6 °C zu Beginn der Heizperiode ab bis auf –1,1 °C im Januar. Während der heizfreien Zeit muss die Untergrundtemperatur regeneriert werden, dies erfolgt überwiegend durch Wärmeleitung von der Erdoberfläche, die von der Sonne erwärmt wird. Weitere Beiträge zur Wärmeregeneration liefern das Grundwasser sowie der Wärmefluss aus dem Untergrund.

Die Regeneration der Untergrundtemperatur im Bereich der Erdoberfläche ist nicht vollständig. Zu Beginn der nächsten Heizperiode wird daher die Untergrundtemperatur niedriger sein als im Vorjahr. Die Soletemperatur ist daher auch geringer als im Vorjahr und sinkt im Laufe der Heizperiode stärker ab. In Abbildung 83 ist die Entwicklung der Soletemperatur jeweils am Anfang und am Ende der Heizperiode für 25 Jahre Betriebsdauer dargestellt. In den ersten Betriebsjahren sinken die Temperaturen deutlich ab, während für die späteren Jahre der Trend zu einem annähernden Gleichgewichtszustand auf einem niedrigeren Temperaturniveau zu erkennen ist.

Das Absinken der Soletemperatur wirkt sich natürlich ungünstig auf die jeweiligen Leistungszahlen der Wärmepumpe und damit auf die Jahresarbeitszahl aus. Daher gilt es, die Erdwärmesonde(n) so zu dimensionieren, dass auch nach vielen Betriebsjahren möglichst hohe Leistungszahlen erreicht werden.

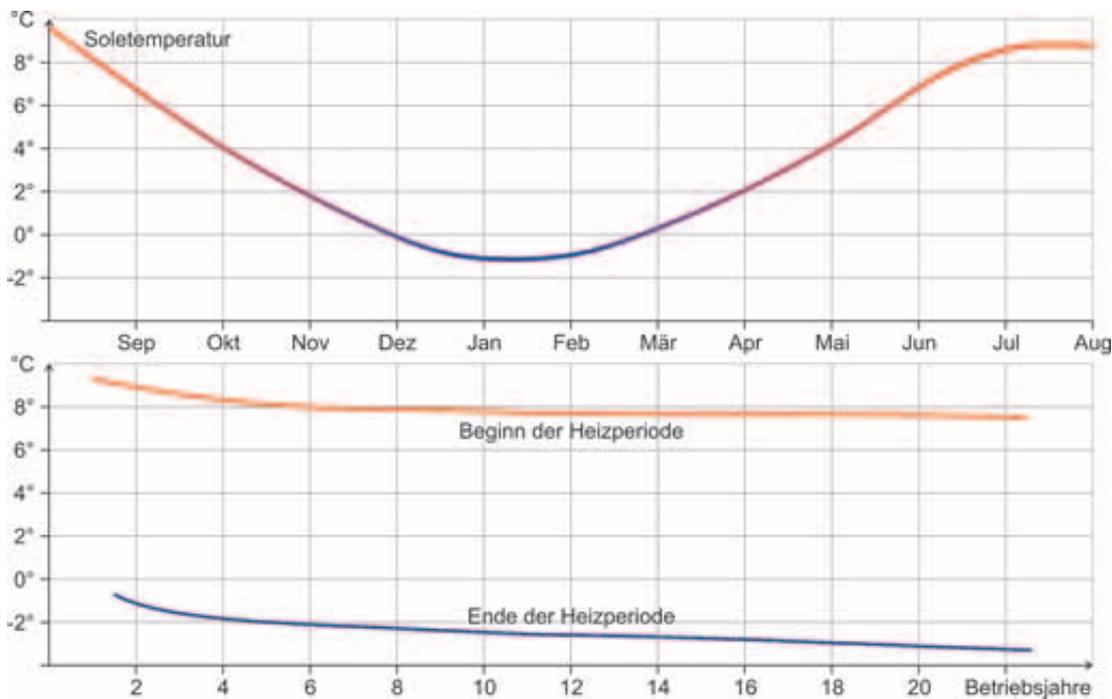


Abbildung 83: Entwicklung der mittleren Soletemperatur einer Erdwärmesonde im ersten Betriebsjahr (oben) sowie Maximal- und Minimaltemperaturen in den ersten 25 Betriebsjahren (unten). Die Modellierung erfolgte mit dem Programm EED, Eingabeparameter sind: jährliche Wärmelast 21.000 kWh, Sondenlänge 120 m, Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes: 2,2 W/mK, Wärmeleitfähigkeit des Bohrlochzements: 1,0 W/mK, Bohrlochdurchmesser 0,18 m.

Variation of flow temperature during the first operation period (top) and max/min brine temperatures during the first 25 years of operation. Modelling was carried out by the program EED using the following key input parameter: heat load 21,000 kWh, length of ground heat exchanger 120 m, thermal conductivity of the ground 2.2 W/mK, thermal conductivity of the grout 1.0 W/mK, diameter of the borehole 0.18 m.

8.4 Zur Dimensionierung von Erdwärmesonden

Die beiden wichtigsten Einflussgrößen auf die Soletemperatur und damit auf die Wirtschaftlichkeit von Erdwärmeheizungen sind in Abbildung 84 gezeigt. Es sind die Länge der jeweiligen Erdwärmesonde(n) und die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes. Je tiefer die Erdwärmesonde in den Untergrund reicht, umso effektiver kann sie als Wärmetauscher arbeiten. Und je höher die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes ist, umso besser kann Wärme aus dem Umgebungsmaterial an die Erdwärmesonde herangeführt werden. Ebenfalls wichtig ist die Wärmeleitfähigkeit des Zements zur Abdichtung der Bohrung, handelsübliche Materialien weisen starke Unterschiede der Wärmeleitfähigkeiten auf.

Die Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes kann man nicht beeinflussen. Sie muss aber zur Dimensionierung der Erdwärmesonde(n) bekannt sein. Und damit sind wir wieder, wie bei den anderen Kapiteln auch, bei der **Struktur des Untergrundes**.

Wir haben es im Untergrund von Föhr mit Sand, Schluff, Ton und Geschiebemergel zu tun. Wie bei den meisten geophysikalischen Eigenschaften (Kapitel 4) spielt auch bei der Wärmeleitfähigkeit die Porosität bzw. der Wassergehalt eine wichtige Rolle. Das Porenwasser hat eine erheblich geringere Wärmeleitfähigkeit als die Gesteinsbestandteile des Sedimentes, daher hat der Ton mit hohem Wassergehalt (siehe Abbildung 16) eine vergleichsweise niedrige Wärmeleitfähigkeit von ca. 1,5 W/mK. Die Wärmeleitfähigkeiten von Sand und Geschiebemergel sind mit ca. 2,4 W/mK in etwa gleich. Die angegebenen Werte beziehen sich auf wassergesättigtes Material, also für Tiefenbereiche unterhalb des Grundwasserspiegels. Sobald sich Luft im Porenraum befindet, verringert sich die Wärmeleitfähigkeit erheblich, da Luft ein guter thermischer Isolator mit sehr schlechter Wärmeleitfähigkeit ist. Für ungesättigtes Material wird daher mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,8 W/mK gerechnet.

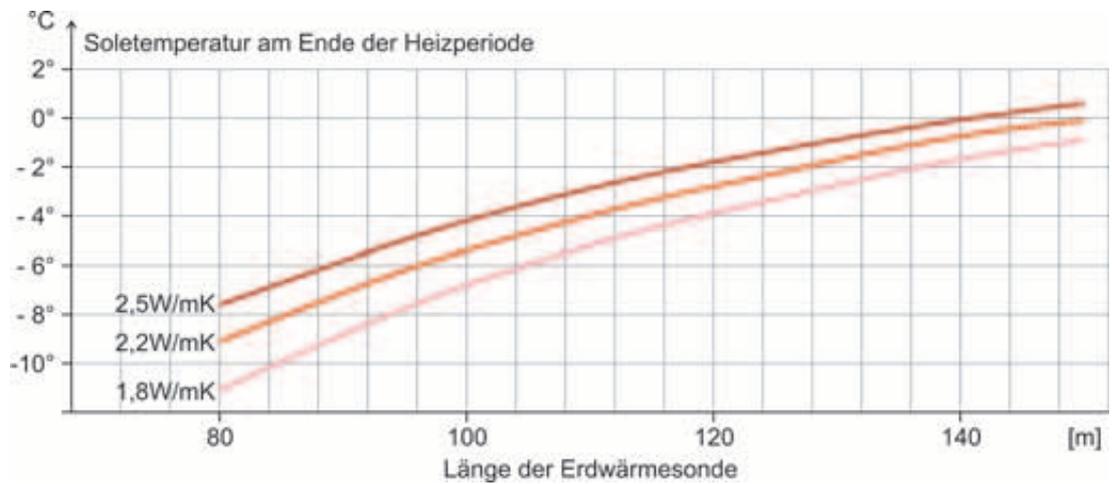


Abbildung 84: Soletemperatur am Ende der Heizperiode im 25. Betriebsjahr in Abhängigkeit von der Länge der Erdwärmesonde und der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes, Wärmelast wie in Abbildung 83.

Brine temperature at the end of the 25th year of operation in relation to the length of ground heat exchanger and to the thermal conductivity of the ground, heat load as in Fig. 83.

Man muss allerdings berücksichtigen, dass es sich bei den hier angegebenen Werten der Wärmeleitfähigkeiten um Mittelwerte handelt. Unsere Sedimente können in ihrer Zusammensetzung lokal deutliche Unterschiede aufweisen, was sich auch auf die Wärmeleitfähigkeiten auswirkt. Daher sollte man bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden mit Sicherheitszuschlägen arbeiten.

Der Untergrund von Föhr ist komplex aufgebaut mit einer Wechsellagerung von Sand, Geschiebemergel und Glimmerton. Ist für einen Ort (Lokation) der Untergrundaufbau bekannt, dann wissen wir, wie mächtig die jeweiligen Sand-, Geschiebemergel- und Glimmertonlagen sind und wir können für vorgegebene Tiefen die effektiven Wärmeleitfähigkeiten berechnen. Daher kann das im Rahmen des Projektes CLIWAT erstellte Geologische Modell der Insel genutzt werden, um eine Karte der effektiven Wärmeleitfähigkeiten zu erstellen. Neben dem Schichtenaufbau wird dabei auch die Tiefe des Grundwasserspiegels berücksichtigt, da die Schichten oberhalb des Grundwasserleiters eine schlechte Wärmeleitfähigkeit haben. Die Ergebnisse für Bohrtiefen von 50 m, 100 m und 120 m sind in den Abbildungen 85 - 87 dargestellt. Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten liegen in einem Intervall von 1,7 – 2,3 W/mK. Diese Unterschiede sind begründet durch lokale Variationen des Grundwasserflurabstands, die durch die unterschiedlichen Geländehöhen bedingt sind (das Niveau des Grundwasserspiegels wurde mit 0 m NN angenommen), sowie durch unterschiedliche Tiefen des Glimmertons mit geringerer Wärmeleitfähigkeit.

Die Darstellung beschränkt sich auf den Bereich der Geestkerne. In der Marsch gibt es keine ausreichend tiefen Bohrungen. Und da in der Marsch das Grundwasser bereits ab geringer Tiefe versalzen ist, helfen auch die Ergebnisse der SkyTEM Befliegung nicht weiter. Salzwasserführende Sande und Tone haben beide einen sehr geringen spezifischen elektrischen Widerstand und sind daher aus den SkyTEM Ergebnissen nicht zu unterscheiden. Für den Marschbereich sollte man bei der Dimensionierung der Erdwärmesonde(n) von einer Wärmeleitfähigkeit von 1,9 W/mK ausgehen, also einem Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von Sand und Ton. Sollte sich bei den Bohrungen herausstellen, dass überwiegend Tone im Untergrund vorkommen, muss die vorgesehene Sondenlänge entsprechend erhöht werden.

Aus den Karten kann für die Lokation einer geplanten Erdwärmesonde die effektive Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Daraus ergibt sich für einen Fachbetrieb die Möglichkeit, die Erdwärmesonde(n) in Abhängigkeit von der geforderten Heizlast so zu dimensionieren, dass ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage möglich ist. Die so ermittelte Sondenlänge muss nicht in einer Bohrung realisiert werden, sie kann auf mehrere Bohrungen verteilt werden. Dabei sollte allerdings berücksichtigt werden, dass dann der relativ unproduktive Bereich oberhalb des Grundwasserspiegels mehrmals durchbohrt werden muss und die erforderliche Sondenlänge sich entsprechend erhöht. Die Sonden müssen untereinander einen Mindestabstand von 5 m aufweisen (6 m bei Bohrtiefen von weniger als 50 m), um eine gegenseitige Beeinflussung auszuschließen.

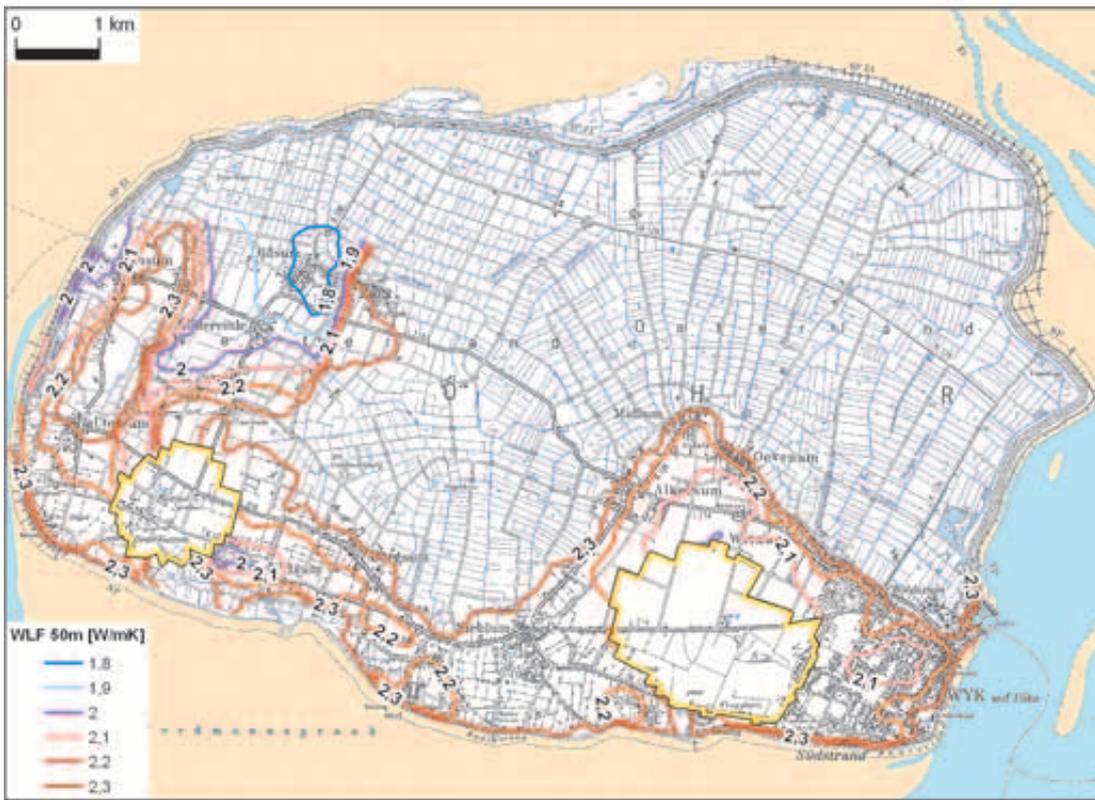


Abbildung 85: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes für eine Bohrtiefe von 50 m. Die Wasserschutzgebiete, in denen Bohrungen für Erdwärmesonden nicht zulässig sind, sind ausgespart (gelb umrandet).

Effective thermal conductivities of the ground for drillings down to 50 m. Water protection areas are excluded in the maps (drillings for ground heat exchanger are prohibited in this areas).

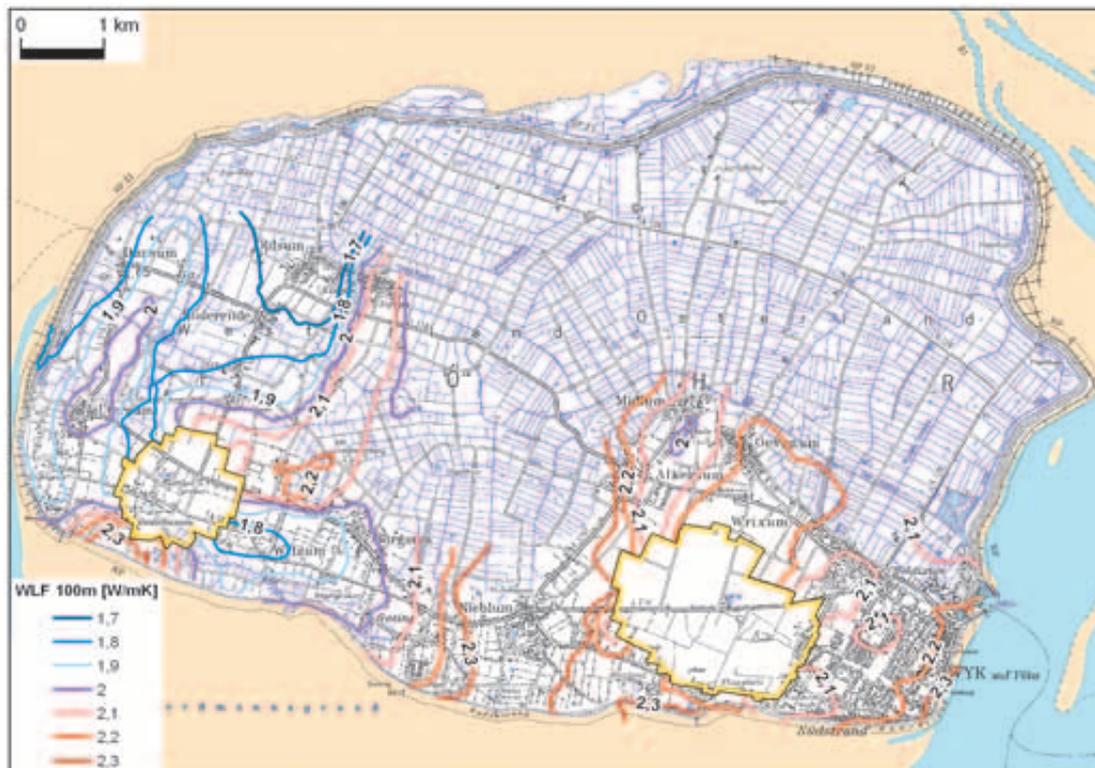


Abbildung 86: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes für eine Bohrtiefe von 100 m. Die Wasserschutzgebiete, in denen Bohrungen für Erdwärmesonden nicht zulässig sind, sind ausgespart (gelb umrandet).

Effective thermal conductivities of the ground for drillings down to 100 m. Water protection areas are excluded in the maps (drillings for ground heat exchanger are prohibited in this areas).



Abbildung 87: Effektive Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes für eine Bohrtiefe von 120 m. Die Wasser-schutzgebiete, in denen Bohrungen für Erdwärmesonden nicht zulässig sind, sind ausgespart (gelb umrandet).

Effective thermal conductivities of the ground for drillings down to 120 m. Water protection areas (yellow) are excluded in the maps (drillings for ground heat exchanger are prohibited in this areas).

8.5 Besonders wichtig: der Schutz des Grundwassers

Eine Erdwärmeheizung soll die Umwelt entlasten und nicht zu einer potenziellen Gefährdung des Grundwassers werden. Leider können Bau und Betrieb von Erdwärmesondenanlagen zu Grundwassergefährdungen führen (Abbildung 88), zum Beispiel durch:

- Den Austritt von Sole aus einer schadhaften Sonde (1),
- den Aufstieg von möglicherweise salzigem Grundwasser aus einem tieferen Grundwasserstockwerk in den für die Wasserversorgung genutzten Grundwasserleiter (2),
- sowie durch die Infiltration von kontaminiertem Oberflächenwasser entlang einer ungenügend abgedichteten Erdwärmebohrung in den genutzten Grundwasserleiter (3).

Die Gefährdung durch einen Soleaustritt ist überschaubar, da als Frostschutz lediglich Stoffe verwendet werden dürfen, die nur eine geringe Gefährdung für das Grundwasser dar-

stellen (Wassergefährdungsklasse 1). Schwerwiegender ist die Grundwassergefährdung durch eine ungenügend abgedichtete (verpresste) Bohrung. Daher dürfen die Bohr- und Verpressarbeiten nur durch entsprechend zertifizierte Fachbetriebe ausgeführt werden und es muss ein geeignetes Verpressmaterial Verwendung finden.

Beim Betrieb der Erdwärmesonde können die Soletemperaturen und damit auch die Temperatur des Verpressmaterials teilweise unter den Gefrierpunkt fallen. Bei ungenügender Frost-Tau-Wechselbeständigkeit des Verpressmaterials können sich Risse bilden, die zu Wegsamkeiten für möglicherweise schadstoffbelastetes Oberflächenwasser führen können. Um diese Gefahr auszuschalten, müssen die Anlagen so dimensioniert werden, dass unterhalb der natürlichen Frostgrenze beim Betrieb der Erdwärmesondenanlage innerhalb des Verpresskörpers der Bohrung die Temperatur nicht unter 0 °C sinken kann. Bei den Beispielen der Abbildungen 83 und 84 muss daher die Sondenlänge mindestens 140 m betragen.

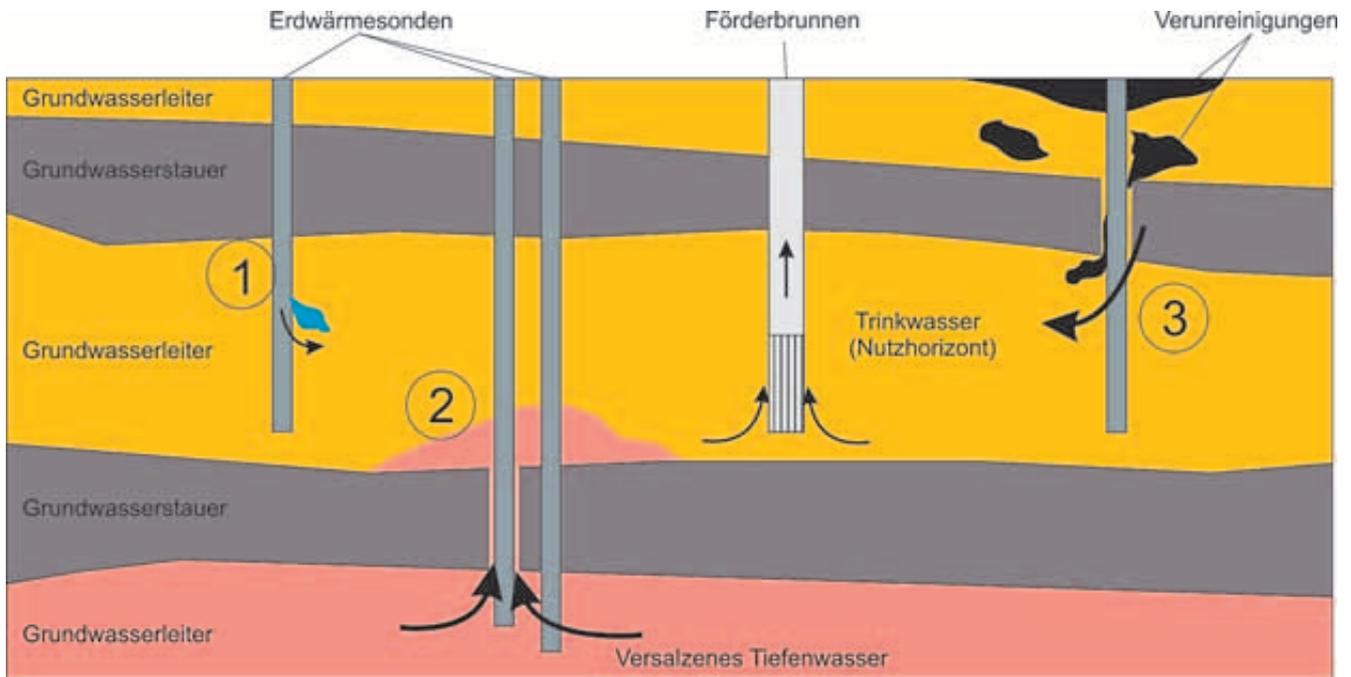


Abbildung 88: Potentielle Gefährdungen des Grundwassers durch Erdwärmesonden (LLUR 2011): 1) Soleaustritt aus einer schadhaften Erdwärmesonde, 2) Aufstieg von Salzwasser in einen genutzten Grundwasserleiter durch eine unzureichende Verpressung des Bohrlochs, 3) Infiltration von möglicherweise kontaminiertem Oberflächenwasser, ebenfalls durch eine unzureichende Verpressung des Bohrlochs.
 Potential groundwater hazards due to ground heat exchangers (LLUR 2011): 1) brine leakage due to damaged ground heat exchanger, 2) intrusion of rising saltwater into the water production horizon due to grouting failure, 3) infiltration of potentially polluted surface water due to grouting failure.

Zusätzlich von besonderer Bedeutung ist insbesondere in der Marsch die Salzwasserbeständigkeit des Verpressmaterials, da hier das Grundwasser schon ab geringer Tiefe versalzen ist. Aber auch im Bereich der Geestkerne muss ab Tiefen von 40 - 80 m mit Grundwasser- versalzung gerechnet werden (siehe Kapitel 5).

Zum besonderen Schutz des Grundwassers sind Wasserschutzgebiete (Abbildung 65) im Bereich der Wasserwerke Föhr-Ost und Föhr-West ausgewiesen worden. Hier gilt die Schutzgebietsverordnung, nach der Anlagen zur Gewinnung von Erdwärme (Erdwärmesonden und -kollektoren) in unmittelbarer Nähe der Förderbrunnen verboten sind.

Da auf Föhr – mit Ausnahme der in den tertiären Kaolinsanden verfilterten Brunnen – nur oberflächennahe eiszeitliche Schichten mit lückenhafter Abdeckung genutzt werden, kann eine Erlaubnis zumindest für Erdwärmesonden aus wasserrechtlichen Gründen auch im weiteren Wasserschutzgebiet nicht erteilt

werden. In den Karten der effektiven Wärmeleitfähigkeiten (Abbildungen 85 – 87) sind die Wasserschutzgebiete daher ausgespart.

Darüber hinaus sollte nach fachlicher Empfehlung des LLUR im gesamten Verbreitungsgebiet der tertiären Kaolinsande, den einzigen praktisch nitratfreien Wasserleitern auf Föhr, seitens der Unteren Wasserbehörde grundsätzlich eine Einzelfallabwägung bei der Planung von Erdwärmesonden vorgenommen werden.

Die Besonderheiten der Insellage Föhrs mit ihren eingeschränkten Möglichkeiten der Grundwasserförderung erfordern in jedem Fall eine besonders sorgfältige Ausführung von Bohrarbeiten. Aus fachlicher Sicht wird empfohlen, Bohr- und Verfüllarbeiten stets durch ein unabhängiges Geologisches Büro überwachen zu lassen.

Der Schutz des Grundwassers hat Vorrang!

Interesse??

Weitergehende Informationen zu Erdwärmesonden und –kollektoren finden Sie in unserem „**Leitfaden zur Geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes**“. Er ist kostenlos erhältlich beim Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein und kann über

www.llur.schleswig-holstein.de als pdf-Datei heruntergeladen und als Broschüre bestellt werden. Für Auskünfte stehen wir Ihnen auch gerne telefonisch zu Verfügung.

Die **Ansprechpartner** sind:

Name	Telefon	Mail
Dipl. Geol. Claudia Thomsen	0 43 47 / 704-563	claudia.thomsen@llur.landsh.de
Dr. Thomas Liebsch-Dörschner	0 43 47 / 704-559	thomas.liebsch-doerschner@llur.landsh.de
Dr. Reinhard Kirsch	0 43 47 / 704-534	reinhard.kirsch@llur.landsh.de
Dr. Broder Nommensen	0 43 47 / 704-528	broder.nommensen@llur.landsh.de

9 Zusammenfassung

Die hier vorgestellten Arbeiten erfolgten im Rahmen des INTERREG-Projektes CLIWAT, in dem für die Nordseeregion die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwassersysteme abgeschätzt werden sollten. Klimaprojektionen bis zum Jahre 2100 sagen für die Region verstärkte Niederschläge im Winterhalbjahr mit der Folge einer verstärkten Grundwasserneubildung sowie einen Anstieg des Meeresspiegels um etwa einen Meter voraus.

Die Auswirkungen dieser Effekte auf den Grundwasserhaushalt sollten für 7 Projektgebiete, darunter die Insel Föhr, quantifiziert werden. Weitere Nordseeinseln, die im Projektrahmen betrachtet wurden, waren Borkum und Terschelling.

Für das Projekt wurde eine Arbeitsmethodik entwickelt, die in jeweils angepasster Form für alle Projektgebiete zum Einsatz kam. Der generelle Arbeitsablauf war:

- 1) es beginnt mit einer intensiven **Erhebung geologischer Daten**, ergänzt durch geophysikalische Messungen,
- 2) diese Daten werden in einem **digitalen dreidimensionalen Geologischen Modell** zusammengeführt,
- 3) daraus wird ein **Grundwassermodell** entwickelt, mit dem sich Grundwasserbewegung und Grundwasserstände in Abhängigkeit von der jeweiligen Grundwasserneubildung und dem Abfluss bzw. der Wasserförderung berechnen lassen,
- 4) als Eingabeparameter für dieses Grundwassermodell wird die prognostizierte Nieder-

schlagsverteilung und –menge gewählt. Dadurch können die **zukünftigen Grundwasserstände und Abflussmengen** berechnet werden.

Die gemeinsame Projektbearbeitung erfolgte durch den Geologischen Dienst des Landes Schleswig-Holstein (LLUR), die dänische Nachbarbehörde Naturstyrelsen Ribe und das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) Hannover. Zusätzlich erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit dem Wasserbeschaffungsverband Föhr.

Die Arbeitsschritte 1 – 3 sind unabhängig von Annahmen über den Klimawandel. Die Ergebnisse stehen daher auch für weitere Anwendungen zur Verfügung, z.B. für wasserwirtschaftliche Planungen oder die Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie. So wurde aus den Ergebnissen des Geologischen Modells eine Geothermische Planungskarte (flächenhafte Darstellung der Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes) für den Geestbereich abgeleitet, aus der sich insgesamt gute Möglichkeiten zur Nutzung oberflächennaher Geothermie ergeben.

Die Modellierung künftiger Grundwasserstände für die Insel Föhr lässt zunächst keine dramatischen Änderungen zum augenblicklichen Zustand erwarten. Bis zum Jahre 2100 muss jedoch mit einem Anstieg des Grundwasserspiegels im Dezimeterbereich in den Geestkernen gerechnet werden, für die Marsch ergibt sich die Notwendigkeit verstärkter Entwässerungsmaßnahmen. Zudem nimmt die Gefahr des Zustroms von Salzwasser in die Marsch und in das Niederungsgebiet der Godel zu.

Summary

The aim of the INTERREG project CLIWAT is an assessment of the impacts of climate change on the groundwater systems in the North Sea region. Climate projections up to 2100 for this region forecast increased precipitation in the winter season resulting in an enhanced groundwater recharge. Additionally, an increase of seawater level in the range of 1 m has to be taken into account.

The consequences of these effects on the groundwater regime were quantified for 7 project areas including the island of Föhr. Further North Sea islands under investigation were Borkum and Terschelling.

To reach this aim a methodology was developed and applied in an adapted manner, on all project areas. The general work flow included:

- 1) **geological data**, e.g. drilling and logging results, are collected and geophysical surveys are performed,
- 2) these data are compiled in a **digital 3D geological model**,
- 3) based on the geological model a **groundwater model** was developed for the calculation of groundwater heads in relation to groundwater recharge, pumping rate and runoff,

4) the precipitation pattern of the climate models is used as input parameter of the groundwater model. By this, **groundwater heads and groundwater flow** for the prediction period were calculated.

In the project team colleagues from the 'Geologischer Dienst Schleswig-Holstein (LLUR)', 'Naturstyrelsen Ribe' and 'Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG)' are in close cooperating with the 'Wasserbeschaffungsverband Föhr'.

The working steps 1 – 3 are independent from any assumptions on climate change effects. The results can be used for further applications, e.g. for water supply planning or as design tool for near surface geothermal energy installations. The geological model, e.g., was used to develop a planning map for near surface geothermal energy showing the distribution of thermal conductivities of the ground.

The modelling of climatic change effects for the groundwater regime brought no dramatic results compared to today. A moderate rise of the groundwater table of the Geest region in the decimetre range can be expected. For the marshlands increased drainage will be required and an intrusion of saltwater can be expected.

10 Danksagung

Alleine wäre das alles nicht zu schaffen gewesen. Daher geht unser Dank an alle, die im Projekt mitgearbeitet haben!

Beginnen wir mit den Geländearbeiten. Den Überblick über die Geologie Föhrs brachten die elektromagnetischen Messungen vom Hubschrauber aus, durchgeführt von SkyTEM Aps (Aarhus) und KMN koopmann helicopter GmbH (Sommerland).

Den weiteren Einblick in den Untergrund ergaben die seismischen Messungen des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik (Hannover) mit der Geländecrew Siegfried Grüneberg, Eckhardt Grossmann, Stefan Cramm, Jens Kuhnisch und Detlef Vogel.

Die Bohrarbeiten in der Marsch führten Werner Mevs und Carsten Peters durch (beide LLUR), die Bohraufnahme vor Ort erfolgte durch Ima Grabowski (Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität Kiel). Die Wetterbedingungen bei den Bohrarbeiten waren so, dass man bei der Bezeichnung „Friesische Karibik“ eine gewisse Ironie vermuten musste.

Die Geländearbeiten der Technischen Universität Berlin, Institut für Angewandte Geowissenschaften, aus denen wir wertvolle ergänzende Informationen schöpften, betreuten Annika Steuer (BGR Hannover), Stephan Costabel (jetzt BGR Berlin) und Judith Elger. Auch bei diesen Arbeiten waren die Wetterbedingungen zum Teil gewöhnungsbedürftig. Unter den Händen von Barbara Liss, Matylda Kordanska, Henriette Wilke, Matthias Ronczka und Mar-

co Schneider wurden dann die Felddaten zu Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten. Ebenfalls auf Föhr tätig war Stephan Lessing vom Institut für Geophysik der Westfälischen Wilhelms Universität Münster, dessen Arbeit von Norbert Blindow (BGR Hannover) betreut wurde.

Die Ergebnisse der Messungen wurden dann von Anja Wolf (LLUR) in Karten, Grafiken und Diagramme umgesetzt.

Wertvolle Impulse bei der Interpretation der Daten erhielten wir durch die Diskussion mit unseren Kollegen aus Dänemark, Holland und Belgien bei den Workshops des Projektes CLIWAT, allen voran Flemming Jørgensen vom Dänischen Geologischen Dienst GEUS, der uns den Blick auf glaziale Stauchstrukturen öffnete.

Die Durchführung des Projektes CLIWAT wurde durch die Ko-Finanzierung durch das INTERREG IV B Nordseeprogramm ermöglicht. Unser Dank gilt dabei auch den Kollegen des Leadpartners Region Midtjylland in Horsens, die für einen glatten Ablauf der Formalitäten sorgten.

Dass die Messungen auf Föhr so reibungslos durchgeführt werden konnten, verdanken wir dem Wasserbeschaffungsverband Föhr und den Landeigentümern, die uns den Zugang zu ihren Grundstücken gewährten.

Wir haben gerne auf Föhr gearbeitet, und wir werden die Arbeiten dort gerne fortsetzen!

11 Literatur

- AARHUS GEOPHYSICS (2008): Processing and Inversion of SkyTEM data – Föhr 2008. Arbeitsbericht an Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover.
- ALALI F (2011): The Influence of Clay Content, Saturation Degree and Pore Water Conductivity on NMR and SIP Petrophysical Parameters. – Dissertation, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik (Betreuer: Ugur Yaramanci, LIAG Hannover).
- BURSCHIL T, SCHEER W, KIRSCH R, WIEDERHOLD H (2011): An integrated geological/geophysical model of the CLIWAT project area Föhr as basis for underground modelling. – Posterpräsentation, EAGE near surface conference, Leicester (UK).
- BURSCHIL T, WIEDERHOLD H, AUKEN E (2012a): Seismic results as a-priori knowledge for airborne TEM data inversion – a case study. - Submitted to Journal of Applied Geophysics.
- BURSCHIL T, SCHEER W, WIEDERHOLD H, KIRSCH R (2012b): Groundwater situation on a glacially affected barrier island – the North Frisian island Föhr. – submitted to Hydrol. Earth Syst. Sci.
- CLIWAT WORKING GROUP (2011): Groundwater in a Future Climate - The CLIWAT Handbook. ISBN: 87-7788-265-2, Central Denmark Region, Aarhus.
- GLA, LAWAKÜ (1989): Bericht über Untersuchungen zur Entwicklung des Nitratgehaltes des Grundwassers im Geestkern der Insel Föhr - Wassergewinnungsgebiet Föhr-West. - Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein und Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein: 14 S.; Kiel (unveröffentlicht).
- GLA (1991): Hydrogeologisches Gutachten zur Erkundung von nitratarmem Grundwasser in Föhr-Ost (TK 25 1217, 1317). - Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein: 33 S.; Kiel (unveröffentlicht).
- GeoC (2010a): Antrag auf Erteilung einer wasserrechtlichen Bewilligung zur Grundwasserentnahme für die Dauer von 30 Jahren durch die Wasserwerke Föhr – Ost und Föhr – West - Hydrogeologisches Gutachten.- GeoC GmbH, Kiel (unveröffentlicht).
- GeoC (2010b): Grundwassermodell zur Optimierung der Grundwasserbewirtschaftung auf der Insel Föhr. – Arbeitsbericht an den Wasserbeschaffungsverband Föhr, GeoC GmbH, Kiel (unveröffentlicht).
- GRABOWSKI I (2012): Ableitung hydraulischer und thermischer Untergrundparameter aus elektromagnetischen Messungen am Beispiel Föhr.- Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität Kiel, Abteilung Geophysik (Betreuer: Wolfgang Scheer, Reinhard Kirsch, LLUR).
- GRUBE A (2012): Geotope in Schleswig-Holstein – aktualisiertes landesweites Geotopkataster. - Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR), Geologischer Dienst Schleswig-Holstein, Flintbek (in Vorbereitung).
- HELLSTRÖM G, SANNER B (2000): Earth Energy Designer, user manual.
- HEMKER CJ, DE BOER RG (1997): An integrated large-capacity finite-element microcomputer program for multiple-aquifer steady-state and transient groundwater flow modeling.- Grundwassermodellprogramm MicroFEM, Version 4.10.42, Amsterdam.
- KETELSEN H (2000): Nitrat im Grundwasser der Westerlandföhrer Geest - eine Fallstudie. - Schriftenreihe Inst. f. Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie Univ. Kiel, 31: 156 S.; Kiel.
- KETELSEN R, KIRSCH R (2004): Zur geophysikalischen Erkundung von Versalzungs zonen im Grundwasser. Meyniana 56, 21-45, Kiel.
- KORDANSKA M (2011): Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit der vadosen Zone mit geophysikalischen Verfahren. – Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik (Betreuer: Reinhard Kirsch, LLUR).
- LANU (1999): Untersuchungsprogramm zur Entwicklung des Nitratgehaltes im Grundwasser des Geestkerns der Insel Föhr - Maßnahmen und Untersuchungsergebnisse 1990-95. - Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein: 51 S.; Flintbek (unveröffentlicht).

LAWAKÜ, GLA (1990): Bericht über Untersuchungen zur Entwicklung des Nitratgehaltes des Grundwassers im Geestkern der Insel Föhr - Teilbereich des Wassergewinnungsgebietes Föhr-West. - Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holstein & Geologisches Landesamt Schleswig-Holstein: 24 S.; Kiel (unveröffentlicht).

LBEG (2012): Symbolschlüssel Geologie. – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Hannover.

LESSING S (2009): Mehrfachüberdeckende GPR Messungen und ihre Anwendung im CLIWAT Projekt. – Diplomarbeit, Institut für Geophysik der Westfälischen Wilhelms Universität Münster (Betreuer: Norbert Blindow, BGR).

LIAG (2012): Der Untergrund von Borkum – Geologie und Grundwasser. – Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover.

LISS B (2011): Application of the TEM method for hydrogeological investigations on the Island of Föhr. - Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik (Betreuerin: Annika Steuer, BGR).

LLUR (2011): Leitfaden zur geothermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes. – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR), Geologischer Dienst Schleswig-Holstein, Flintbek.

MEINKE I, GERSTNER E-M (2009): Digitaler Norddeutscher Klimaatlas informiert über möglichen künftigen Klimawandel. DMG Mitteilungen 3-2009, 17. URL: http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/pdf/dmg-mitteilungen/2009_3.pdf.

NTB (2007): COP von Wärmepumpen. – Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs, Schweiz.

ROHMANN U, SONTHEIMER H (1985): Nitrat im Grundwasser – Ursachen, Bedeutung, Lösungswege. - DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte Institut der TH Karlsruhe ISBN: 3-922671-12-8, ZfGW-Verlag, Frankfurt am Main.

RONCZKA M (2010): Korrelation der Parameter der Spektral Induzierten Polarisation und der Kernspinresonanz auf Labor- und Feldskala. - Diplomarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik (Betreuer: Stephan Costabel, BGR).

SCHNEIDER M (2011): Geoelektrische Untersuchung der oberflächennahen Untergrundstrukturen auf der Insel Föhr. – BSc Arbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik (Betreuer: Reinhard Kirsch, LLUR).

STEINMANN F, KETELSEN H (2004): Problematik der Wasserbewirtschaftung der Insel Föhr. - IHP/HWRP-Berichte, 1: 74 S.; Koblenz.

StUA SCHLESWIG (2006): Hydrogeologischer Bericht zur Bemessung von Wasserschutzgebieten für die Wasserwerke Föhr-Ost und -West des Wasserbeschaffungsverbandes Föhr. - Staatliches Umweltamt Schleswig: 83 S.; Schleswig (unveröffentlicht).

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2001): VDI 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes Blatt 1 u. 2 – VDI Handbuch Energietechnik.

WILKE H (2011): Ableitung der Grundwasser-Verhältnisse auf der Nordseeinsel Föhr aus aeroelektromagnetischen Messungen. MSc Arbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Angewandte Geophysik (Betreuer: Reinhard Kirsch, LLUR).

ZSCHERPE G, STEINBRECHER D (1997): Bohrlochgeophysik. In: Knödel K, Krummel K, Lange G. (eds.): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 3 Geophysik, Springer, Heidelberg.

12 Autoren

➤ **Dipl.-Phys. Thomas Burschil**

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Stilleweg 2, 30655 Hannover
thomas.burschil@liag-hannover.de

➤ **Dr. Hark Ketelsen**

Wasserbeschaffungsverband Föhr
Am Wasserwerk 1, 25938 Wrixum
ketelsen@wbv-foehr.de

➤ **Dr. Reinhard Kirsch**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Geologischer Dienst - Ingenieurgeologie,
Energierohstoffe
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
reinhard.kirsch@llur.landsh.de

➤ **Dr. Bernd König**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Geologischer Dienst - Fachgrundlagen
Hydrogeologie/Grundwasser
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
bernd.koenig@llur.landsh.de

➤ **Dr. Martin Lilienfein**

AGUA GmbH, Niederlassung Kiel
Beratende Geologen und Ingenieure
Fraunhoferstraße 13, 24118 Kiel
m.lilienfein@agua-gmbh.de

➤ **Dr. Broder Nommensen**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Geologischer Dienst - Fachgrundlagen
Hydrogeologie/Grundwasser
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
broder.nommensen@llur.landsh.de

➤ **Dipl.-Ing. oec. Erk R. Roeloffs**

Dörpstrat 64, 25938 Oevenum
erk-roeloffs@web.de

➤ **Dipl.-Geol. Wolfgang Scheer**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Geologischer Dienst - Fachgrundlagen
Hydrogeologie/Grundwasser
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
wolfgang.scheer@llur.landsh.de

➤ **Dr. Frank Steinmann**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Abteilung Gewässer - Grundwasserhydrologie,
Grundwasserschutz
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
frank.steinmann@llur.landsh.de

➤ **Dipl.-Geol. Claudia Thomsen**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Geologischer Dienst - Ingenieurgeologie,
Energierohstoffe
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
claudia.thomsen@llur.landsh.de

➤ **Dr. Helga Wiederhold**

Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
Forschungsschwerpunkt Grundwassersysteme - Hydrogeophysik
Stilleweg 2, 30655 Hannover
helga.wiederhold@liag-hannover.de

➤ **Anja Wolf**

Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und
ländliche Räume Schleswig-Holstein
Geologischer Dienst - Fachgrundlagen
Hydrogeologie/Grundwasser
Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek
anja.wolf@llur.landsh.de