

Projekt go-CAM

Implementierung strategischer Entwicklungsziele im Küstenzonen- management

Grundwasserströmung und
Schadstofftransport

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

GRoW
GLOBALE RESSOURCE WASSER



Projekt go-CAM

Implementierung strategischer Entwicklungsziele im Küstenzonen- management

Teilvorhaben 2: Grundwasserströmung und Schadstofftransport

Schlussbericht

Anke Schneider
Jens Wolf
Hong Zhao

Januar 2022

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb der Fördermaßnahme Globale Ressource Wasser (GRoW) über den Projektträger Karlsruhe (PTKA) unter dem Kennzeichen 02WGR1427B gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMBF übereinstimmen.

Deskriptoren

d³f++, Dichteströmung, Grundwasser, Hydrogeologie, Klimawandel, Küstenaquifer-Management, Modellierung, Simulation

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzdarstellung	1
1.	Aufgabenstellung.....	1
2.	Voraussetzungen.....	2
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
4.	Stand von Wissenschaft und Technik.....	4
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
II.	Eingehende Darstellung	5
1.	Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse.....	5
1.1.	Das Grundwassermodell d³f++.....	6
1.1.1.	Gleichungssystem für Dichteströmungen.....	6
1.1.2.	Transportgleichungen	8
1.1.3.	Freie Grundwasseroberfläche	9
1.1.4.	Berücksichtigung von Vorflutern.....	10
1.2.	Wasserhaushaltsgrößen und Szenarien	11
1.3.	Indikatoren	14
1.4.	Arbeitsregion 1, norddeutscher Küstenraum, Modell Sandelermöns.....	15
1.4.1.	Problemstellung.....	16
1.4.2.	Hydrogeologisches Modell	18
1.4.3.	Anfangs- und Randbedingungen.....	19
1.4.4.	Ergebnisse	23
1.5.	Arbeitsregion 1, norddeutscher Küstenraum, Modell Großenkneten	32

1.5.1.	Problemstellung.....	32
1.5.2.	Hydrogeologisches Modell	33
1.5.3.	Ergebnisse	37
1.6.	Arbeitsregion 3, Türkei, Modell Antalya.....	43
1.6.1.	Problemstellung.....	43
1.6.2.	Hydrogeologisches Modell	44
1.6.3.	Ergebnisse	51
1.7.	Wissenstransfer.....	55
1.8.	Bewertung der Ergebnisse	55
1.9.	Literatur.....	58
2.	Zahlenmäßiger Nachweis	61
3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	61
4.	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	62
5.	Bekannt gewordene Fortschritte Dritter.....	65
6.	Veröffentlichungen	65
	Abbildungsverzeichnis.....	67
	Tabellenverzeichnis	70

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens go-CAM war die Entwicklung, Implementierung und Anwendung einer multikriteriellen Steuerungsoptimierung für eine nachhaltige Wassernutzung in physiogeografisch unterschiedlichen Küstenregionen. Die in Deutschland entwickelte Steuerungsoptimierung und darauf basierende Software-Pakete wurden mit diesem Vorhaben auf einer internationalen Ebene des Wassersektors transferiert. Das Vorhaben lässt sich in drei Schwerpunkte gliedern:

1) Aufbau, Kalibrierung und Anwendung von hydrologischen, hydrogeologischen und geologischen Modellen im Küstenraum. Abschätzung des aktuellen Wasserdargebots und -bedarfs und der Entwicklung unter Berücksichtigung verschiedener Nutzungsansprüche basierend auf klimatischen und sozioökonomisch/demografischen Szenarien.

2) Ableitung von regionalen Handlungsoptionen mit Hilfe einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA, Multi Criteria Decision Analysis).

3) Transfer der Dialogplattform CAM und den zugrundeliegenden Methoden in internationale Partnerregionen (Türkei) unter Beteiligung assoziierter Projektpartner auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene.

Das Ziel des Teilvorhabens 2 „Grundwasserströmung und Schadstofftransport“ war der Aufbau von Modellen der dichteabhängigen Grundwasserströmung und des Schadstofftransportes auf regionalem Maßstab für die Zielregionen Ostfriesland (Arbeitsregion (AR) 1), Recife-Fortaleza (AR 2, durch Projektkoordination verworfen, s. Abschnitt 3) und Antalya (AR 3), die Aufarbeitung der Ergebnisse für das Querschnittsthema 2 „Coastal Aquifer Management (CAM)“ sowie die Vermittlung dieser Thematik im Querschnittsthema 3: „Human Capacity Building (HCB)“.

2. Voraussetzungen

Die GRS gGmbH ist als gemeinnützige Wissenschafts- und Forschungseinrichtung gemäß § 68 Nr. 9 AO tätig und finanziert sich überwiegend aus Zuwendungen der öffentlichen Hand.

Mit Schreiben des Projektträgers Karlsruhe (PTKA-WTE) vom 19.05.2017 erging der Zuwendungsbescheid zum Antrag vom 14.10.2016 für den Bewilligungszeitraum 01.06.2017 bis 31.05.2020. Mit Schreiben vom 21.03.2020 wurde der Bewilligungszeitraum kostenneutral bis zum 31.12.2020 verlängert. Mit Schreiben vom 27.11.2020 wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 30.6.2021 bewilligt.

Am 26.06.2017 unterschrieb die GRS den Kooperationsvertrag zwischen den Projektpartnern.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

06-12/2017	Überarbeitung des Grundwassermodells Sandelermöns (SM)
01-06/2018	Weiterführung, Auftreten numerischer Probleme u. Beginn Behebung Großenkneten (GK): Beginn konzeptionelle Arbeiten
07-12/2018	GK: Übernahme des geologischen Modells vom TV 3, Aufbau des hydrogeologischen Modells, Beginn der Kalibrierung Grundwassermodell
01-06/2019	SM: Übernahme/Einbau neue 3d Salz-Anfangsbedingung aus TV 5 GK: Weiterführung der Kalibrierung mit vorläufigen Daten für die Grundwasserneubildung (GWN) Antalya (AN): Datenauswertung
07-12/2019	AN: Aufbau des hydrogeologischen Modells
01-06/2020	SM: Übernahme und Einbau der GWN-Daten ab 1970-2100 aus TV 1 und erste Simulationen zur Kalibrierung (grundlegende numerische Probleme behoben) GK: Übernahme und Einbau der GWN-Daten aus TV 1 und Abschluss Kalibrierung unter Benutzung dieser Daten AN: Übernahme und Einbau der GWN-Daten aus TV 1 und Beginn der Modellkalibrierung
07-12/2020	SM: Fortsetzung Modellkalibrierung, Behebung der letzten numerischen Probleme

	GK: Szenariensimulation Grundwasserströmung, Beginn Nitrattransport AN: Abschluss Modellkalibrierung, Beginn Szenariensimulation
01-06/2021	SM: Abschluss Modellkalibrierung mit neu entwickeltem d ³ f++ Tool, Simulation der 12 Szenarien, Transfer der Ergebnisse in das CAM-Tool, Vorstellung auf Projektabschluss-Meeting am 17.6. GK: Modellierung Stickstofftransport AN: Abschluss der Szenariensimulationen
07-12/2021	SM: Wiederholung aller Simulationen auf verfeinertem Rechengitter mit 1.4 Mio Knoten Transfer aller Ergebnisse in das CAM Erstellung des Projektabschlussberichtes

Die Zusammenarbeit innerhalb des Verbundprojektes wurde durch zweimal jährlich stattfindende Projekttreffen befördert, beginnend mit dem Kick-Off Meeting in Oldenburg im August 2017. Herauszuheben ist ein Projekttreffen mit Partnern aus der Türkei zur Erörterung möglicher Modellgebiete. Die GRoW-Statuskonferenzen wurden besucht (Sept. 2017 Karlsruhe, Feb. 2019 Frankfurt am Main, Okt. 2020 Berlin online).

Die Kommunikation insbesondere mit den ausländischen Partnern wurde durch die COVID-19-Pandemie stark erschwert. Geplante Reisen und der Austausch von Wissenschaftlern fielen für unser Teilprojekt vollständig aus. Das beeinträchtigte letztlich die Datenakquise für die Modelle Antalya und Recife Fortaleza sowie die Beiträge zum Human Capacity Building. Die zusätzlich durch den Wechsel von Verantwortlichen vor Ort erschwerte Datenakquise führte zu einer Absage des ursprünglich geplanten Grundwassermodells Recife Fortaleza durch den Projektkoordinator. Die dafür vorgesehenen Personalstunden wurden zusätzlich für das Modell Sandelermöns aufgewendet, dessen Bearbeitung sich als deutlich aufwendiger erwies als vorausgesehen.

Mit der Begründung, dass der Start-Zeitpunkt des Kooperationsprojektes mit dem 1. Juni 2017 für einige Projektpartner sehr ungünstig lag, was den Bearbeitungsbeginn für das gesamte Kooperationsprojekt verzögert hatte, wurde die Projektlaufzeit zunächst bis zum 31.12.2020 kostenneutral verlängert. Eine zweite kostenneutrale Verlängerung bis zum 30.06.2021 erfolgte wegen der Auswirkungen der Pandemie und wegen der Verzögerung der Arbeiten im TV 2 aufgrund numerischer Probleme.

Die Projekt-Abschlusskonferenz wurde pandemiebedingt auf den 17. Juni 2021 verschoben und konnte dennoch nur in hybrider Form stattfinden.

4. Stand von Wissenschaft und Technik

Das go-CAM-Verbundprojekt knüpft an das BMBF-Projekt NAWAK (Entwicklung nachhaltiger Anpassungsstrategien für die Infrastrukturen der Wasserwirtschaft unter den Bedingungen des klimatischen und demographischen Wandels, FKZ 033W007A-D) an, bei dem der Schwerpunkt der GRS ebenfalls auf der Erstellung von 3d Modellen der dichtebeeinflussten Grundwasserbewegung lag, siehe

Wolf, J., Schneider, A., Zhao, H.: Entwicklung nachhaltiger Anpassungsstrategien für die Infrastrukturen der Wasserwirtschaft unter den Bedingungen des klimatischen und demographischen Wandels, Teilvorhaben 1, Abschlussbericht. FKZ 033W007A. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2017

Schneider, A., Zhao, H., Wolf, J., Logashenko, D., Reiter, S., Vogel, A., Howahr, M., Eley, M., Gelleszun, M., Schöniger, H.M., Wiederhold, H.: Modeling saltwater intrusion scenarios for a coastal aquifer at the German North Sea. Proceedings of 25th SWIM, Gdansk, Poland, 17-22 June 2018

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektarbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den go-CAM-Projektpartnern: TU Braunschweig (Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Abt. Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz, Projektkoordinator Prof. H.M. Schöniger), Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOWV), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Leibniz-Institut für angewandte Geophysik (LIAG), INSIGHT Geologische Softwaresysteme GmbH, GISCON Geoinformatik GmbH.

Ein Austausch erfolgte mit Vertretern der Universitäten Antalya und Istanbul sowie dem türkischen Wasserversorger ASAT.

Eine dauerhafte, enge Zusammenarbeit (außerhalb des Vorhabens) besteht mit dem Goethe-Zentrum für wissenschaftliches Rechnen (G-CSC) der Universität Frankfurt.

II. Eingehende Darstellung

1. Durchgeführte Arbeiten und erzielte Ergebnisse

In den Küstenregionen mit hohen Bevölkerungsdichten, Tourismus oder starker landwirtschaftlicher Nutzung sind die Wasserressourcen besonders gefährdet. Eine Übernutzung führt zum Eindringen von Meerwasser und zu Nutzungskonflikten. Drei Phänomene werden als bedeutsam für die zukünftige Wasserversorgung angesehen: Die Auswirkungen des Klimawandels, der sozioökonomische Strukturwandel sowie der institutionelle Wandel im Wassersektor. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit für eine umfassende und nachhaltige Steuerung der Wasserversorgung in Küstenbereichen.

Im Vorhaben NAWAK (/WOL 16/, 033W007A-D) wurde insbesondere der Einfluss des Klimawandels und des demographischen Wandels auf die Wasserversorgung im norddeutschen Küstenraum untersucht. In go-CAM wurden die Methoden weiterentwickelt und die Untersuchungen auf andere Gebiete erweitert. Das Teilvorhaben 2 „Grundwasserströmung und Schadstofftransport“ war an den Arbeiten in den zwei Arbeitsregionen AR 1 nordwestdeutscher Küstenraum und AR 3 Türkei des Projektes go-CAM beteiligt:

Drei Grundwassermodelle wurden aufgebaut. In den Modellgebieten Sandelermöns (AR 1) und Antalya (AR 3) stand die Meerwasserintrusion und damit die Dichteströmung im Fokus, im Modell Großenkneten (AR 1) der Eintrag von Nitrat durch die Landwirtschaft. Für alle drei Modelle wurden hydrogeologische Modelle aufgebaut und kalibriert, Kontroll-Simulationen über historische Zeiträume durchgeführt und Klimaszenarien bis ins Jahr 2100 berechnet. Im Modell Sandelermöns wurde zusätzlich die Trinkwasserförderung variiert. Die Ergebnisse der anderen Teilvorhaben flossen als hydrogeologische Strukturdaten (TV 3, TV 5), zeit- und flächendifferenzierte Randbedingungen zur Grundwasserneubildung (TV 1), Daten zu Wasserförderung, Vorflutern und Hydrochemie (TV 3, TV 4) sowie als Anfangsbedingung für die Salzkonzentration im Modell Sandelermöns (TV 5) in die Modelle des TV 2 ein.

Aus den Simulationsergebnissen wurde Indikatoren abgeleitet, die als Kriterien bzw. Entscheidungsgrundlagen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement in das Coastal Aquifer Management Tool (CAM, TV 7) importiert wurden.

1.1. Das Grundwassermodell d³f++

Der Code d³f++ (distributed density-driven flow) wurde speziell für die dichteabhängige Modellierung großräumiger, komplexer Grundwassersysteme über lange Zeiträume entwickelt. Die Entwicklung erfolgte im Rahmen mehrerer BMBF- bzw. BMWi-geförderter Projekte von 1994 an unter Leitung der GRS in Verbundprojekten mit mehreren Universitäten, s. /FEI 99/, /FEI 04/. Heute kann d³f++ zur Modellierung thermohaliner Strömungen und des Transportes von Radionukliden und anderen Stoffen sowohl in porösen Medien als auch im Kluftgestein eingesetzt werden /SCH 12/, /SCH 13/, /SCH 16/. Die Berücksichtigung freier Grundwasseroberflächen und des Vorflutereinflusses sowie eine teilautomatische Modellkalibrierung sind möglich /SCH 17/, /SCH 20/.

Bei der Entwicklung wurde besondere Sorgfalt in eine möglichst genaue Beschreibung der physikalischen Prozesse und die Entwicklung einer konsistenten Diskretisierung der dabei entstehenden Systeme zeitabhängiger, stark nichtlinearer partieller Differentialgleichungen gelegt /JOH 97/. Da d³f++ auf Vereinfachungen der Differentialgleichungen wie die Boussinesq-Approximation verzichtet, konnten in numerischen Tests mit Salzkonzentrationen bis in den Sättigungsbereich hinein korrekte Ergebnisse erzielt werden /JOH 06/.

d³f++ basiert auf dem Simulationssystem UG („unstructured grids“), /BAS 94/, /VOG 13/, das für viele Anwendungsgebiete genutzt wird und auf dem Gebiet effizienter Lösungsverfahren weltweit Maßstäbe setzt. Der Code war von Beginn an vollständig parallelisiert und besitzt eine dynamische Lastverteilung. Bis heute werden für alle Weiterentwicklungen jeweils numerische Verfahren nach neuestem Forschungsstand angewandt bzw. entwickelt. Dabei werden moderne, schnelle Gleichungslöser wie geometrische und algebraische Mehrgitterverfahren eingesetzt, die asymptotisch optimale Löser für sehr große lineare Gleichungssysteme darstellen /HAC 84/, /WIT 89/, /NAE 15/, /NAE 20/.

1.1.1. Gleichungssystem für Dichteströmungen

Die Grundwasserströmung und der Salztransport in einem porösen Medium werden durch zwei gekoppelte, nichtlineare, zeitabhängige Differentialgleichungen für den Laugenmassenbruch ω und den Druck p beschrieben:

$$\begin{aligned}\partial_t(\phi\rho) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{q}) &= q \\ \partial_t(\phi\rho\omega) + \nabla \cdot (\rho\omega\mathbf{q} - \rho\mathbf{D}\nabla\omega) &= q_s\end{aligned}\quad (1)$$

mit

p [Pa]: Druck

ω [kg kg⁻¹]: Laugenmassenbruch

ϕ [–]: Porosität

$\rho \equiv \rho(\omega)$ [kg m⁻³]: Dichte des Fluids

$\mathbf{q}$ [m s⁻¹]: Geschwindigkeit des Fluids

q, q_s [kg m⁻³ s⁻¹]: Quellterme für das Fluid bzw. die Lauge

$\mu \equiv \mu(\omega)$ [kg m⁻¹ s⁻¹]: dynamische Viskosität des Fluids

- $\mathbf{D} \equiv \phi D_m \mathbf{T} + \mathbf{D}_{\text{disp}}(\mathbf{q})$ [m² s⁻¹]: Tensor der hydrodynamischen Dispersion

$\mathbf{D}_{\text{disp}} \equiv \mathbf{D}_{\text{disp}}(\mathbf{q})$ [m² s⁻¹]: Tensor der mechanischen Dispersion $D_m \equiv D_m$ [m² s⁻¹]: molekularer Diffusionskoeffizient

$\mathbf{T}$ [–]: Tortuositätstensor

Die Geschwindigkeit $\mathbf{q}$ gehorcht dem Darcy-Gesetz

$$\mathbf{q} = - \frac{\mathbf{k}}{\mu} (\nabla p - \rho \mathbf{g}) \quad (2)$$

mit

$\mathbf{k}$ [m²]: Permeabilitätstensor

$\mathbf{g}$ [m s⁻²]: Schwerkraftvektor. Für die mechanische Dispersion wird der Bear-Scheidegger-Ansatz verwendet:

$$\mathbf{D}_{\text{disp}}(\mathbf{q}) = \alpha_L \mathbf{I} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{\mathbf{q} \cdot \mathbf{q}^T}{||\mathbf{q}||} \quad (3)$$

mit

α_L [m]: longitudinale Dispersion,

α_T [m]: transverse Dispersion.

$\mathbf{I}$ [–]: Einheitstensor

Die Funktionen, mit denen die Dichte ρ und die Viskosität μ des Fluids vom Laugenmassenbruch ω abhängen, können in d^{3f++} frei gewählt werden. Es existieren verschiedene

Ansätze in Abhängigkeit der jeweils untersuchten Konzentrations- und Temperaturbereiche. Die Temperatur wird hier als konstant angenommen, und aufgrund der relativ niedrigen Salzkonzentration des Meerwassers wird mit einer linearen Abhängigkeit der Dichte von ω und mit einem konstanten Wert für die Viskosität gearbeitet:

$$\rho(\omega) = \rho_0 + (\rho_{max} - \rho_0) \frac{\omega - \omega_0}{\omega_{max} - \omega_0} \quad (4)$$

mit

$\rho_0 = 998,2 \text{ kg m}^{-3}$ Dichte von Süßwasser,

$\rho_{max} = 1.027 \text{ kg m}^{-3}$ Dichte des Nordsee-Wassers und

$\mu = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ dynamische Viskosität von Süßwasser.

Die mit Abstand wichtigsten Salze des Meerwassers sind Chlorid und Natrium. Der Anteil weiterer Salze wie Sulfat, Magnesium, Calcium und Kalium liegt zusammengenommen unter 15 %.

Der Salzgehalt des Nordseewassers liegt bei 3,5 %, seine Dichte wird mit 1.027 kg/m^3 angenommen /GRU 00/. Auf Grund der Dominanz von Natrium und Chlorid in der Meerwasserzusammensetzung wird hier davon ausgegangen, dass es sich bei dem transportierten, die Dichte beeinflussenden Salz ausschließlich um Natriumchlorid handelt und dass die genannte Dichte einer NaCl-Konzentration von 3,5 % entspricht.

Der besseren Verständlichkeit halber wird im Folgenden, insbesondere bei der Angabe der Beschreibung der Rand- und Anfangsbedingungen in Kap. 3, mit dem dimensionslosen, normierten relativen Massenbruch c gearbeitet:

$$c = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_{max} - \omega_0} . \quad (5)$$

Damit steht hier $c = 1$ für die Konzentration des Meerwassers und $c = 0$ für die Konzentration von Süßwasser.

1.1.2. Transportgleichungen

Zusätzlich zum Salztransport kann mit d^{3f++} der Transport einer Vielzahl weiterer Stoffe modelliert werden. Diese Stoffe beeinflussen nicht die Dichte des Fluids, können jedoch einer Reihe anderer Einflüsse und Wechselwirkungen wie (radioaktivem) Zerfall,

Ausfällung oder verschiedenen Sorptionsprozessen, unterliegen. Die Konzentrationen c_i der Stoffe ergeben sich aus dem Gleichungssystem

$$\partial_t(\phi R_i c_i) + \nabla \cdot (c_i \mathbf{q} - \mathbf{D} \nabla c_i) + \phi R_i \lambda_i c_i = q_i \quad (6)$$

mit

$$R_i = 1 + \frac{1-\phi}{\phi} \rho_r K_d^{(i)} [-]: \text{Retardationsfaktor}$$

$$\rho_r [kg\ m^{-3}]: \text{Gesteinsdichte}$$

$$K_d^{(i)} [m^3\ kg^{-1}]: \text{Verteilungskoeffizient}$$

$$\lambda_i = \frac{\ln 2}{T_{1/2}^{(i)}} [s^{-1}]: \text{Abbaukonstante}$$

Der Quellterm q_i enthält die Radionuklide k , die in die Radionuklide i zerfallen:

$$q_i = \phi \sum_k R_k \lambda_k c_k \quad (7)$$

mit

$$\lambda_k: \text{Abbaukonstante Radionuklid } k$$

$$c_k: \text{Konzentration Radionuklid } k.$$

1.1.3. Freie Grundwasseroberfläche

In d3f++ werden freie Grundwasseroberflächen mit Hilfe von Levelset-Funktionen modelliert, /FRO 12/, /SCH 12/. Die zeitabhängige Position der Grundwasseroberfläche $\Gamma(t)$ in einem Gebiet D wird implizit als die Nullmenge der Levelsetfunktion $\varphi(x, t)$ beschrieben, d. h. $x \in \Gamma(t) \Leftrightarrow \varphi(x, t) = 0$. $\Gamma(t)$ unterteilt D in den gesättigten Bereich $\Omega(t)$, in dem die Darcy-Gleichung gilt, und den ungesättigten Bereich $D \setminus \Omega(t)$, s. Abb. 1.

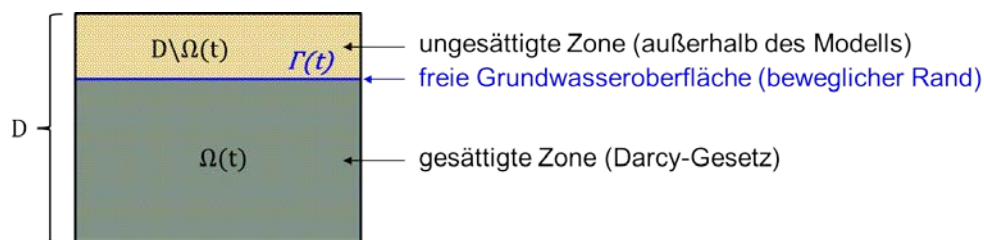


Abb. 1 Gebiet D , durch den beweglichen Rand $\Gamma(t)$ unterteilt in den gesättigten Bereich $\Omega(t)$ (Lösung des DGL-Systems) und den ungesättigten Bereich $D \setminus \Omega(t)$ (außerhalb des Modells)

Als Levelset-Funktion wird die “signed distance function” Φ ausgewählt mit $\|\nabla \Phi\| = 1$ und $\Phi(\gamma) = 0, \gamma \in \Gamma(t)$. $\Gamma(t)$ repräsentiert den zeitabhängigen Teil des Randes von Ω , der sich mit der Normalengeschwindigkeit $S(\gamma) := \vec{N}(\gamma) \cdot \frac{q}{\phi}(\gamma, t)$, $\gamma \in \Gamma(t)$, bewegt. Dabei ist $\vec{N}$ der äußere Normalenvektor auf dem Rand $\Gamma(t)$. Die Geschwindigkeit S kann offensichtlich leicht auf das Gebiet $D \setminus \Omega(t)$, interpoliert werden, was notwendig ist, um die Bewegung von $\Gamma(t)$ zu simulieren /FRO 12/.

Die Benutzung von Levelset-Funktionen zur Beschreibung von $\Gamma(t)$ hat einige Restriktionen für diesen Teil des Modellrandes zur Folge. So ist für den Druck zu jedem Zeitpunkt die Dirichlet-Randbedingung $p = 0$ auf $\Gamma(t)$ durch die Diskretisierung fest vorgegeben und kann nicht geändert werden /SCH 12/. Das heißt sowohl die Grundwasserneubildung als auch die Entwässerung durch die Vorfluter können nicht als Randbedingungen im strengen Sinne behandelt werden. Beide Effekte werden als Faktoren modelliert, die direkt in die Normalengeschwindigkeit von $\Gamma(t)$ eingehen, s. /SCH 12/:

$$S = \left(\frac{1}{\phi} \mathbf{q} + \frac{r}{\phi} \mathbf{e}_z + \frac{c}{\phi} \mathbf{e}_z \right) \cdot \vec{N}, \quad (8)$$

wobei ϕ die effektive Porosität des Mediums im benachbarten Bereich des Modellgebietes ist. $r = r(t, \gamma)$ stellt die Grundwasserneubildung dar und $c = c(t, \gamma, \Gamma)$ ist eine spezielle Quelle, die die Vorfluter auf dem oberen Modellrand abbildet ($\mathbf{e}_z$ ist der Einheitsvektor in z-Richtung.)

Die Werte von $r = r(t, \gamma)$ werden als stückweise konstante, zeitabhängige Funktionen auf der Projektion des oberen Modellrandes in die x-y-Ebene betrachtet.

1.1.4. Berücksichtigung von Vorflutern

Vorfluter werden als eindimensionale Projektionen in die x-y-Ebene abgebildet und können in z-Richtung eine beliebige Tiefe haben. Sie werden als separates Gitter von Polygonzügen behandelt. Die den Vorflutern entsprechende Quelle $C = C(t, \gamma, \Gamma)$ ist gegeben durch

$$C = -\frac{k_c \cdot \rho_r \cdot g}{\varepsilon \cdot \mu_r} \cdot (h_s(\gamma) - h_{fs}(t, \gamma, \Gamma)) \cdot w. \quad (9)$$

Dabei steht g für die Gravitationskonstante und w für die Breite des Flusses. k_c und ε sind die effektive Permeabilität bzw. die Dicke der Kolmationsschicht, ρ_r und μ_r die effektive Permeabilität und Viskosität des Flusswassers, $h_s(\gamma)$ ist der spezifische Wasserstand des Vorfluters und $h_{fs}(t, \gamma, \Gamma)$ der Grundwasserstand. Anstelle von C wird die geglättete Funktion c verwendet:

$$c(t, \gamma, \Gamma) = \int_{B_\delta^{xy}(\gamma)} C(t, \gamma', \Gamma) \cdot M(\gamma, \gamma') \cdot d\gamma', \quad (10)$$

wobei δ eine vorzugebende Glättungsweite ist, $B_\delta^{xy}(\gamma)$ ein Kreis mit dem Radius δ um die Projektion von γ in der xy -Ebene und $M(\gamma, \gamma')$ die Glättungsfunktion

$$M(\gamma, \gamma') = \begin{cases} \frac{\delta - d(\gamma, \gamma')}{\pi\delta^3/3}, & d(\gamma, \gamma') < \delta \\ 0, & d(\gamma, \gamma') \geq \delta \end{cases}. \quad (11)$$

$d(\gamma, \gamma')$ stellt den Abstand zwischen den Projektionen von γ und γ' in der xy -Ebene dar. Um unphysikalisch starke Quellen zu vermeiden, kann der Wert $h_s(\gamma) - h_{fs}(t, \gamma, \Gamma)$ zusätzlich auf einen vorgegebenen Maximalwert beschränkt werden.

Dieser Ansatz war im Rahmen des Vorhabens NAWAK speziell für die Verhältnisse im Marschland angepasst worden. Solche Regionen sind durch ein feines Netz an Entwässerungsgräben charakterisiert, die nicht im Einzelnen durch das Modell erfasst werden können. Deshalb wird um jeden Vorfluter ein Bereich definiert, der durch die Vorflut direkt beeinflusst wird. Mit der Wahl eines größeren Wertes für den Radius δ lässt sich der Einfluss der kleineren Vorfluter bzw. Entwässerungsgräben, die nicht explizit in das Modell übernommen werden, abbilden.

1.2. Wasserhaushaltsgrößen und Szenarien

Für den unterirdischen Wasserkörper in einem Modellgebiet wird üblicherweise die folgende Wasserbilanzgleichung aufgestellt:

$$\Delta S = GW_{ZU} + GW_{NEU} + Q + GW_{OB} + GW_{AB} \quad (12)$$

mit

ΔS : Speicheränderung im Grundwasserkörper im Modellgebiet

GW_{ZU} : unterirdische Zuflüsse ins Modellgebiet

GW_{NEU} : Grundwasserneubildung im Modellgebiet

Q : Entnahmemenge durch Förderbrunnen

GW_{OB} : Abfluss über die Flüsse (Siele) im Modellgebiet

GW_{AB} : unterirdische Abflüsse aus dem Modellgebiet

Diese Bilanzgrößen werden in den Ergebnistabellen für die einzelnen Modelle angegeben.

Die Analyse in der Modellregion Sandelermöns im Projekt NAWAK hatte ergeben, dass zur Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen einerseits explorative Szenarien zur Änderung wichtiger Wasserhaushaltsgrößen, die die Grundlage für die Berechnung des Wasserdargebots liefern (**Klimaszenarien**), und andererseits „quasi“-normative Szenarien zur Entwicklung der Region hinsichtlich regionalwirtschaftlicher Wachstumstrends, demographischer Entwicklungen, aber auch möglichen Nutzungskonkurrenzen zwischen öffentlicher Wasserversorgung, Industrie, Landwirtschaft (sozioökonomische Szenarien oder **Bedarfsszenarien**) notwendig sind. Mit der Zielsetzung, die Ungewissheiten der zukünftigen Entwicklung möglichst umfassend zu beschreiben, wurde der Ansatz gewählt, die Klimaszenarien mit den Bedarfsszenarien zu kombinieren. Dieser Ansatz wurde im Projekt go-CAM weiterverfolgt und auf weitere Arbeitsregionen übertragen. Der Zeithorizont wurde bis zum Jahr 2100 verlängert.

Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung der Dynamik des Grundwassers werden folgende Bedingungen verändert:

1. Förderung durch veränderten Wasserbedarf durch demographische und ökonomische Entwicklungen (Bedarfsszenarien, soweit vorhanden)
2. Änderung der Grundwasserneubildung durch veränderte klimatische Verhältnisse (Klimaszenarien)
3. Anstieg des Meeresspiegels

Klimaszenarien: Die klimatische Entwicklung bis zum Jahr 2100 geht in Form veränderter Grundwasserneubildungsraten in das Modell ein. Für die IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 wurden Grundwasserströmung und Transport mit jeweils 3 Varianten der Grundwasserneubildung berechnet. Dabei stellt RCP 4.5 ein Szenario mit mittlerer

Treibhausgaskonzentration (650 CO₂-äq) und mittlerem Strahlungsantrieb (4.5 W/m²) dar und liegt damit knapp über dem im NAWAK-Projekt betrachteten SRES-Basis-Szenario B1. Szenario 8.5 stellt das extremste der betrachteten Szenarien mit einem kontinuierlichen Anstieg der Treibhauskonzentration und des Strahlungsantriebes dar und weist bis zum Jahr 2100 etwa doppelt so hohe Werte auf (1 370 ppm CO₂-äq/8,5 W/m²), es entspricht in etwa dem SRES-Szenario A2. Die Grundwasserneubildungsraten wurden im TV 1 mit Hilfe des Programms PANTA RHEI für 17 verschiedene Varianten zeit- und flächendifferenziert ermittelt. Daraus wurden die relevantesten Varianten 1, 3 und 5 für die Grundwassermodellierung ausgewählt. Diese Daten wurden jeweils als monatliche Durchschnittswerte für die 147 Teilflächen in d³f++ importiert.

Anstieg des Meeresspiegels: Für die verschiedenen RCP-Klimaszenarien werden vom ICCP Werte für einen kontinuierlichen Anstieg des Meeresspiegels angegeben. Darauf basierend wurde im Grundwassermodell ein Anstieg von 0,5 m bzw. 1 m bis zum Jahr 2100 berücksichtigt.

Bedarfsszenarien: Für das Wasserwerk Sandelermöns wurden zusätzlich vom OOW zwei verschiedene Wasserbedarfsszenarien bis zum Jahr 2100 zur Verfügung gestellt (Tab. 1). Diese wurden den heutigen Relationen entsprechend auf die einzelnen Förderbrunnen umgelegt. Für die Wasserwerke Kleinhorsten und Feldhausen sowie die 38 zusätzlich in der Modellregion berücksichtigten Brunnen in privater Hand (s. Abschnitt 1.4) wurde angenommen, dass ihre Fördermengen bis zum Jahr 2100 konstant bleiben.

Tab. 1 Wasserbedarfsszenarien für das Modell Sandelermöns

Jahr	Fördermenge [Mio. m ³ /a]					
	Klein- horsten	Feld- hausen	Förderzenario 1 (A1.4)		Förderzenario 2 (A1.5)	
			Sandeler- möns	Summe	Sandeler- möns	Summe
2010	6	9.85	6.42	22.27	6.42	22.27
2011	6	9.85	6.36	22.21	6.36	22.21
2012	6	9.85	6.61	22.46	6.61	22.46
2013	6	9.85	7.28	23.13	7.28	23.13
2014	6	9.85	8	23.85	8	23.85
2015	6	9.85	7.49	23.34	7.49	23.34
2016	6	9.85	7.73	23.58	7.73	23.58
2017	6	9.85	8.01	23.86	8.01	23.86
2018	6	9.85	8.09	23.94	8.09	23.94

2019	6	9.85	7.71	23.56	7.71	23.56
2020	6	9.85	15	30.85	15	30.85
2030	6	9.85	15	30.85	15	30.85
2040	6	9.85	15	30.85	15	30.85
2050-2100	6	9.85	20	35.85	15	30.85

Aus der Kombination der Bedarfsszenarien mit den Klimaszenarien ergeben sich für das Modell Sanderelermöns die Tab. 2 Rechenfälle. Für die beiden anderen Modellgebiete existieren keine Bedarfsprognosen. Hier wurden nur die Klimaszenarien betrachtet.

Tab. 2 Rechenfälle aus den kombinierten Klima- und Wasserbedarfsszenarien

Nr.	Klimaszenario	Förderszenario	Meeresspiegel
A1.5, 1.45	RCP 4.5, GWN Variante 1	moderat	+ 0.5 m
A1.4, 1.45		+Erhöhung 2050	
A1.5, 1.85	RCP 8.5, GWN Variante 1	moderat	+ 1 m
A1.4, 1.85		+Erhöhung 2050	
A1.5, 3.45	RCP 4.5, GWN Variante 3	moderat	+ 0.5 m
A1.4, 3.45		+Erhöhung 2050	
A1.5, 3.85	RCP 8.5, GWN Variante 3	moderat	+ 1 m
A1.4, 3.85		+Erhöhung 2050	
A1.5, 5.45	RCP 4.5, GWN Variante 5	moderat	+ 0.5 m
A1.4, 5.45		+Erhöhung 2050	
A1.5, 5.85	RCP 8.5, GWN Variante 5	moderat	+ 1 m
A1.4, 5.85		+Erhöhung 2050	

1.3. Indikatoren

Ein Ziel des Vorhabens ist die Bereitstellung der Simulationsergebnisse für das MCDA-Tool CAM. Aus den zeitabhängigen Resultaten für die Grundwasserstände und die Chloridkonzentrationen werden mit Hilfe des Tools CAMup (TV 1) die gemeinsam mit den Verbundpartnern definierten Indikatoren (Mittelwerte und Trends) in Form von Rasterdateien für jeweils zwei Zeiträume berechnet und zur Auswertung in das CAM-Tool eingespeist. Die Indikatoren sind in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3 Durch das Grundwassermodell bereitgestellte Indikatoren

CAM-Indikatoren Grundwassermodell	für Zeiträume
Grundwasserstand [m]	Mittelwerte 2021-2050, 2071-2100
Grundwasserstände, Trend [m]	Trends 2021-2050, 2071-2100
Grundwasserflurabstand [m]	Mittelwerte 2021-2050, 2071-2100
Grundwasserflurabstand, Trend [m]	Trends 2021-2050, 2071-2100
Chloridkonzentration in 10 m NN [mg/l]	Mittelwerte 2021-2050, 2071-2100
Chloridkonzentration in 60 m NN [mg/l]	Mittelwerte 2021-2050, 2071-2100
Chloridkonzentration in -100 m NN [mg/l]	Mittelwerte 2021-2050, 2071-2100
Chloridkonzentration in -10 m NN, Trend [mg/l]	Trends 2021-2050, 2071-2100
Chloridkonzentration in -60 m NN, Trend [mg/l]	Trends 2021-2050, 2071-2100
Chloridkonzentration -100 m NN, Trend [mg/l]	Trends 2021-2050, 2071-2100
verfügbares Trinkwasservolumen [Mio. m³]	Mittelwerte 2021-2050, 2071-2100

In der Fallstudie Großenkneten werden anstelle der in Tab. 3 genannten Chloridkonzentrationen die Konzentrationen von Stickstoff bzw. ihr Trend in den Ebenen 19 m NN, 6 m NN und -20 m NN berechnet.

1.4. Arbeitsregion 1, norddeutscher Küstenraum, Modell Sandelermöns

Die Modellregion Sandelermöns liegt auf der ostfriesischen Halbinsel und wird im Norden von der Nordsee und im Nordosten vom Jadebusen begrenzt. Wichtige Landschaftselemente auf der ostfriesischen Halbinsel sind die durch ein dichtes Netz von Kanälen und Entwässerungsgräben durchzogene Marsch und die Geest. Das Modellgebiet hat eine Fläche von rund 1.000 km² und umfasst die Einzugsgebiete der Wassergewinnungsanlagen (WGA) Sandelermöns, Feldhausen und Kleinhorsten (Abb. 2).

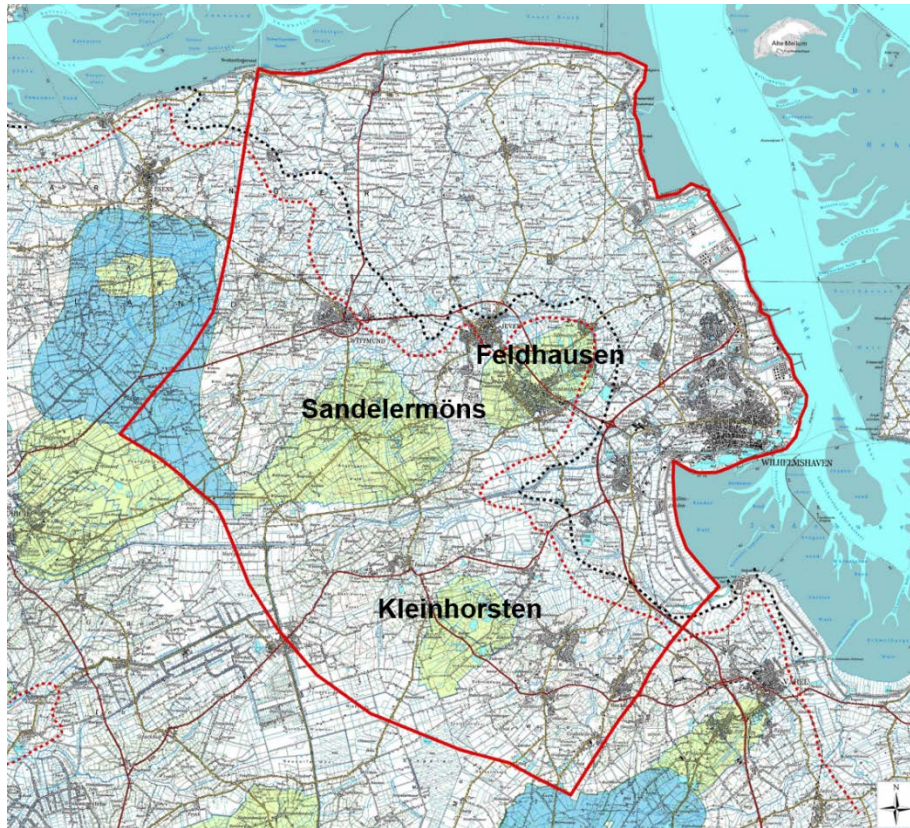


Abb. 2 Lage des Modellgebietes Sandelermöns; rot: Modellgrenze; grün: Einzugsgebiete der drei Wassergewinnungsanlagen; gepunktet: Lage der Süß-/Salzwassergrenze gemäß NLWKN (schwarz vollständig, rot teilweise versalzt)

1.4.1 Problemstellung

Das Wasserwerk Sandelermöns gehört zum Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverband (OOWV), die Wasserwerke Feldhausen und Kleinhorsten zum GEW Wilhelmshaven. Die Einzugsgebiete der Wasserwerke sind vor allem durch den im Zuge des Klimawandels prognostizierten Anstieg des Meeresspiegels, verbunden mit einer jahreszeitlichen Verschiebung der Niederschlagsmengen, und ein dadurch ausgelöstes Vordringen der Süß-/ Salzwassergrenze gefährdet. Deshalb kommt der Koordinierung der Vergabe von Wasserrechten durch die Behörden eine große Bedeutung zu.

Für das Modellgebiet Sandelermöns lag bereits ein im Projekt NAWAK entwickeltes Modell vor, mit dem die dichtebeeinflusste Grundwasserströmung für neun Klima- und Bedarfsszenarien bis zum Jahr 2050 berechnet worden waren. In NAWAK waren für d³f++ vielfältige neue, technische Herausforderungen zu bewältigen, in erster Linie der Umgang mit einer freien Grundwasseroberfläche über eine Fläche von rund 1.000 km², aber

auch der Datentransfer zum Aufbau des hydrogeologischen Modells, der Import flächendifferenzierter, zeitabhängiger Daten für die Grundwasserneubildung und einer dreidimensionalen Anfangsbedingung für die Salzkonzentration im Grundwasser, die Ankopplung von Vorflutern und die Kalibrierung dieses komplexen Modells. Die Szenarienberechnungen waren auf einem Rechengitter mit lediglich 92.000 Elementen erfolgt. Damit gesicherte Prognosen erstellt werden können, sind jedoch deutlich feinere Rechnungen notwendig. Dies war im Rahmen von NAWAK nicht mehr möglich.

Im Rahmen des Projektes go-CAM wurden durch die Projektpartner sowohl das hydrogeologische Modell (TV 5, TV 6) als auch die Anfangsbedingung für die Salzkonzentration (TV 5) überarbeitet. Der OOWV (TV 3) aktualisierte seine Wasserbedarfszenarien.

Für die Ergebnisse des Strömungsmodells stellt die Entwässerung des Modells durch die Vorfluter die wesentliche Einflussgröße dar. Im Projekt NAWAK hatte sich gezeigt, dass nur an wenigen Stellen Pegel existieren. Hinzu kommt, dass über die Siele ein großes Wasservolumen aktiv in das Meer gepumpt wird, dass aber bei weitem nicht für alle Siele Daten dazu vorliegen. Diese Datenlage stellte ein großes Problem für die Qualifizierung der Ergebnisse dar. Im laufenden Vorhaben wurden weitere Daten, mit deren Erhebung im Rahmen von NAWAK begonnen wurde, akquiriert (TV 1, TV 3, TV 4) und in die Modelle eingearbeitet. Im TV 1 wurden aktuelle Klimaszenarien modelliert.

Diese neuen Daten flossen sowohl in die Modellgeometrie als auch als Anfangs- und Randbedingungen in das Grundwassermodell ein. Zusätzlich wird das Netz der berücksichtigten Vorfluter erweitert. Der Prognosezeitraum wurde auf das Jahr 2100 verlängert.

Anhand der vorliegenden Daten für die Grundwasserstände war das Modell zu kalibrieren. Im Anschluss erfolgte ein Kontroll-Rechenlauf für den historischen Zeitraum von 1970 bis 2016, für den die Daten für die Grundwasserneubildung ebenfalls vom TV 1 bereitgestellt worden waren. Darauf aufbauend waren 12 Prognoserechnungen bis zum Jahr 2100 gemäß den in Tab. 2 aufgeführten Klima- und Wasserbedarfsszenarien durchzuführen.

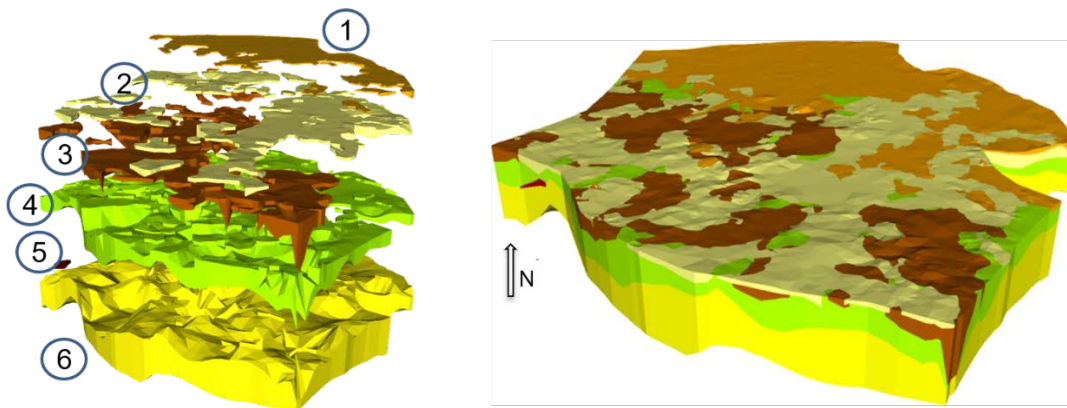
Die letzte Aufgabenstellung bestand darin, aus den Modellergebnissen zuvor definierte Indikatoren abzuleiten und entsprechende Indikatorraster zu errechnen, um diese in das im TV 7 entwickelte MCDA-Tool CAM zu exportieren und somit zur Bewertung durch die Akteure zur Verfügung zu stellen.

1.4.2 Hydrogeologisches Modell

Das Grundwassermodell Sandelermöns basiert auf einem vom Projektpartner OOWV erstellten, komplexen hydrogeologischen 3d Modell mit einer Ausdehnung von rund 1.000 km². Eine detaillierte Beschreibung erfolgt im gemeinsamen Abschlussbericht aller Teilvorhaben.

Das Modellgebiet besteht aus den glazial geprägten Einheiten der Oldenburgisch-Ostfriesischen Geest und den zum Meer hin angrenzenden Marschgebieten, s. Abb. 3. Es handelt sich im Wesentlichen um elsterzeitliche (Schicht 4) und pliozäne (Schicht 6) Sande, die durch schluffig-tonige Einheiten unterbrochen werden. Der im westlichen Teil der ostfriesischen Halbinsel bedeutende Tergaster Ton (Schicht 5) ist im Modellgebiet kaum vorhanden, so dass die elsterzeitlichen und pliozänen Sande einen zusammenhängenden Grundwasserleiter bilden. Die wichtigste geringdurchlässigste Einheit im Modellgebiet ist der elsterzeitliche Lauenburger Ton (Schicht 3), der in der westlichen Hälfte des Modellgebietes die elsterzeitlichen und pliozänen Sande von einem geringmächtigen saalezeitlichen (Drenthe) Grundwasserleiter (Schicht 2) trennt. Dieser Grundwasserleiter ist im Modellgebiet teilweise von Geschiebelehm bedeckt, in den Marschgebieten schließt der für diese Region typische Klei die Schichtenfolge ab (Schicht 1).

Die Modelldaten wurden in SubsurfaceViewer® MX (TV 6) in Form von Schichtgrenzen der hydrogeologischen Einheiten aufbereitet und an den Präprozessor des Grundwassermodells d³f++ übergeben. Im hydrogeologischen Modell werden sechs Einheiten unterschieden, denen zu Beginn der Modellkalibrierung jeweils ein einheitlicher Wert für die Permeabilität und Porosität zugeordnet wird.



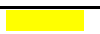
1		Klei, Torfe, Sande, Geschiebelehm
2		Schmelzwassersande (Drenthe)
3		Lauenburger Ton, Geschiebelehm
4		Schmelzwassersande (Elster)
5		Tergaster Ton
6		Fluviatile Sande

Abb. 3 Hydrogeologisches Modell Sandelermöns, 50fach überhöht

Das hydrogeologische Modell wird durch ein Grobgitter aus 21.304 Prismen-Elementen abgebildet (Abb. 5), das während der Berechnung mehrfach verfeinert wird.

1.4.3 Anfangs- und Randbedingungen

Eine Schwierigkeit ist, dass die existierende Versalzungssituation in den Aquiferen nicht allein durch das Meerwasser an der heutigen Küstenlinie und die hydraulischen Verhältnisse erklärt werden kann. Die Salzverteilung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die historische Überflutungssituation vor Beginn der Eindeichung zurückzuführen. Bis vor wenigen 1.000 Jahren war das heutige Marschland von Meerwasser überflutet/BEH 07/. Da die genaue Lage der Süß-/Salzwassergrenze, insbesondere im Hinblick auf ein dreidimensionales Modell, sich nicht allein aus den bei OOWV und NLWKN vorliegenden Messwerten ableiten lässt, stellen die Ergebnisse der im Rahmen des TV 5 ausgewerteten geophysikalischen Messungen, insbesondere der aeroelektromagnetischen Befliegungsdaten (HEM), als Anfangsbedingung für das Grundwassermodell eine wesentliche Basis für die Prognoserechnungen dar. Die abgeleiteten Werte für die Chloridkonzentration sind beispielhaft in zwei Tiefen in Abb. 4 dargestellt. Für die Simulationen wurden die Messwerte zur Küstenlinie hin und über den nicht erfassten Teil des Modellgebietes extrapoliert.

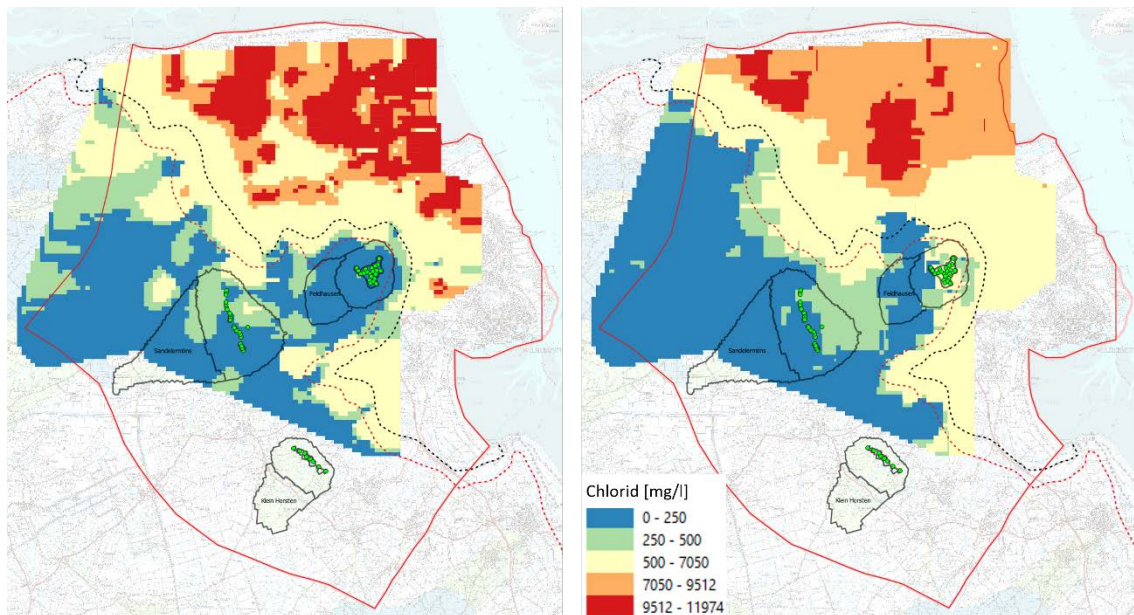


Abb. 4 Chloridkonzentration in 10 m (links) bzw. 60 m (rechts) Tiefe aus den HEM-Daten; rot: Modellgrenze; schwarz: Wasserschutzgebiete; grün: Förderbrunnen; gepunktet: Süß-/Salzwassergrenze lt. NLWKN

Eine weitere Anfangsbedingung stellt die Lage der Grundwasseroberfläche im Jahr 2011 dar, die bereits im Projekt NAWAK aus den Daten von 385 Messstellen abgeleitet worden war.

Das Modellgebiet grenzt im Norden an die Nordsee und im Nordosten an den Jadebusen. Für diese Ränder wurden jeweils ein hydrostatischer Druck und die Konzentration von Meerwasser $c = 1$ fest vorgegeben, das entspricht 35 g/l NaCl bzw. 18 g/l Cl⁻, s. a. Gleichung (4). Die südliche Modellgrenze wurde auf eine Wasserscheide gelegt und die westliche und die südöstliche Modellgrenze so gewählt, dass sie senkrecht zu den Grundwassergleichen verlaufen. Diese Ränder können daher als für Strömung und Salztransport geschlossen betrachtet werden. Nach unten hin wird das Modell durch undurchlässige geologische Schichten begrenzt, dieser Rand wird ebenfalls als für Strömung und Transport geschlossen angenommen.

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung stellen für das Grundwassermodell eine weitere wichtige Randbedingung dar. Sie wurden räumlich und zeitlich differenziert aus dem hydrologischen Modell PANTA RHEI importiert. Dabei wurden 147 Teilflächen unterschieden (Abb. 5). Ebenfalls als Randbedingung enthält das Modell ein dichtes Netz von Vorflutern, die im wesentlichen Wasser aus dem Modellgebiet in Richtung Nordsee transportieren. Dabei hängt die Menge des in- bzw. exfiltrierenden Wassers

von der Differenz zwischen Flusswasserstand und Grundwasserstand ab sowie von der Durchlässigkeit des Flussbettes (Kolmationsschicht), s. Gleichung (9). Für die Pegel der Flüsse liegen nur sehr wenige Messwerte vor. Hinzu kommt, dass die meisten der Schöpfwerke, die das Wasser der Vorfluter aktiv in das Meer pumpen, ihre Fördermengen nicht erfassen (s. Abschnitt 1.4.1). Die Parameter der Vorfluter gingen daher weitgehend als Unbekannte in den Kalibrierungsprozess ein.

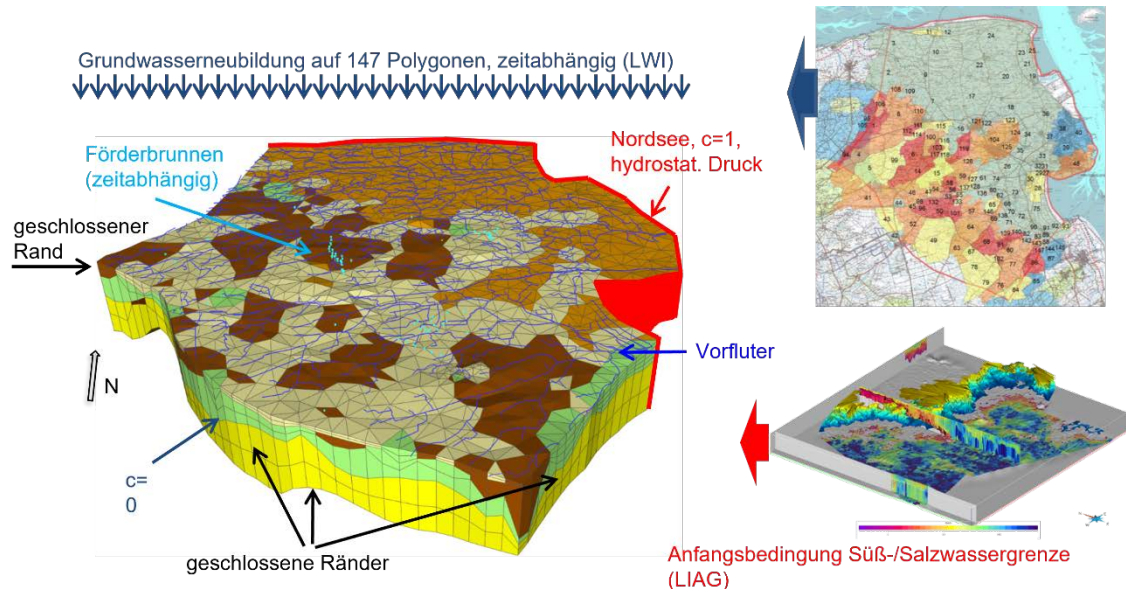


Abb. 5 Grobgrid (50fach überhöht), Anfangs- und Randbedingungen sowie Entnahmebrunnen im Grundwassermodell für die Region Sandelermöns; „c=1“ steht für die Salzkonzentration der Nordsee (35 g/l NaCl bzw. 18 g/l Cl⁻)

Förderbrunnen stellen für den Grundwassercode d³f++ Linienquellen mit negativer Stärke dar. Dabei entspricht jede Filterstrecke einer Linie. Insgesamt sind 93 Förderbrunnen im Modell enthalten. Die Stammdaten und die Förderdaten der drei im Gebiet fördernden Wassergewinnungsanlagen (WGA) Sandelermöns (25 Brunnen), Kleinhorsten (acht Brunnen) und Feldhausen (22 Brunnen) wurden von den Betreibern bereitgestellt, die Förderdaten von 38 zusätzlich berücksichtigten Brunnen der Industriebetriebe und der Landwirtschaft vom NLWKN. Die Förderbrunnen der Wasserwerke weisen Filterstrecken über 20 bis 30 m in Tiefen zwischen -15 und -124 m NN auf. Ihre Förderleistungen bewegen sich gegenwärtig zwischen 5.000 und 716.000 m³/a.

Die Rechnungen erfolgten auf Gitter-Level 2 (1.4 Mio. Elemente). Zunächst musste das Fluidvolumen im Modell in einen Gleichgewichtszustand gebracht werden. Dazu wurden sowohl die Permeabilitäten der einzelnen hydrogeologischen Schichten als auch die

Wasserstände in den Vorflutern variiert. Für die Modellkalibrierung wurden Daten aus 285 vorhandenen Messstellen genutzt. Dafür wurde das neu in d3f++ entwickelte Kalibrierungstool verwendet. Zur Kontrolle der korrekten Berechnung der Grundwasserstände wurde ein Rechenlauf von 1970 bis 2016 unter Benutzung der im TV 1 ermittelten historischen Grundwasserneubildungsraten durchgeführt. Für eine Kontrolle der Entwicklung der Salzkonzentrationen reicht die Datenlage für das Jahr 1970 nicht aus. Tab. 4 und Abb. 6 zeigen die Ergebnisse. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient beträgt 0.78.

Tab. 4 Permeabilitäten im Ergebnis der Modellkalibrierung

	Einheit	Permeabilität Startwert [m ²]	Permeabilität Kalibrierung [m ²]	Porosität [-]
	Klei, Torfe, Sande, Geschiebelehm	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	0.1
	Schmelzwassersande (Drenthe)	$1 \cdot 10^{-10}$	$5.1 \cdot 10^{-11}$	0.2
	Lauenburger Ton, Geschiebelehm	$1 \cdot 10^{-13}$	$7.2 \cdot 10^{-13}$	0.05
	Schmelzwassersande (Elster)	$4 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-11}$	0.2
	Tergaster Ton	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	0.05
	Fluviatile Sande	$2.8 \cdot 10^{-11}$	$2.8 \cdot 10^{-11}$	0.2

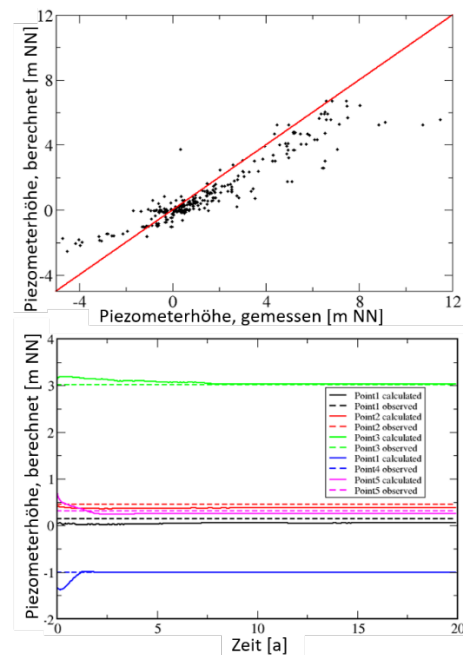
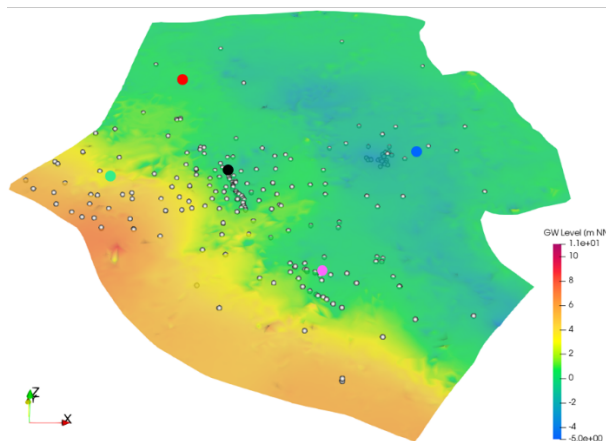


Abb. 6 Ergebnisse der Modellkalibrierung; links: Lage der Grundwasseroberfläche in Relation zu den Messpunkten; rechts: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Werten

1.4.4 Ergebnisse

Um die Ergebnisse abzusichern, wurde mit dem kalibrierten Modell zunächst der Zeitraum von 1970 bis 2016 simuliert. Im Anschluss wurden für alle 12 in Tab. 2 dargestellten Szenarien Simulationsläufe von 2017 bis zum Jahr 2100 durchgeführt. Abb. 7 zeigt beispielhaft für zwei ausgewählte Szenarien die für das Jahr 2100 berechnete Lage der Grundwasseroberfläche. Im Bereich links der Mitte ist deutlich der Absenktichter der WGA Sandelermöns erkennbar. Für das Szenario mit der ab 2050 nochmals erhöhten Förderrate ist er deutlich stärker ausgeprägt, die Absenkung des Grundwasserspiegels bleibt allerdings auf einen kleinen Bereich des Modellgebietes begrenzt. Die Absenktichter der beiden anderen WGA sind weniger stark ausgeprägt. Für Szenario 1.85 (rechte Abbildung) zeigt sich die Auswirkung des stärkeren Anstiegs des Meeresspiegels in einem leichten Anstieg des Grundwasserspiegels entlang der Küstenlinie.

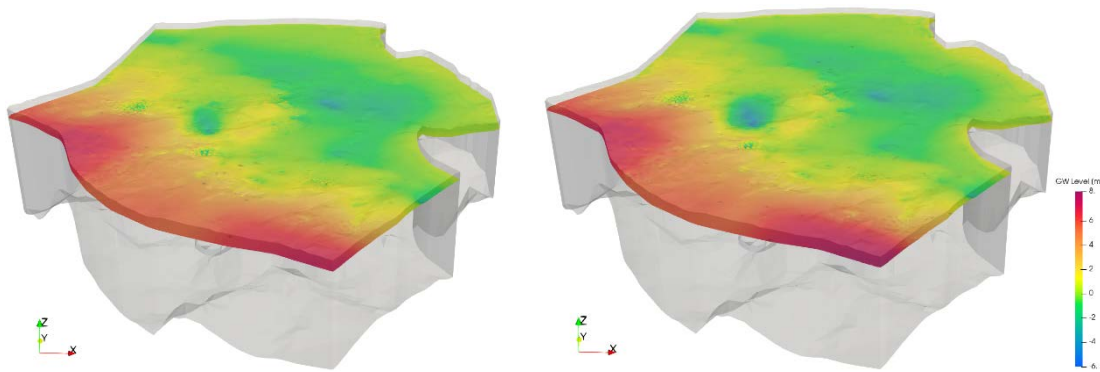


Abb. 7 Simulierte Lage der freien Grundwasseroberfläche für Szenario 1.45 mit moderater Förderrate und für Szenario 1.85 mit stärkerer Förderrate im Jahr 2100 (Darstellung 50fach überhöht)

In Abb. 8 ist die für das Jahr 2100 prognostizierte Verteilung der Salzkonzentration für das Szenario 1.45 in zwei verschiedenen Tiefen dargestellt – in -60 m NN, in der sich auch die Filterstrecken der meisten Förderbrunnen befinden, und in -100 m NN. Die Konturlinien verdeutlichen die über alle Szenarien hinweg beinahe identische, deutliche Bewegung der Trinkwassergrenze ins Landesinnere.

Tab. 5 verdeutlicht, dass sich die Trinkwassergrenze insbesondere in den Szenarien mit stärkerer Förderung zwar bis zu einem km weit bewegt, zu den Brunnen der WGA Sandelermöns jedoch noch immer einen sicheren Abstand aufweist.

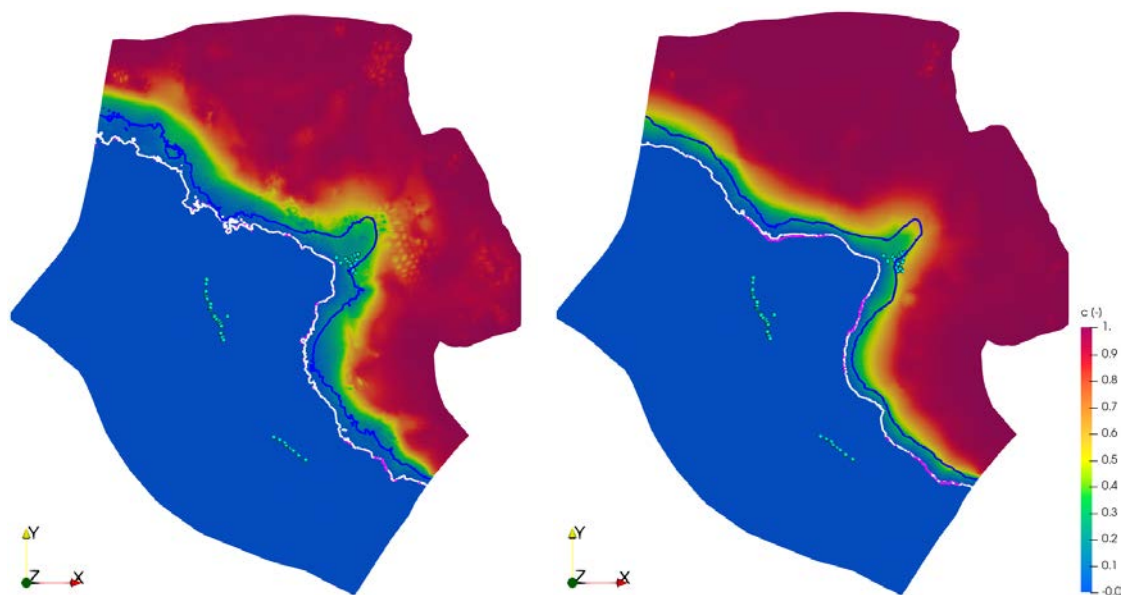


Abb. 8 Salzverteilung im Jahr 2100 in -60 m (links) und -100 m (rechts) NN für das Szenario 1.45 mit moderater Förderrate

Konturlinien: Trinkwassergrenze (250 mg Cl⁻/l):

blau: Anfangszustand

weiß: Szenario 1.45 mit moderater Förderung

pink: Szenario 1.85 mit erhöhter Förderung

Punkte: Förderbrunnen der 3 WGA

Tab. 5 Abstand der Trinkwassergrenze zum nächstgelegenen Brunnen der WGA Sandelermöns

Kürzester Abstand der Trinkwassergrenze zur WGA Sandelermöns [m]						
Jahr	2017			2100		
Tiefe	10 m	60 m	100 m	10 m	60 m	100 m
A 1.5, 1.45	4999	4425	3842	3727	3664	3099
A 1.5, 3.45	4999	4425	3842	3736	3669	3096
A 1.5, 5.45	4999	4425	3842	3852	3717	3019
A 1.5, 1.85	4999	4425	3842	3708	3661	3109
A 1.5, 3.85	4999	4425	3842	3689	3650	3111
A 1.5, 5.85	4999	4425	3842	3709	3659	3096
A 1.4, 1.45	4999	4425	3842	5006	3722	2864
A 1.4, 3.45	4999	4425	3842	5006	3751	2846
A 1.4, 5.45	4999	4425	3842	5008	3533	2644
A 1.4, 1.85	4999	4425	3842	4420	3712	2944
A 1.4, 3.85	4999	4425	3842	3792	3664	2884
A 1.4, 5.85	4999	4425	3842	5005	3709	2861

In Abb. 9 und Abb. 10 sind die Wasserbilanzen für alle Szenarien zusammengestellt. Dabei beschreibt die schwarze Kurve die den sechs Klimaszenarien entsprechende, aus den Simulationen mit PANTA RHEI übernommene Grundwasserneubildung, die blaue Kurve die auf den beiden Wasserbedarfsszenarien basierende Wasserentnahme durch die Förderbrunnen, die grüne Kurve die von d^{3f}++ berechnete Entwässerung durch die Vorfluter, die pinkfarbene Kurve die Summe von ein- und Ausstrom vom Meer und die rote Kurve die Änderung des gesamten Grundwasservolumens im Gebiet von 2017 bis 2100.

Die Grundwasserneubildung und die Entnahmeraten der Förderbrunnen folgen dem Trend des entsprechenden Szenarios. Die dargestellten Kurven für die In- bzw. Exfiltration über die Vorfluter und die Volumenänderung im Gebiet spiegeln deutlich die Szenarien und die jahreszeitbedingten Schwankungen der Grundwasserneubildung wider. In der Entwässerung durch die Vorfluter lässt sich auch ein Trend erkennen, der dem jeweiligen Entnahmeszenario entspricht. Die Szenarien 1.85, 3.85 und 5.85 gehen von einem Anstieg des Meeresspiegels von 1 m bis zum Jahr 2100 aus, bei 1.45, 3.45 und 5.45 sind es nur 0.5 m. Es ist deutlich erkennbar, dass ein stärkerer Anstieg des Meeresspiegels eine Zunahme des unterirdischen Zustroms von Meerwasser und einen weiteren Anstieg der Entwässerung durch die Vorfluter verursacht.

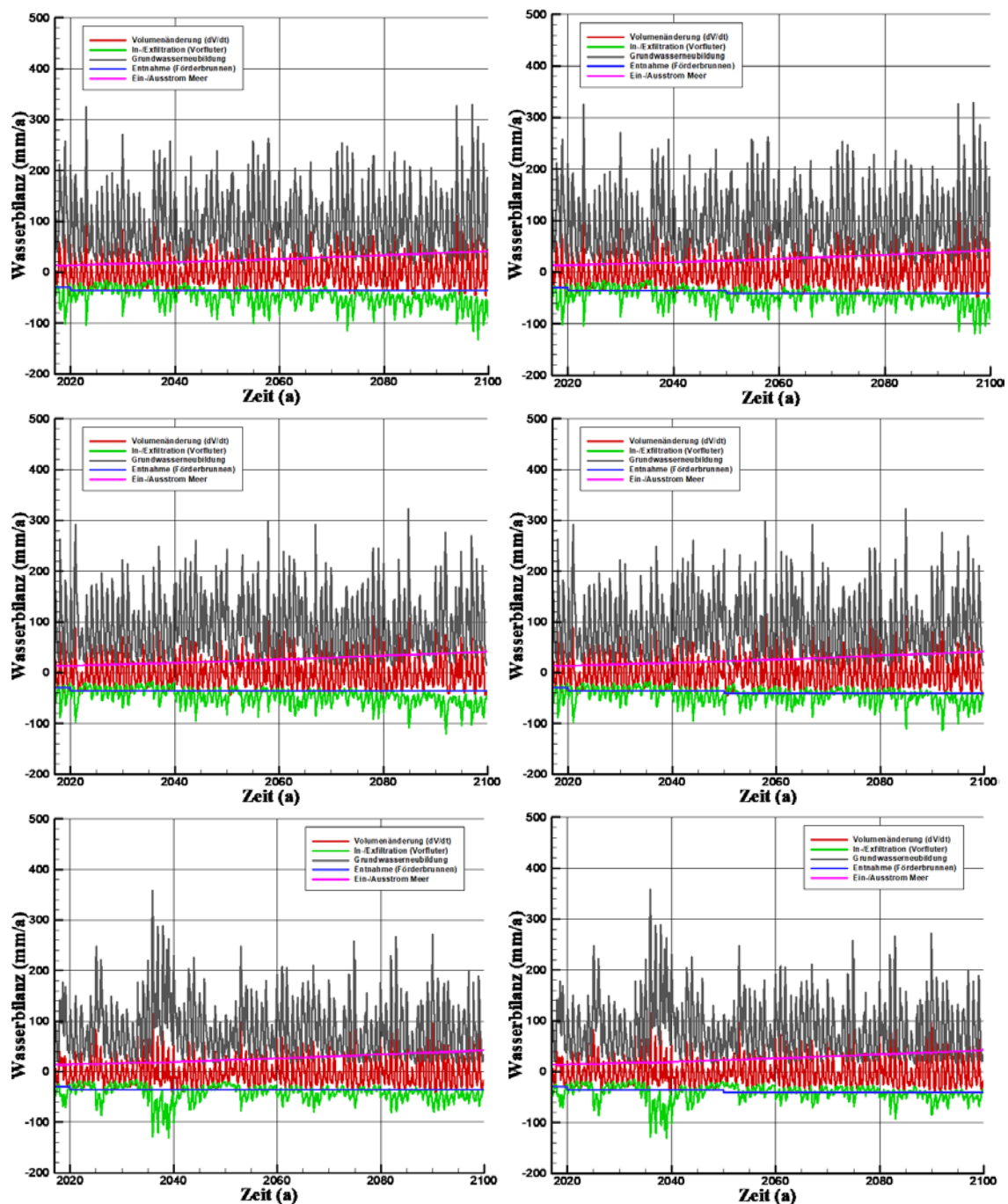


Abb. 9 Wasserbilanzen für das RCP-Szenario 4.5, Varianten 1, 3 und 5 mit der moderat erhöhten Trinkwasserförderung (links) und der höheren Trinkwasserförderung (rechts): Grundwasserneubildung, Wasserentnahme durch die Förderbrunnen, In- bzw. Exfiltration durch die Vorfluter und Änderung des Gesamtvolumens

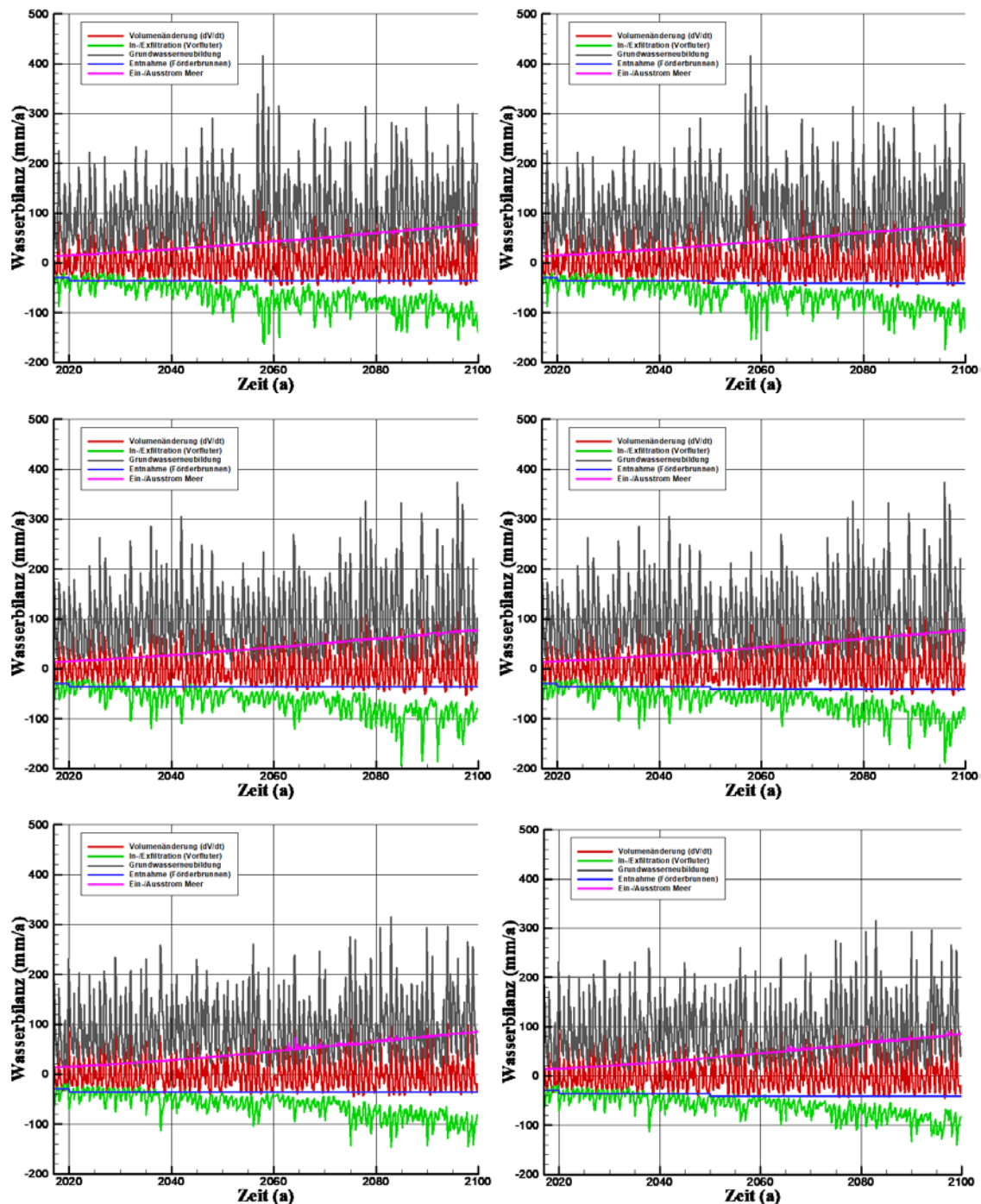


Abb. 10 Wasserbilanzen für das RCP-Szenario 8.5, Varianten 1, 3 und 5 mit der moderat erhöhten Trinkwasserversorgung (links) und der höheren Trinkwasserversorgung (rechts): Grundwasserneubildung, Wasserentnahme durch die Förderbrunnen, In- bzw. Exfiltration durch die Vorfluter und Änderung des Gesamtvolumens

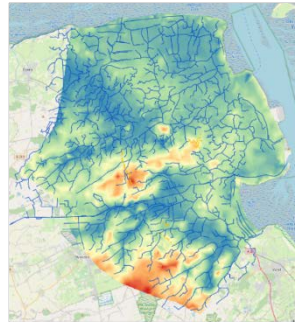
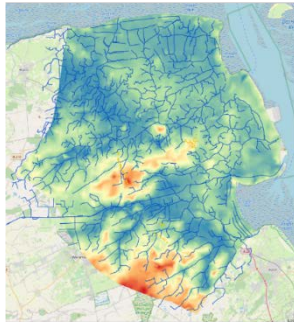
Aus den zeitabhängigen Resultaten für die Grundwasserstände und die Chloridkonzentrationen werden mit Hilfe des Tools CAMup die gemeinsam mit den Verbundpartnern

definierten Indikatoren (s. Tab. 3) für jeweils zwei Zeiträume berechnet und zur Auswertung in das CAM-Tool eingespeist. Es waren 240 Indikatorraster zu berechnen. Einige dieser Indikatoren sind in Abb. 11 bis Abb. 13 beispielhaft für zwei Szenarien dargestellt.

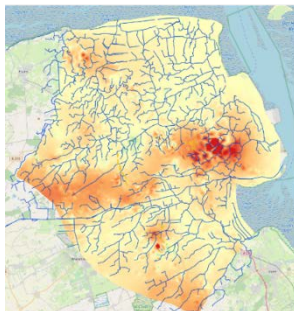
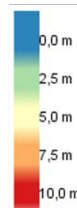
Szenario 1.45, geringere Förderraten

2021-2050

2071-2100



Grundwasser
-flurabstand
Mittelwert



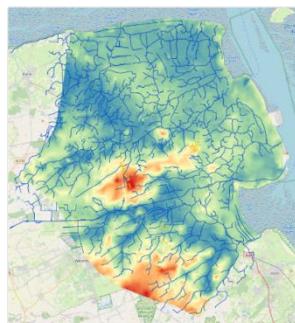
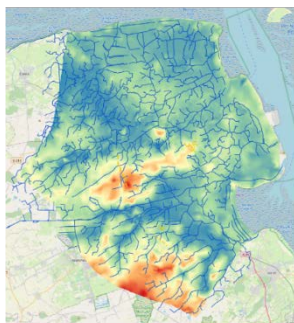
Grundwasser
-flurabstand
Trend



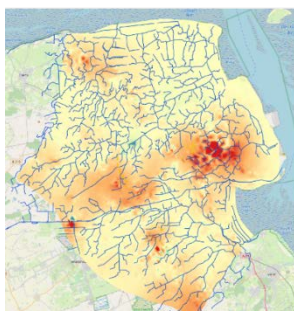
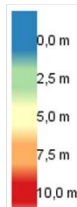
Szenario 1.85, höhere Förderraten

2021-2050

2071-2100



Grundwasser
-flurabstand
Mittelwert



Grundwasser
-flurabstand
Trend



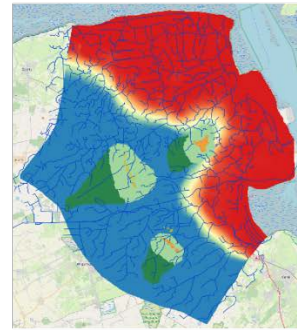
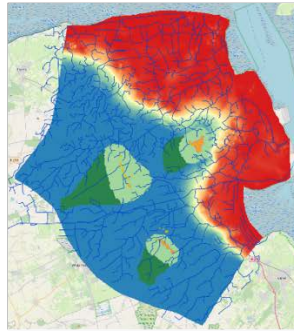
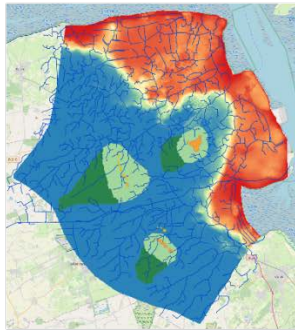
Abb. 11 Indikatoren für den Grundwasserflurabstand im CAM für ein gemäßigtes Szenario und ein trockenes Szenario mit höherer Wasserförderung

Szenario 1.45, geringere Förderraten

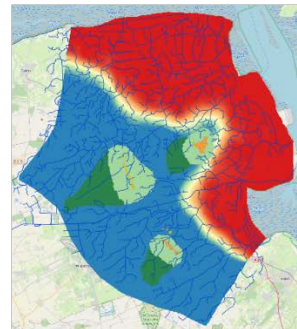
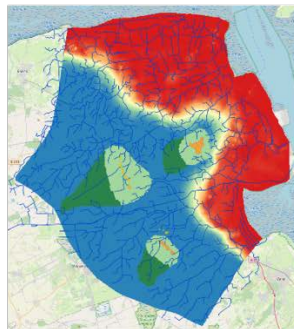
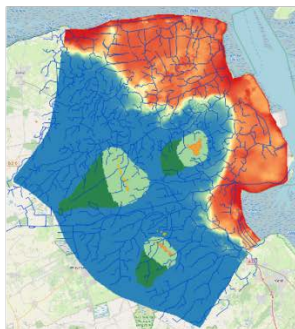
-10 m NN

-60 m NN

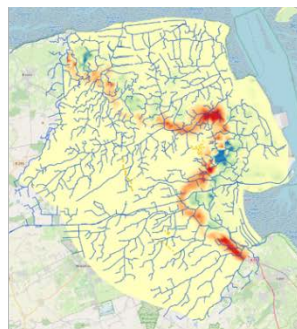
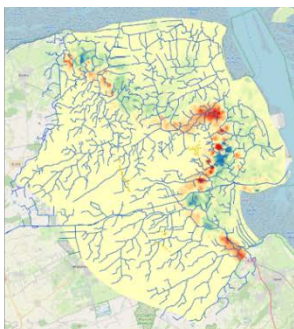
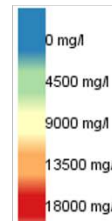
-100 m NN



Chloridgehalt
Mittelwert
2021-2050



Chloridgehalt
Mittelwert
2071-2100



Chloridgehalt
Trend
2021-2050



Chloridgehalt
Trend
2071-2100

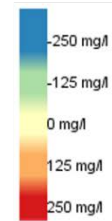


Abb. 12 Indikatoren für den Chloridgehalt im CAM, RCP-Szenario 4.5, Variante 1, Förderraten des Wasserwerkes Sandelermöns bis zu 15 Mio. m³/a

Szenario 1.85, höhere Förderraten
-10 m NN -60 m NN -100 m NN

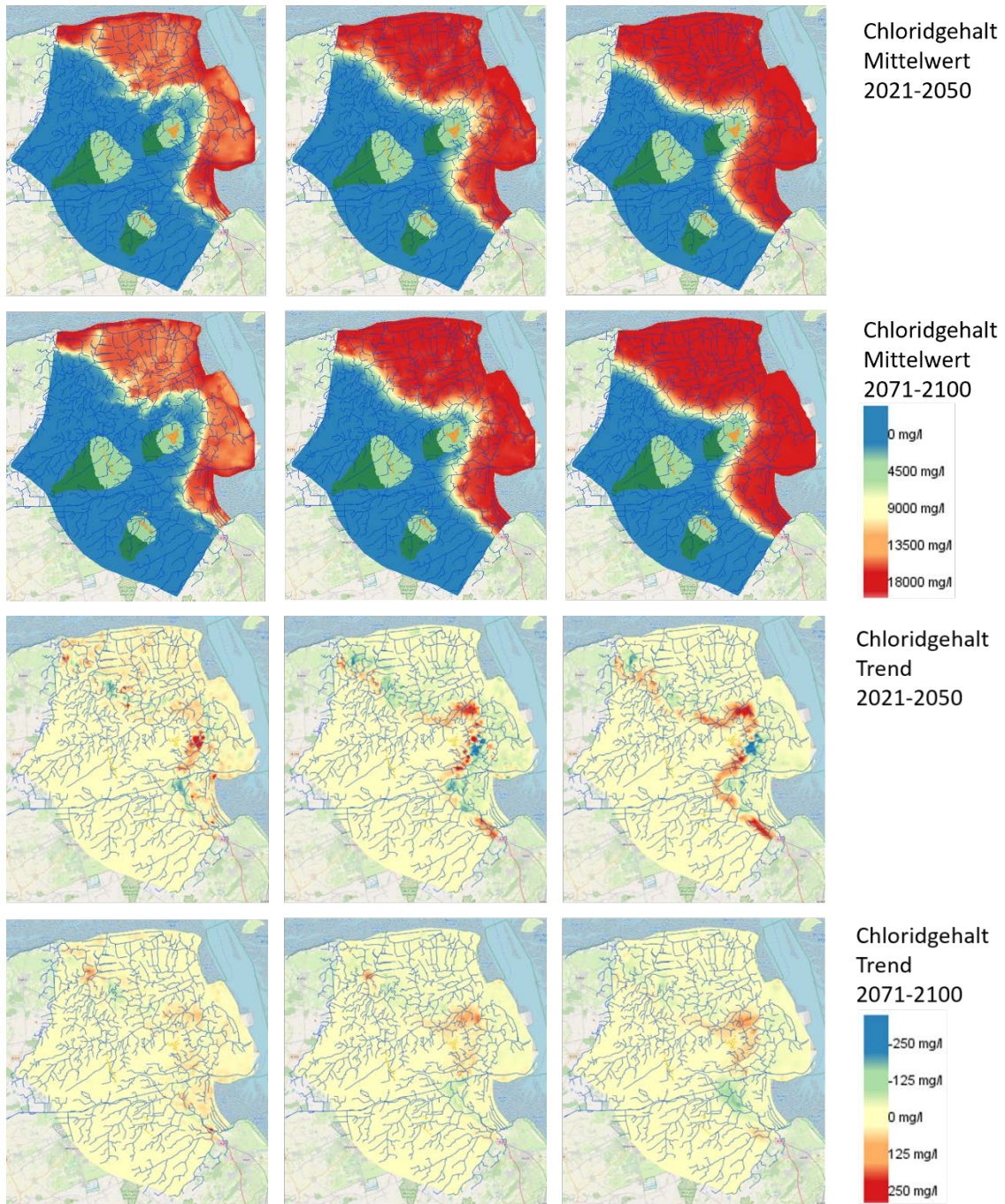


Abb. 13 Indikatoren für den Chloridgehalt im CAM, RCP-Szenario 8.5, Variante 1, Förderraten des Wasserwerkes Sandelermöns bis zu 20 Mio. m³/a

In den Resultaten für die Grundwasserflurabstände zeigen sich für alle Szenarien nur Änderungen im Zentimeter-Bereich. Auffällig ist, dass sich die Änderungen, insbesondere signifikante Trends, vor allem im ersten Untersuchungszeitraum, 2021-2050, ergeben. In diesem Zeitraum steigt die Wasserförderung des Wasserwerkes Sandelermöns von rund 8 Mio. m³/a auf 15 Mio. m³/a an. Für den zweiten Untersuchungszeitraum,

2071-2100, werden auch bei einer erneuten Erhöhung der Wasserförderung auf 20 Mio. m³/a nur noch geringe Änderungen prognostiziert.

Die Verteilung der Chloridkonzentration bzw. der Trend der Konzentration werden in 3 verschiedenen Tiefen zu NN ausgewertet. Sowohl für 10 m, 60 m als auch 100 m NN werden Veränderungen über den gesamten Modellierungszeitraum hinweg prognostiziert, aber auch hier sind die Änderungen im Zeitraum 2021-2050 stärker als für 2071 bis 2100. Insbesondere für größere Tiefen weist das RCP-Szenario 8.5 deutlich stärkere Veränderungen auf als Szenario 4.5. Dies ist bereits für den Zeitraum 2021-2050 deutlich sichtbar, obwohl sich die Grundwasserförderung in den beiden hier dargestellten Szenarien erst ab 2050 unterscheidet. Das für die verschiedenen Szenarien für die beiden Prognosezeiträume berechnete Trinkwasserdargebot ist in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6 Verfügbares Trinkwasserdargebot für die einzelnen Szenarien

Nr.	Klima-szenario	Förder-szenario	Trinkwasserdargebot [Mio. m³]		
			2017	2050	2100
A1.5, 1.45	RCP 4.5, GWN 1	moderat	13 687	13 011	12 436
A1.4, 1.45		+Erh. 2050	13 687	13 011	12 419
A1.5, 1.85	RCP 8.5, GWN 1	moderat	13 687	13 027	12 412
A1.4, 1.85		+Erh. 2050	13 687	13 027	12 411
A1.5, 3.45	RCP 4.5, GWN 3	moderat	13 687	13 687	12 402
A1.4, 3.45		+Erh. 2050	13 687	13 687	12 380
A1.5, 3.85	RCP 8.5, GWN 3	moderat	13 687	13 026	12 403
A1.4, 3.85		+Erh. 2050	13 687	13 026	12 384
A1.5, 5.45	RCP 4.5, GWN 5	Moderat	13 687	12 981	12 396
A1.4, 5.45		+Erh. 2050	13 687	12 981	12 360
A1.5, 5.85	RCP 8.5, GWN 5	Moderat	13 687	13 003	12 412
A1.4, 5.85		+Erh. 2050	13 687	13 003	12 392

Über alle Szenarien und Varianten für die Grundwasserneubildung hinweg wird deutlich sichtbar, dass Schwankungen in der Grundwasserneubildung sowie Änderungen der Wasserförderung jeweils weitgehend durch eine veränderte Exfiltration durch die Vorfluter kompensiert werden und nicht zu wesentlichen Veränderungen des Gesamt-Wasservolumens im Gebiet führen. Besonders deutlich wird das für die Szenarien mit einer ab 2050 nochmals signifikant erhöhten Wasserförderung bei relativ niedriger Grundwasserneubildung. Um die Belastbarkeit der Aussagen zu erhöhen, ist eine Verbesserung der

Datenlage bzgl. der Vorfluter, insbesondere ein vollständiges Monitoring der aktiven Entwässerung durch die Siel- und Schöpfwerkstätigkeiten notwendig.

Eine Zunahme des Einstroms vom Meer wird hauptsächlich durch den Meeresspiegelanstieg verursacht. Ein Einfluss dieses Einstroms auf die Lage der Süß-/Salzwassergrenze lässt sich im Prognosezeitraum jedoch nicht feststellen. Die Auswirkungen auf die Salzkonzentration bleiben auf den Bereich in unmittelbarer Nähe der Küstenlinie beschränkt.

Die simulierten Salzverteilungen in der Modellregion Sandelermöns sind nachvollziehbar und stabil. Es kann festgehalten werden, dass die WGA Sandelermöns deutlich außerhalb der möglichen Verschiebungen der Süß-/Salzwasser-Grenze bis zum Jahr 2100 liegt. Das gilt selbst bei einer angenommenen Erhöhung der Entnahmemenge auf 20 Mio. m³/Jahr. Eine starke Beeinflussung der Lage der Süß-/Salzwassergrenze durch die Wassergewinnung in Sandelermöns liegt im Prognosezeitraum nicht vor. Der Grund hierfür ist einerseits die Lage des Gewinnungsgebietes auf der etwas höher gelegenen Geest mit einem ausreichend hohen Zustrom aus dem Geestgebiet, bis zu der die Süß-/Salzwasser-Grenze in den betrachteten Szenarien nicht vordringen kann, und andererseits der sehr viel größere Einfluss der Grundwasserneubildung und der Siel- und Schöpftätigkeiten im gesamten Marschgebiet auf den Gesamtwasserhaushalt. Für den Bereich der bereits heute sehr nahe an der Trinkwassergrenze liegenden WGA Feldhausen legen die Simulationsergebnisse ein engmaschiges Monitoring der Chlorid-Werte nahe.

1.5. Arbeitsregion 1, norddeutscher Küstenraum, Modell Großenkneten

1.5.1. Problemstellung

Die Modellregion Großenkneten liegt in einer eiszeitlich geprägten Geestlandschaft im Norddeutschen Tiefland, südlich der Region Sandelermöns. Rund 70 % des Gebietes werden landwirtschaftlich genutzt.

Das Wasserwerk Großenkneten mit den Fassungen Baumweg, Sage und Hagel gehört zum Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverband (OOWV). Die Einzugsgebiete der drei WGA sind vor allem durch den Eintrag von Nitrat durch die landwirtschaftliche Nutzung gefährdet.

Für das Modellgebiet Großenkneten wurde durch den OOWV (TV 3) in Zusammenarbeit mit Insight (TV 6) das geologische Modell erstellt. Die sonstigen für die Modellierung notwendigen hydrogeologischen Daten wurden von den Projektpartnern NLWKN (TV 4) und OOWV zur Verfügung gestellt. Die flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsraten für den historischen Zeitraum 1970-2016 sowie die Klimaszenarien im Prognosezeitraum 1917-2100 wurden vom LWI der TU BS (TV 1) zur Verfügung gestellt.

Anhand der vorliegenden Daten für die Grundwasserstände war das Modell zu kalibrieren. Im Anschluss erfolgte ein Kontroll-Rechenlauf für den historischen Zeitraum von 1940 bis 2016. Darauf aufbauend waren sechs Prognoserechnungen bis zum Jahr 2100 gemäß den in Tab. 2 aufgeführten Klimaszenarien durchzuführen.

Die letzte Aufgabenstellung bestand darin, aus den Modellergebnissen zuvor definierte Indikatoren abzuleiten und entsprechende Indikatorraster zu errechnen, um diese in das im TV 7 entwickelte MCDA-Tool CAM zu exportieren und somit zur Bewertung durch die Akteure zur Verfügung zu stellen.

1.5.2. Hydrogeologisches Modell

Das Modellgebiet für das Grundwassermodell wurde anhand von vorläufigen Grundwassergleichenplänen aus dem TV 3 festgelegt. Es hat eine Fläche von 523 km² und umfasst die Einzugsgebiete der Wassergewinnungsanlagen Baumweg, Sage und Hagel des Wasserwerks Großenkneten. Die Geländehöhen liegen zwischen 60 m im Süden und 10 m im Norden des Modellgebietes. Abb. 14 zeigt das Modellgebiet mit den Grundwassergleichen und den Förderbrunnen des OOWV der Fassungen Baumweg, Sage und Hagel (v.l.n.r.). Die entsprechenden Wasserschutzgebiete sind grau dargestellt.

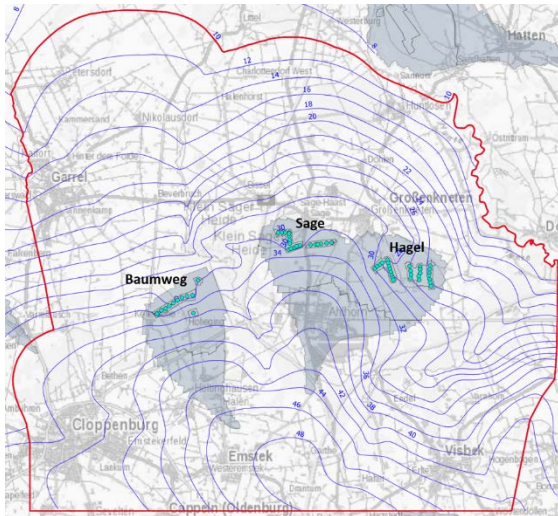


Abb. 14 Modellgebiet Großenkneten mit Grundwassergleichen (blau), Förderbrunnen der Wassergewinnungsanlagen (türkis) und Wasserschutzgebieten (grau)

Die Modellgrenzen im Westen und Osten des Gebietes wurden weitgehend senkrecht zu den (vorläufigen) Grundwassergleichen gewählt, so dass diese Ränder bis auf einen kleinen Teil des westlichen Randes als geschlossen betrachtet werden können. Im Südwesten und im Norden war es leider nicht möglich, natürliche hydrogeologische Gegebenheiten zu finden, die eine Abgrenzung mit einer einfachen Wahl der Randbedingungen erlauben. Dort wurden die Grenzen auf die Grundwassergleichen gelegt. Um mit der südlichen Modellgrenze nicht zu nahe an die Wassereinzugsgebiete der Förderbrunnen heranzukommen, wurde eine gerade Grenze ein Stück weiter südlich definiert. Für eine sinnvolle Druck-Randbedingung musste hier gemäß den Grundwassergleichen interpoliert werden, s. Abb. 14.

Auf Basis der geologischen Strukturdaten wurden mit Hilfe des Präprozessors von d³f++, ProMesh, ein hydrogeologisches 3d Modell aufgebaut (s. Abb. 15), in dem fünf hydrogeologische Einheiten unterschieden werden. Die 60 Förderbrunnen der drei Wassergewinnungsanlagen des OOWV sowie 97 private Brunnen und die Haupt-Vorfluter wurden in das Modell integriert.

Abb. 15 zeigt das Grundwassermodell mit den unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten und dem Vorfluternetz. Als Startwerte für die Permeabilitäten und Porositäten der einzelnen hydrogeologischen Einheiten wurden jeweils konstante Werte aus der Literatur verwendet.

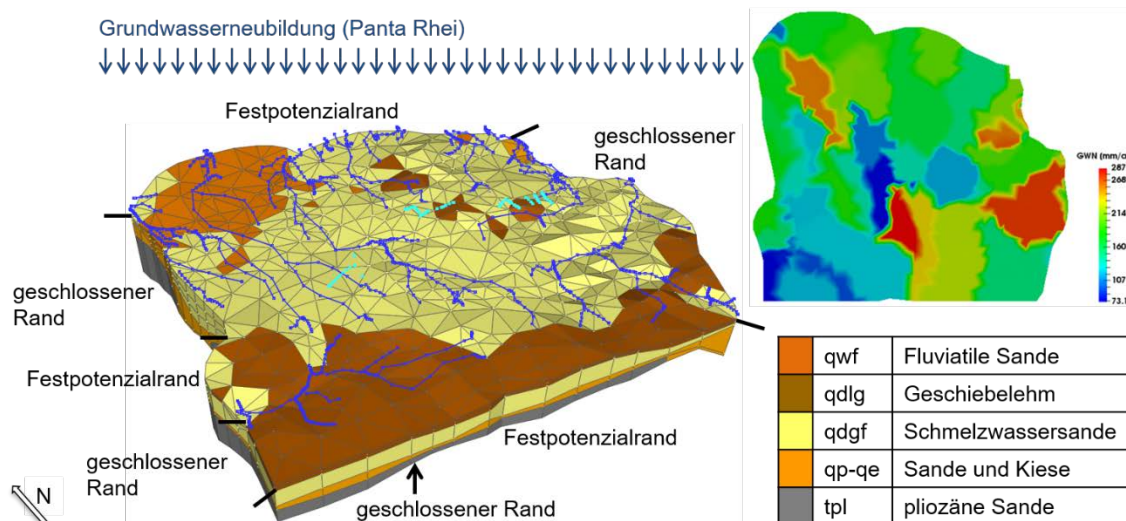


Abb. 15 Großenkneten, hydrogeologisches Modell mit Randbedingungen, 30fach überhöht; rechts oben: flächendifferenzierte Grundwasserneubildung als Ergebnis von PANTA RHEI (TP 1)

Als Randbedingung für die Grundwasserneubildung wurden die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells (TV 1) verwendet. Das Grundwassermodell wurde anhand dieser Daten kalibriert. Zunächst wurde mit einer stationären Grundwasserneubildung gearbeitet. Dafür wurde der Durchschnittswert des Jahres 2015 benutzt. Bei der Kalibrierung wurden sowohl die Permeabilitäten als auch die Wasserstände der Vorflutervariiert. Tab. 7 zeigt die Permeabilitäten der unterschiedenen hydrogeologischen Einheiten im Ergebnis der Kalibrierung. Abb. 16 zeigt Vergleiche der berechneten Grundwasserstände mit den Werten in 409 Messstellen als Ergebnisse der Kalibrierung. Der Nash-Sutcliffe-Koeffizient liegt bei 0.957. In Abb. 17 ist die berechnete Lage der Grundwasseroberfläche als Ergebnis der Modellkalibrierung dargestellt.

Tab. 7 Permeabilitäten im Ergebnis der Modellkalibrierung

	Einheit	Permeabilität [m²]		Porosität [-]
		Startwert	Kalibrierung	
	qw: fluviatile Sande	$8 \cdot 10^{-12}$	$2.0 \cdot 10^{-12} - 3.2 \cdot 10^{-11}$	0.2
	qdl: Geschiebelehm	$1 \cdot 10^{-12}$	$2.0 \cdot 10^{-12} - 3.2 \cdot 10^{-11}$	0.1
	qdg: Schmelzwassersande	$1 \cdot 10^{-11}$	$2.0 \cdot 10^{-12} - 3.2 \cdot 10^{-11}$	0.15
	qp-qe: Sande und Kiese	$3 \cdot 10^{-11}$	$1.4 \cdot 10^{-12} - 6.5 \cdot 10^{-11}$	0.2
	tpl: pliozäne Sande	$5 \cdot 10^{-12}$	$2.9 \cdot 10^{-12} - 2.2 \cdot 10^{-11}$	0.1

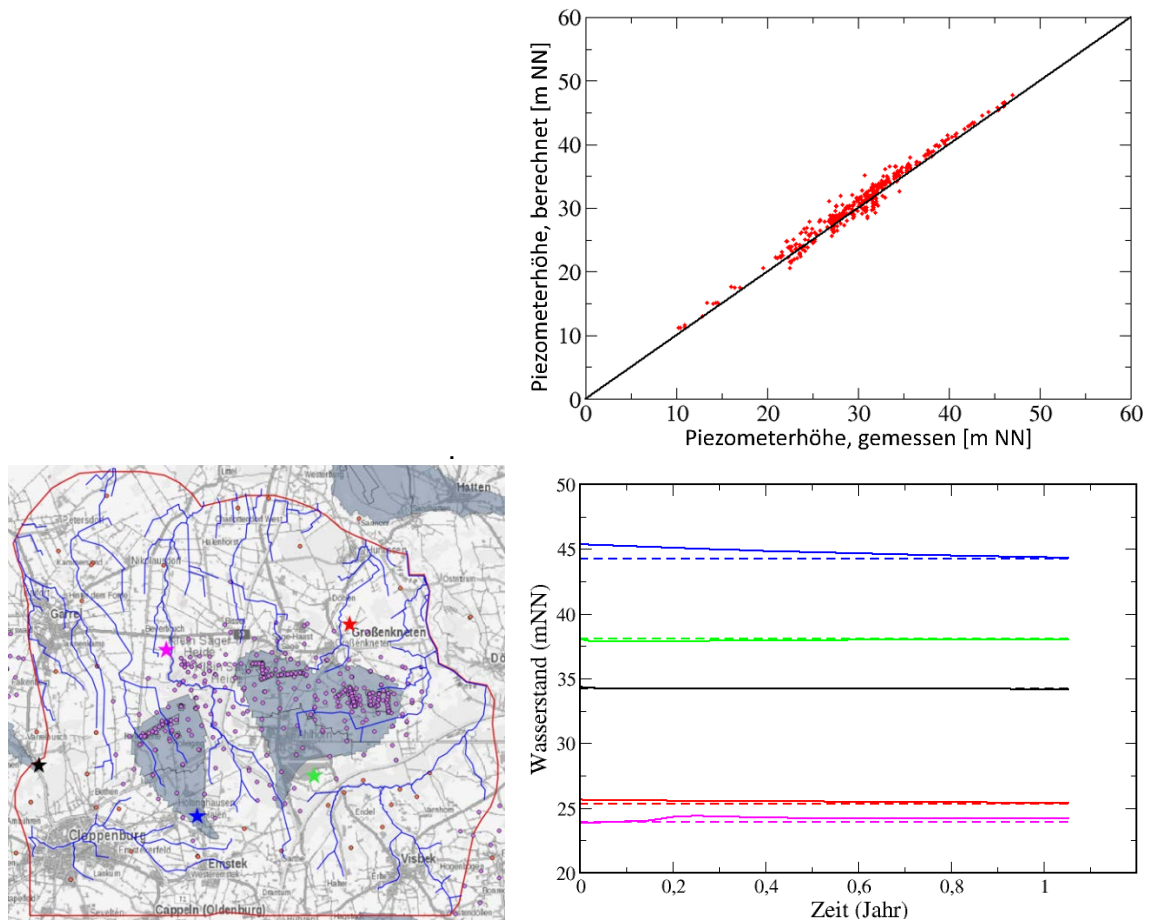


Abb. 16 oben: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserständen; unten: Zeitliche Entwicklung der berechneten Grundwasserstände gegenüber den Messwerten (gestrichelte Linien) an fünf ausgewählten Messstellen

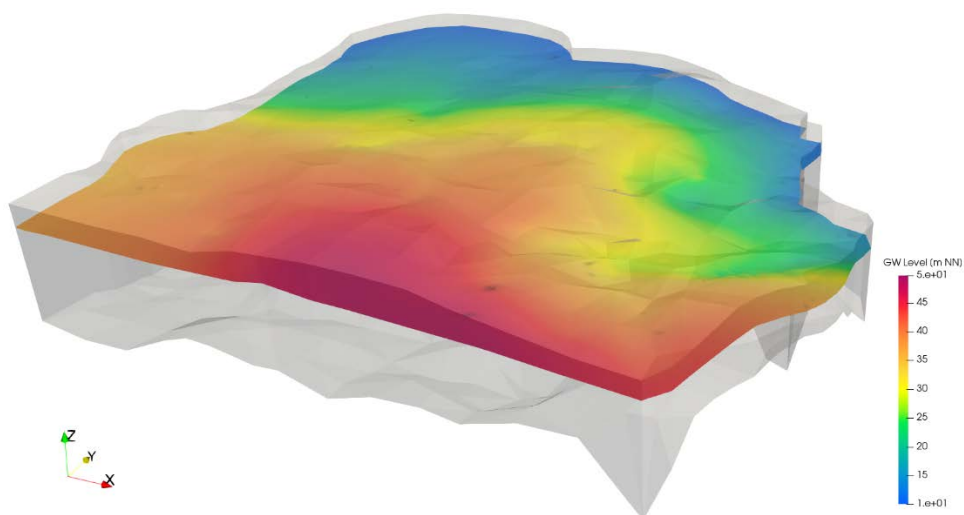


Abb. 17 Lage der Grundwasseroberfläche im Modell als Ergebnis der Kalibrierung (50fach überhöhte Darstellung)

1.5.3. Ergebnisse

Im zweiten Schritt, vor der Simulation der Szenarien, wurde der Kalibrierung die zeitabhängige Grundwasserneubildung von 1940 bis 2016 zugrunde gelegt. Für die Simulation wurden zeitabhängige Werte für die Grundwasserförderung der Wassergewinnungsanlagen benutzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die WGA Hagel seit 1970, die WGA Sage seit 1973 und die WGA Baumweg erst seit 1976 Wasser fördert. Für die übrigen, privaten Förderbrunnen wurden konstante Werte eingesetzt, da keine zeitabhängigen Daten vorliegen. Es wurden mehrere Simulationen des historischen Zeitraumes durchgeführt, um das Kalibrierungsergebnis zu optimieren und abzusichern.

Für das Modellgebiet Großenkneten werden Grundwasserströmung und Nitrattransport für die IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 mit jeweils drei Varianten der Grundwasserneubildung berechnet, s. Tab. 2. Da keine Wasserbedarfsszenarien vorliegen, wird die Grundwasserförderung für die Szenarien als konstant angenommen. Abb. 18 zeigt die Wasserbilanzen für die drei Varianten der beiden RCP-Klimaszenarien. Dabei beschreibt die schwarze Kurve die den sechs Klimaszenarien entsprechende, aus den Simulationen mit PANTA RHEI übernommene Grundwasserneubildung, die blaue Kurve die Wasserentnahme durch die Förderbrunnen, die grüne Kurve die von d^{3f++} berechnete Entwässerung durch die Vorfluter, die pinkfarbene Kurve die Summe von ein- und Ausstrom vom Meer und die rote Kurve die Änderung des gesamten Grundwasservolumens im Gebiet von 2017 bis 2100.

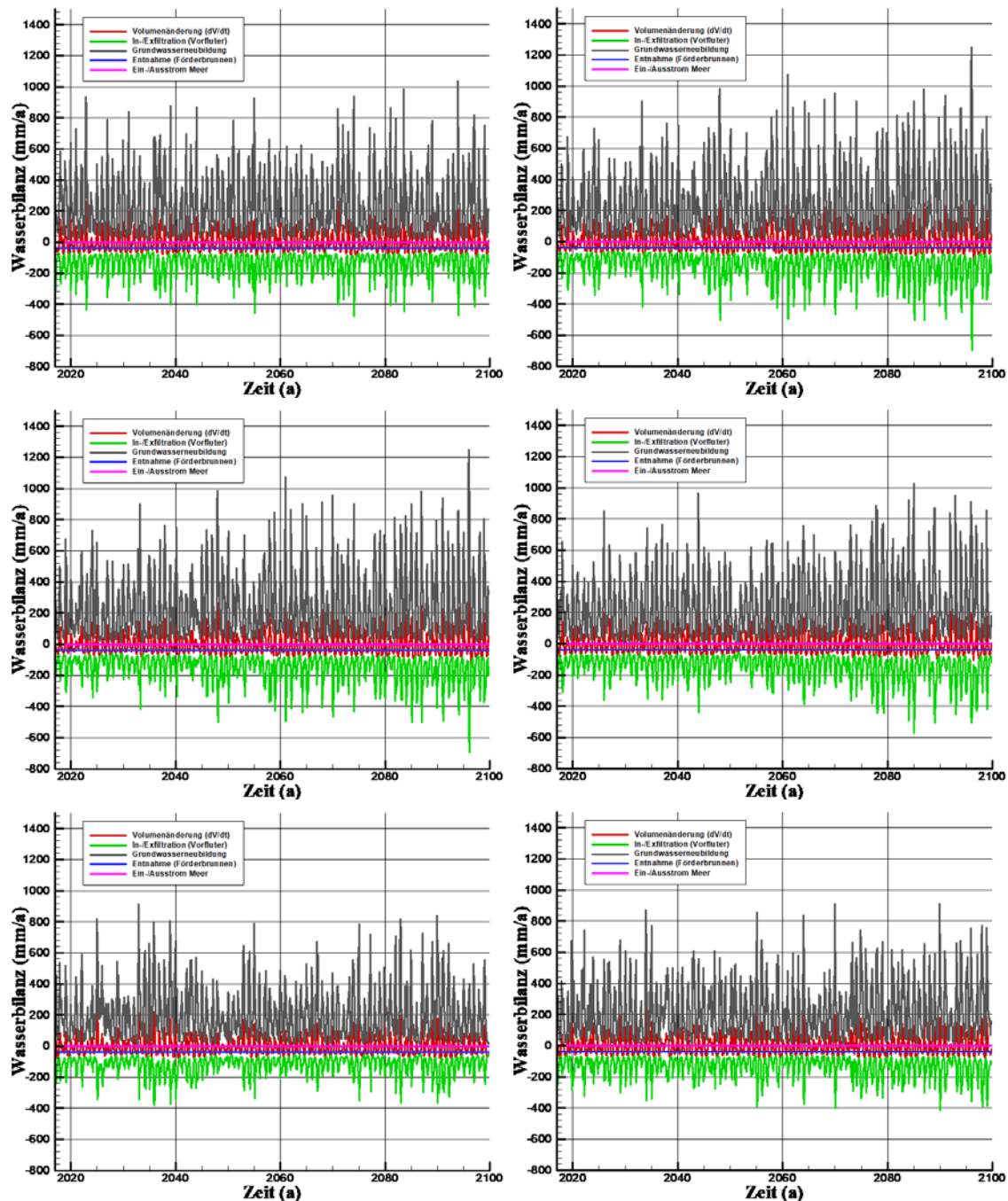


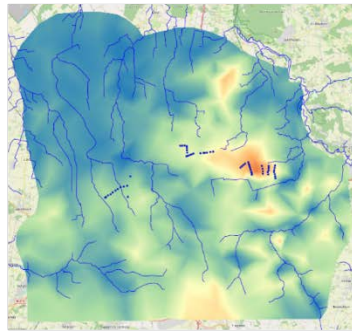
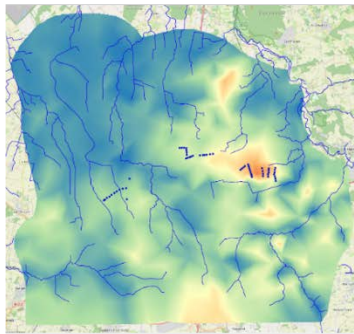
Abb. 18 Wasserbilanz für das IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 (links) und 8.5 (rechts), Variante 1, 3 und 5 (von oben nach unten), für den Zeitraum 2017-2100.

Aus den zeitabhängigen Resultaten für die Grundwasserstände wurden die entsprechenden Indikatoren für das CAM berechnet. Abb. 19 zeigt beispielhaft die Indikatoren Grundwasserflurabstand und Trend des Grundwasserflurabstandes für die Szenarien 1.45 und 1.85. Der Einfluss der Klimaszenarien auf diesen Indikator erweist sich als sehr gering.

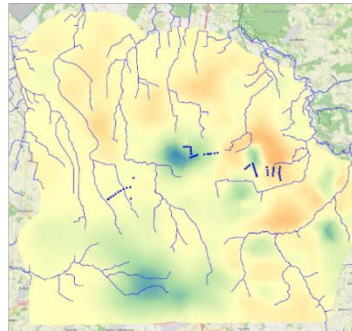
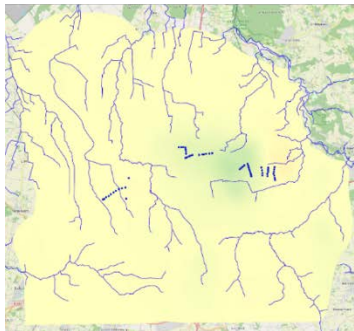
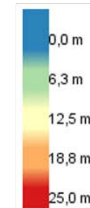
RCP-Szenario 4.5, Variante 1

2021-2050

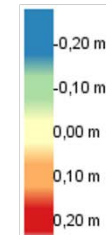
2071-2100



Grundwasser
-flurabstand
Mittelwert



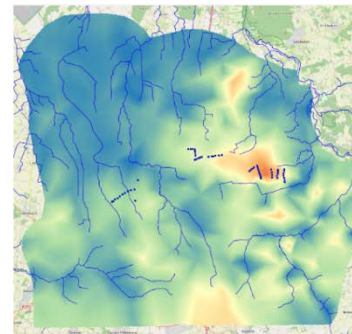
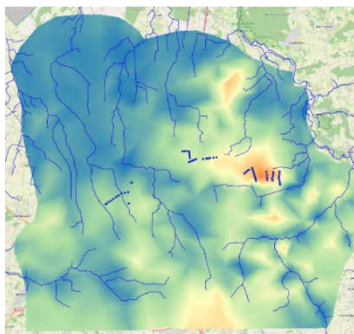
Grundwasser
-flurabstand
Trend



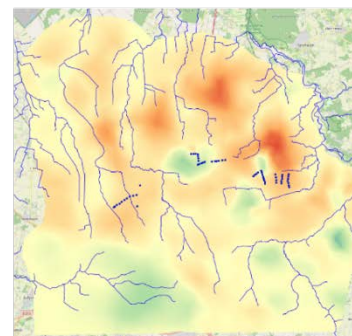
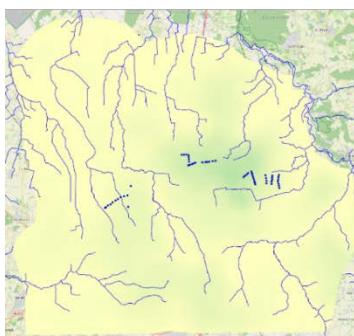
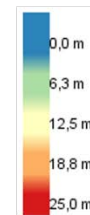
RCP-Szenario 8.5, Variante 1

2021-2050

2071-2100



Grundwasser
-flurabstand
Mittelwert



Grundwasser
-flurabstand
Trend

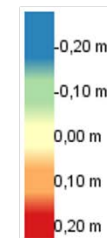


Abb. 19 Indikatoren für den Grundwasserflurabstand im CAM für die Klimaszenarien 1.45 und 1.85

In Zusammenarbeit mit den Teilvorhaben TV 3 (OOWV), TV 4 (NLWKN) und TV 1 (HYWAG) wurde ein Konzept für einen flächenhaften Stickstoffeintrag über den oberen Modellrand in die gesättigte Zone erstellt. Aufgrund der Datenlage wird der Eintrag von Stickstoff lediglich nach der Landnutzung differenziert. Dabei wird unterschieden zwischen Ackerland, Grünland und Wald. Für alle anderen Landnutzungen (Siedlungsflächen etc.) wird angenommen, dass kein Stickstoff eingetragen wird. Abb. 20 verdeutlicht den großflächigen, flächendifferenzierten Stoffeintrag. Im TV 3 wurden jeweils zeitabhängige Werte für den Stickstoffeintrag ermittelt. Für Ackerland wird ein Stickstoff-Eintrag von etwa 60 kg/ha angenommen, für Wald etwa 12 kg/ha und für Grünland etwa 50 kg/ha, wobei die Werte jeweils von 1970 bis 1990 stark ansteigen und bis 2000 wieder auf die angegebenen Werte fallen (s. Tab. 8). Für die Simulation der Szenarien wurde ein gleichbleibender Stoffeintrag angesetzt. Eine entsprechende, flächenhafte, zeitabhängige Quelle wurde in d³f++ implementiert.

Tab. 8 Angenommener Stickstoffeintrag für den historischen Zeitraum 1940-2016 für die einzelnen Nutzungsarten; Quelle: OOWV/IWW

	Stickstoffeintrag [kg /ha a]						
Jahr	Acker	Wald	Grünland	Jahr	Acker	Wald	Grünland
1940	15.00	9.00	15	1980	117.50	16.80	76.33
1942	17.50	9.30	16	1982	116.50	17.28	81.47
1944	20.00	9.60	17	1984	115.50	17.76	86.6
1946	22.50	9.90	18	1986	101.00	18.24	91.73
1948	25.00	10.20	19	1988	73.00	18.72	96.87
1950	27.50	10.50	20	1990	45.00	19.20	102
1952	34.90	10.80	21	1992	45.00	17.76	91.6
1954	42.30	11.10	22	1994	45.00	16.32	81.2
1956	49.70	11.40	23	1996	45.00	14.88	70.8
1958	57.10	11.70	24	1998	45.00	13.44	60.4
1960	64.50	12.00	25	2000	45.00	12.00	50
1962	71.90	12.48	30.13	2002	45.00	12.00	50
1964	79.30	12.96	35.27	2004	45.00	12.00	50
1966	86.70	13.44	40.4	2006	45.00	12.00	50
1968	94.10	13.92	45.53	2008	45.00	12.00	50
1970	101.50	14.40	50.67	2010	45.00	12.00	50

1972	108.90	14.88	55.8	2012	45.00	12.00	50
1974	116.30	15.36	60.93	2014	45.00	12.00	50
1976	119.50	15.84	66.07	2016	45.00	12.00	50
1978	118.50	16.32	71.2				

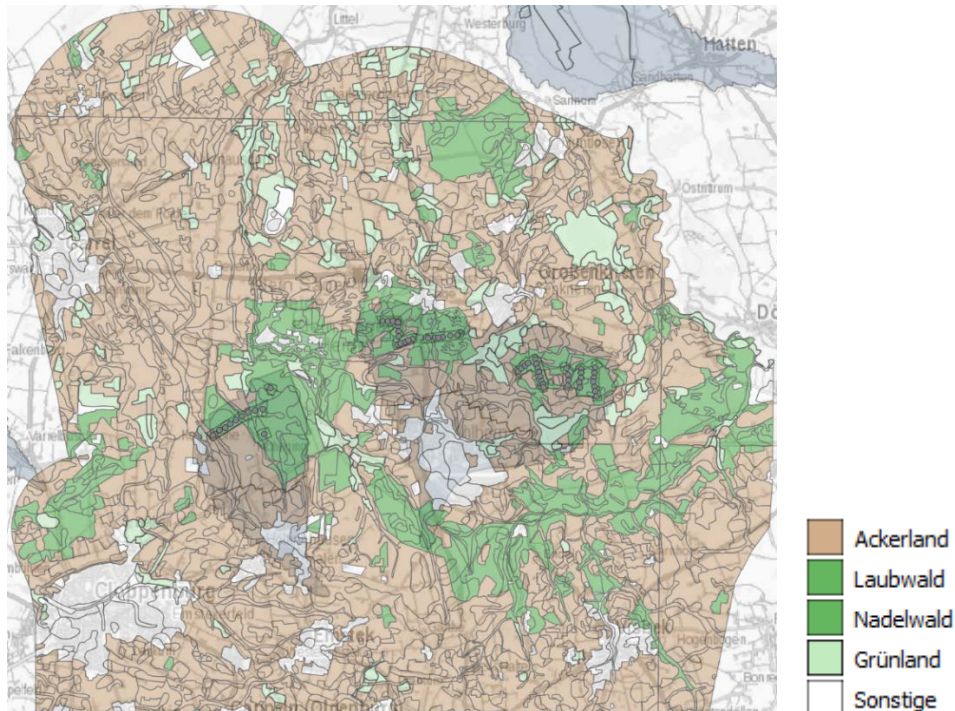


Abb. 20 Nitrateintrag über den oberen Modellrand in Abhängigkeit von der Bodennutzung (grau: Förderbrunnen der WGA); Quelle: NLWKN

Für den Beginn der Modellierung (1940) wird von einer Stickstoffkonzentration von Null im Grundwasser ausgegangen. Da es sich im Modellgebiet überwiegend um sandige Aquifere handelt, wird der Stickstoff als nicht sorbierender Tracer behandelt.

Basierend auf den in TV 3 gewonnenen Erkenntnissen wird davon ausgegangen, dass oberhalb von etwa 10 m NN oxidierende Verhältnisse vorherrschen und demzufolge keine Denitrifikation stattfindet. Unterhalb 10 m NN erfolgt der Abbau von Stickstoff zum einen durch Pyrit (Eisen-Disulfid, FeS_2) bzw. in der Umgebung der WGA Sage, wo in Bohrungen kein Pyrit angetroffen worden ist, durch den gelösten organischen Kohlenstoff (DOC). Leider ist die Pyritverteilung im Modellgebiet nicht ausreichend bekannt. Es wird angenommen, dass sie hauptsächlich in der qp-qe-Schicht (s. Abb. 15) anzutreffen sind /ESC 13/.

In einem großräumigem Grundwassermodell sind detaillierte chemische Reaktionen nicht mit vertretbarem Rechenaufwand abbildbar, es werden vereinfachte, modellhafte Ansätze verfolgt. Für das Modell Großenkneten wurde ein flächendeckender Stickstoff-Abbau in der qp-qe-Formation in einer Tiefe zwischen 10 m und -10 m NN angenommen. Der Verbrauch von FeS_2 und DOC wurde dabei vernachlässigt. Die Kalibrierung des Transportmodells erfolgte anhand der Stickstoff-Konzentrationen im Rohwasser der Förderbrunnen des OOWV und in den Messstellen des NLWKN, s. Abb. 21.

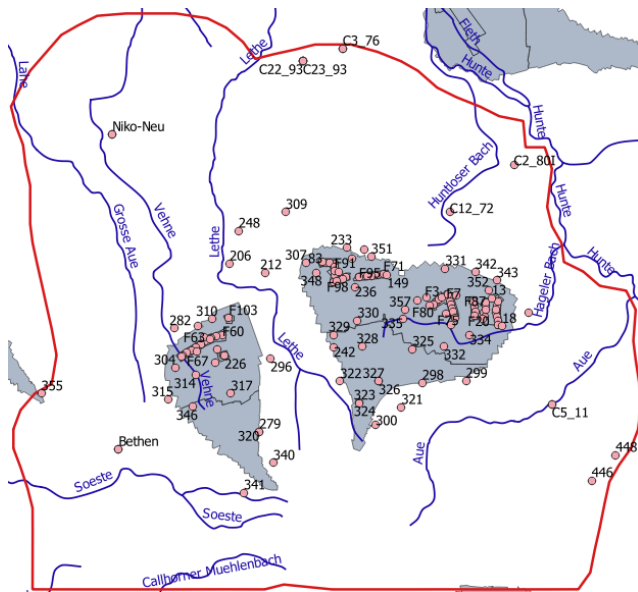


Abb. 21 Verteilung der Nitrat-Messstellen im Modellgebiet

Als Startzeitpunkt für die Transport-Kalibrierung wurde das Jahr 1940 und eine Stickstoffkonzentration im Grundwasser von $c=0$ gewählt. Als Vergleichsgröße wurde im Modell zusätzlich ein nicht reaktiver Tracer transportiert. Es wurden eine Vielzahl von Simulationen gestartet, in denen sowohl die Abbaurate als auch o. g. Grenzen für den Abbau variiert wurden. Die besten Ergebnisse wurden mit der Abbaurate von $7 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ zwischen +10 m und -10 m NN erzielt. Bei allen Simulationen, die für die übrigen Brunnen gute Werte lieferten, wurden die Stickstoffkonzentrationen in den sechs östlichen Brunnen der WGA Sage systematisch unterschätzt. Es handelt sich insbesondere um drei Brunnen mit Stickstoff-Messwerten zwischen 2.2 mg/l und 5.5 mg/l. Die leicht erhöhten Stickstoffwerte bei drei Brunnen im westlichen Teil der WGA Baumweg (3 mg/l bis 6.8 mg/l) konnten durch die Simulationen ebenfalls nicht abgebildet werden. Mit der ermittelten Abbaurate wurden anschließend die Szenariensimulationen durchgeführt. Aus den zeitabhängigen Resultaten für die Nitratkonzentrationen wurden die vereinbarten Indikatoren in drei Tiefen (Tab. 3) berechnet und zur Bewertung in das CAM-Tool überführt, s. Abb. 22.

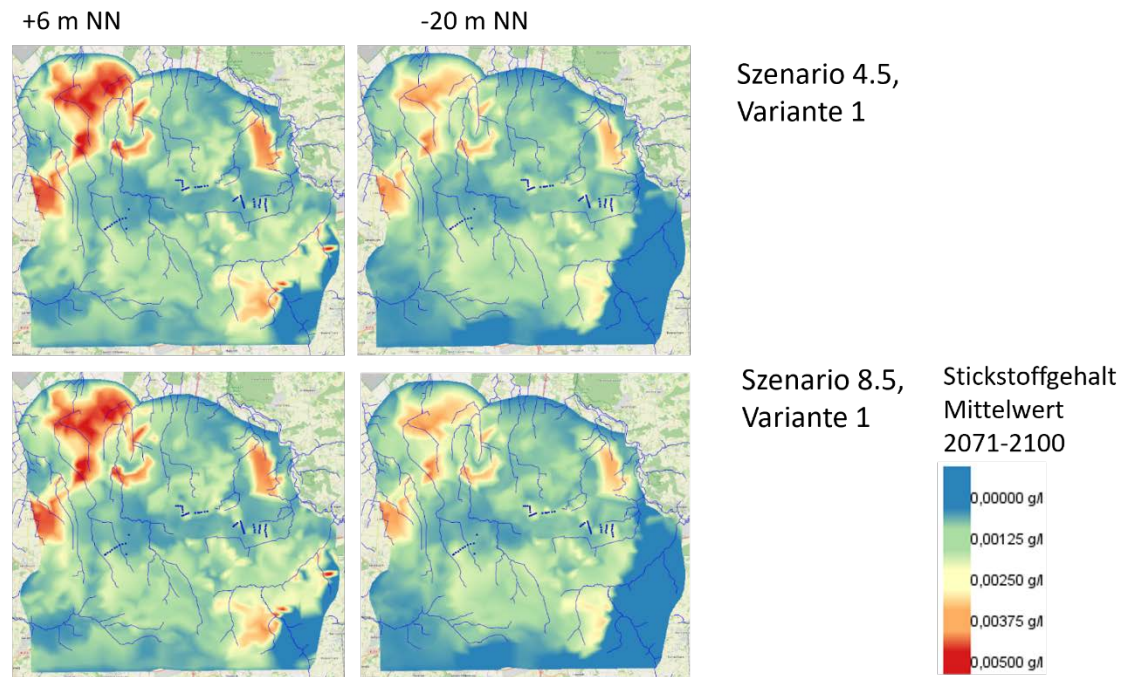


Abb. 22 Stickstoffkonzentration in einer Tiefe von 6 m NN und -20 m NN für die Szenarien 1.45 und 1.05

Im Ergebnis der Szenariensimulationen zeigte sich die Stickstoffkonzentration in den Förderbrunnen im Vergleich zum Anfangszustand 2017 nahezu konstant. Abb. 22 zeigt keinen Einfluss der Klimaszenarien auf die Stickstoffkonzentration im Grundwasser. Die Belastbarkeit der Ergebnisse ist aber erst nach einer Erhebung zusätzlicher Daten über die Pyrit- und DOC-Vorkommen im Modellgebiet und einer darauf basierenden Modellierung unter Einbeziehung des Verbrauchs dieser beiden Stoffe zu qualifizieren.

1.6. Arbeitsregion 3, Türkei, Modell Antalya

1.6.1. Problemstellung

Für die Arbeitsregion Türkei wurde gemeinsam mit den Kooperationspartnern von den Universitäten Antalya und Istanbul das Projektgebiet Serik-Taşagıl-Beşkonak an der Mittelmeerküste östlich von Antalya ausgewählt. Die Grundwasserleiter unterliegen einem starken Nutzungsdruck insbesondere durch die Landwirtschaft und den immer mehr zunehmenden Tourismus. Die Grundwassermodellierung ist hier vor allem für eine Reihe von privaten und öffentlichen Entnahmeverbrunnen im Süden des Modellgebietes von Interesse. Von türkischer Seite wurde für das Projektgebiet innerhalb der letzten Jahre

bereits eine Studie durchgeführt. Den Projektpartnern stehen diese Studie in türkischer Sprache und Datenmaterial zur Verfügung.

1.6.2. Hydrogeologisches Modell

Im Projektgebiet wurden fünf Typen von Grundwasserleitern identifiziert, verkarstete, poröse, geklüftete, geklüftet-poröse und alluviale Grundwasserleiter. Das Gebiet ist in drei Becken untergliedert, s. Abb. 23. Vom TV 3 wurde innerhalb dieser Beckenstruktur ein Modellgebiet für das hydrologische Modell festgelegt. Daran angelehnt wurde für das Grundwassermodell ein knapp 604 km² großes Gebiet innerhalb des unteren Beckens gewählt.

Ein wichtiges Kriterium für die Wahl der Gebietsgrenzen stellten die Datenlage und die Definierbarkeit von Randbedingungen dar. Die Grenzen orientieren sich daher an Wasserscheiden. Im Süden grenzt das Modell an das Mittelmeer. Das Modellgebiet wird von einem dichten Netz von teilweise sehr großen Vorflutern durchzogen, s. Abb. 24.

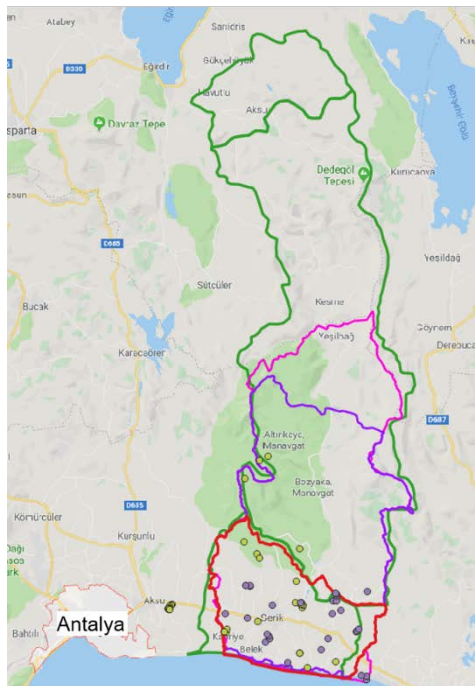


Abb. 23 Lage des Modellgebietes Antalya; grün: Beckenstruktur; pink: Gebiet der Studie; violett: Modellgebiet Hydrologie; rot: Modellgebiet Hydrogeologie; gelb/violett: Entnahmebrunnen, Quelle: Universität Antalya

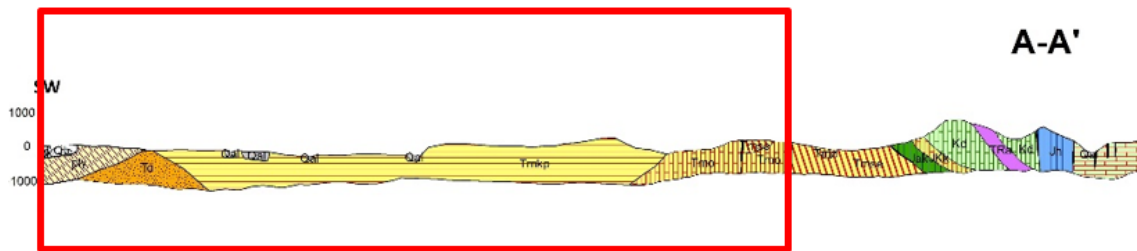


Abb. 26 Südwest-Nordost-Vertikalschnitt durch das Modellgebiet; der für das Modellgebiet relevante Teil ist rot umrandet. (Quelle: Universität Antalya)

In Abb. 27 ist der alluviale Aquifer dreidimensional dargestellt. Dieser wurde von türkischer Seite bereits modelliert. Leider liegen uns zu diesem Modell keine Informationen vor. Der Gedanke, sich auf ein Grundwassermodell des Alluviums zu beschränken, wurde verworfen, da im Modellgebiet Brunnen mit einer Fördertiefe von bis zu 265 m existieren. Das Alluvium hingegen hat nur eine Mächtigkeit von bis zu 40 m. Das Gestein unterhalb des Alluviums wird als „geklüftet/porös“ beschrieben.

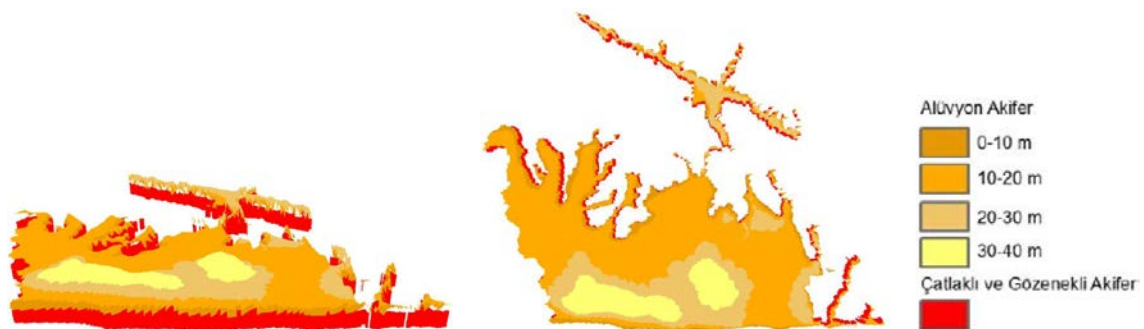


Abb. 27 Abbildungen des alluvialen Aquifers (Quelle: Universität Antalya)

Ausgehend vom in digitaler Form vorliegenden digitalen Geländemodell, der ebenfalls digital vorliegenden Grenze des alluvialen Aquifers und seiner digitalisierten Tiefe wurde ein hydrogeologisches Modell konstruiert, s. Abb. 28.

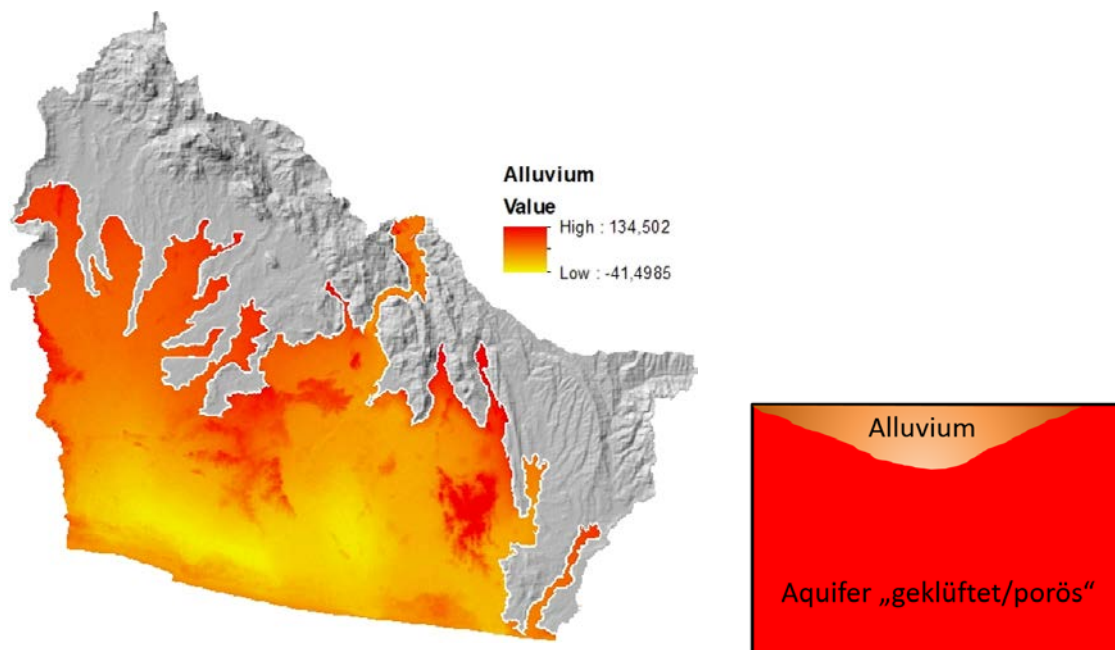


Abb. 28 Links: Konstruierte Basis des Alluviums; rechts: schematischer Schnitt durch das 3d Modell

Da keine weitere geologische Daten akquiriert werden konnten, wurde mit diesem hydrogeologischen 3d Modell gearbeitet. Abb. 29 zeigt das hydrogeologische Modell mit Vorflutern und 58 Förderbrunnen, in das die in TP 1 ermittelte Grundwasserneubildung für den Ist-Zustand bereits integriert ist.

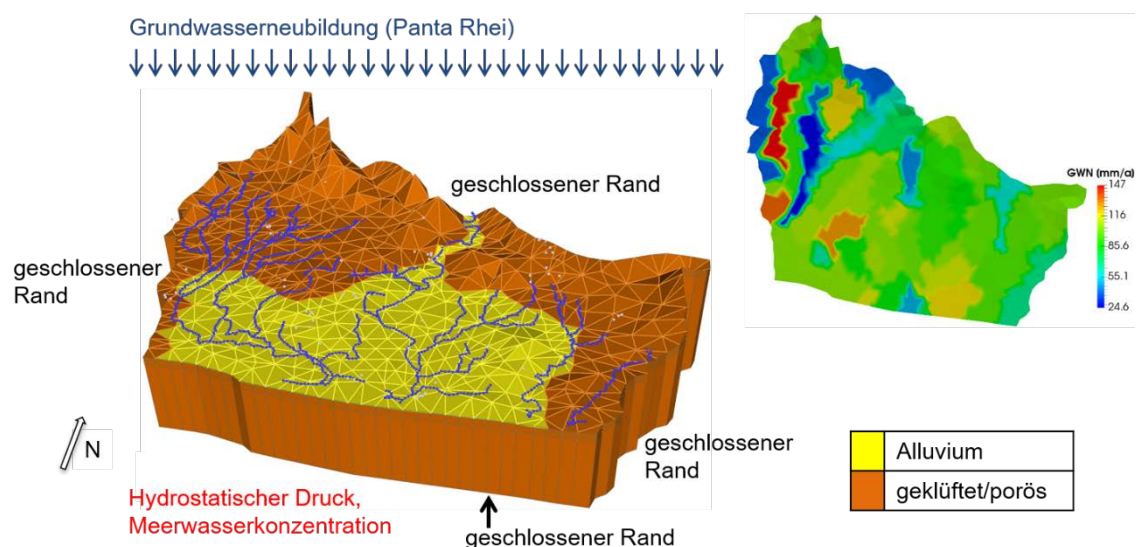


Abb. 29 Antalya: hydrogeologisches Modell mit Randbedingungen, 5fach überhöht, mit Vorflutern (blau) und Förderbrunnen (hellblau); rechts oben: flächendifferenzierte Grundwasserneubildung 2015, Ergebnis von PANTA RHEI (TP 1)

Aufgrund der schlechten Datenlage in Bezug auf die Geologie und die Förderbrunnen stellt die Modellkalibrierung eine besondere Herausforderung dar. Zur Kalibrierung wurden für die Förderraten der Brunnen zum Teil Durchschnittswerte, zum Teil analoge Werte benachbarter Brunnen mit ähnlichen Eigenschaften angesetzt. Für die Grundwasserneubildung wurden Durchschnittswerte aus den Jahren 2012-2017 verwendet. Für die das Alluvium wurden eine Permeabilität von 10^{-11} m^2 und eine Porosität von 0.2 angenommen, für den geklüftet-porösen Aquifer eine Permeabilität von 10^{-12} m^2 und eine Porosität von 0.1. Variiert wurden vor allem die Wasserstände der Vorfluter.

Das Modellgebiet ist durch saisonale Schwankungen des Grundwasserspiegels charakterisiert. Es existieren nur acht Messstellen, für die monatliche Werte für die Grundwasserstände vorliegen. Darüber hinaus liegen Messwerte für 39 der privaten Förderbrunnenvor. Diese Werte sind jedoch nicht datiert und teilweise widersprüchlich, so dass sie nicht für die Kalibrierung verwendet werden konnten.

Abb. 30 zeigt den Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserständen im Ergebnis der Kalibrierung. Abb. 31 zeigt die zeitliche Entwicklung der berechneten Grundwasserstände gegenüber den Messwerten in den acht ausgewählten Messstellen. Der Nash Sutcliffe Koeffizient liegt bei 0.99.

Für das Modellgebiet Antalya liegen historische Grundwasserneubildungsraten für den Zeitraum Mai 2012-September 2017 vor. Dieser Zeitraum wurde zur Überprüfung der Kalibrierung der Grundwasserstände simuliert.

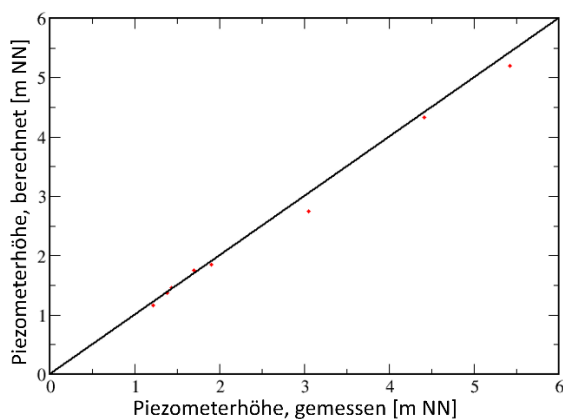


Abb. 30 Stationäre Kalibrierung Antalya: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserständen

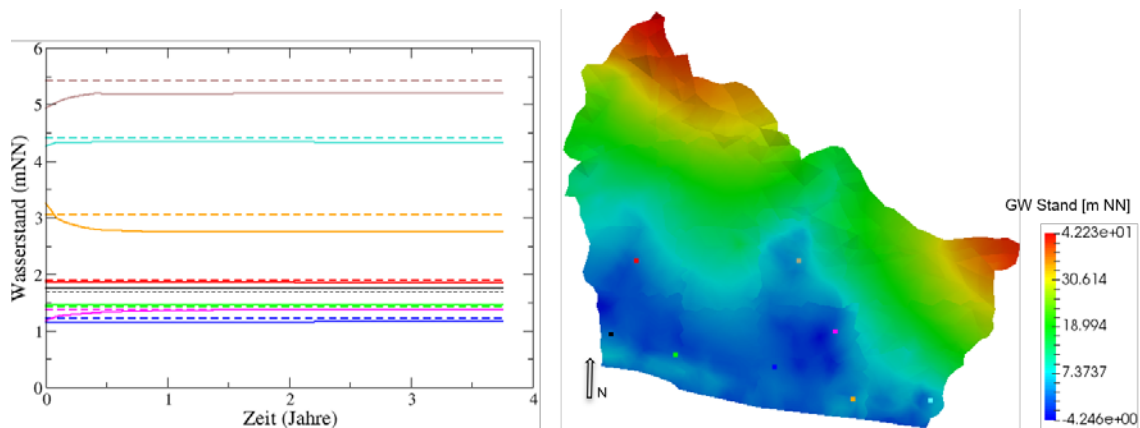


Abb. 31 Stationäre Kalibrierung Antalya: Zeitliche Entwicklung der berechneten Grundwasserstände gegenüber den Messwerten (gestrichelte Linien) in acht ausgewählten Messstellen

Abb. 32 und Abb. 33 zeigen die Lage der freien Grundwasseroberfläche und das Geschwindigkeitsfeld in einem quasi-stationären Zustand als Ergebnisse der Kalibrierung. Das Geschwindigkeitsfeld bei 0 m NN auf der linken Seite von Abb. 25 zeigt die Hauptentwässerung des Modellgebietes in Richtung Süden in das Mittelmeer. Deutlich zu erkennen ist die starke Entwässerung in Richtung der Vorfluter, insbesondere zum Haupt-Vorfluter Köprüçay hin. Im Geschwindigkeitsfeld ist die Grenze des alluvialen Aquifers gut erkennbar. Die Grafik auf der rechten Seite zeigt das wesentlich homogenere Geschwindigkeitsfeld in 900 m Tiefe und verdeutlicht insbesondere den Einstrom von Meerwasser über den südlichen Modellrand in den unteren Aquifer.

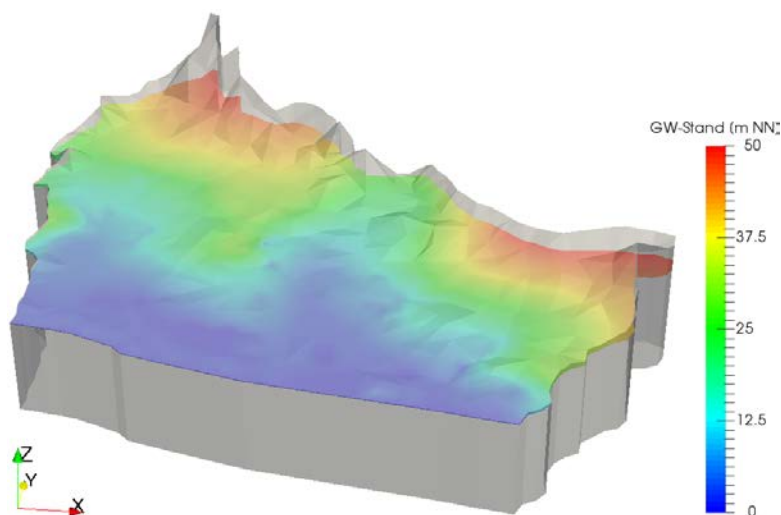


Abb. 32 Lage der Grundwasseroberfläche als Ergebnis der Kalibrierung

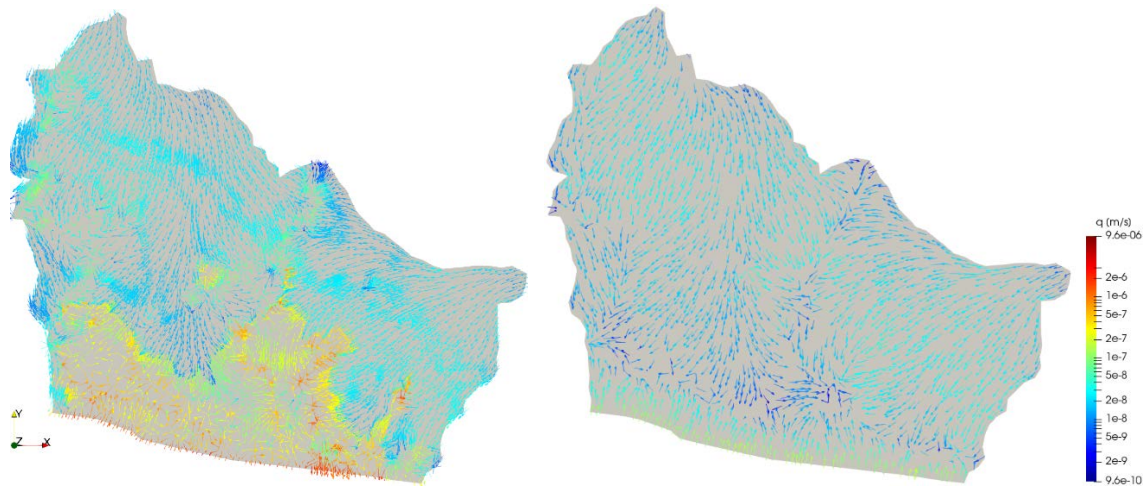


Abb. 33 Geschwindigkeitsfeld (links: 0 m NN; rechts: -900 m NN) als Ergebnis der Kalibrierung, logarithmische Skala

Da die für das Untersuchungsgebiet vorliegenden Messwerte (Abb. 34) nicht für die Bestimmung einer 3d Anfangsbedingung für die Salzkonzentration ausreichen, wurde für die Simulationen eine Vorlaufzeit von 80 Jahren mit dem Wert $c=0$ als Anfangsbedingung für das gesamte Modellgebiet gerechnet. Dabei wurden Grundwasserneubildung und -förderung als konstant angenommen. Es wurden dieselben Werte wie für die Modellkalibrierung verwendet. Nach 80 Jahren war die Bewegung der Süß-/Salzwasser-grenze weitgehend zum Stillstand gekommen, ein stationärer Zustand stellte sich jedoch nicht ein.

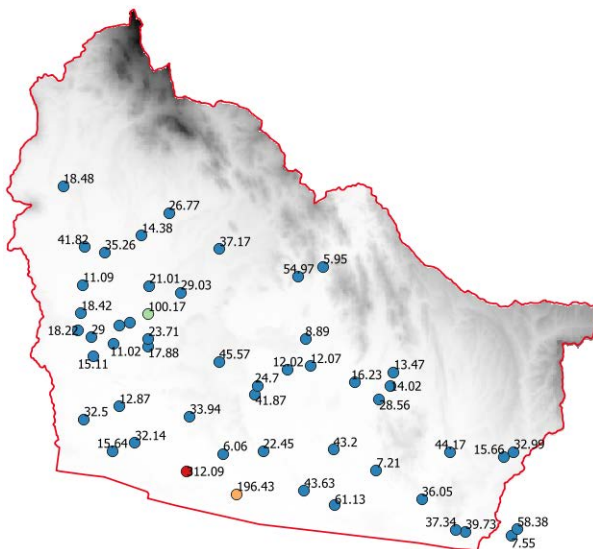


Abb. 34 Chloridkonzentration im Modell Antalya; Messwerte [mg/l]

1.6.3. Ergebnisse

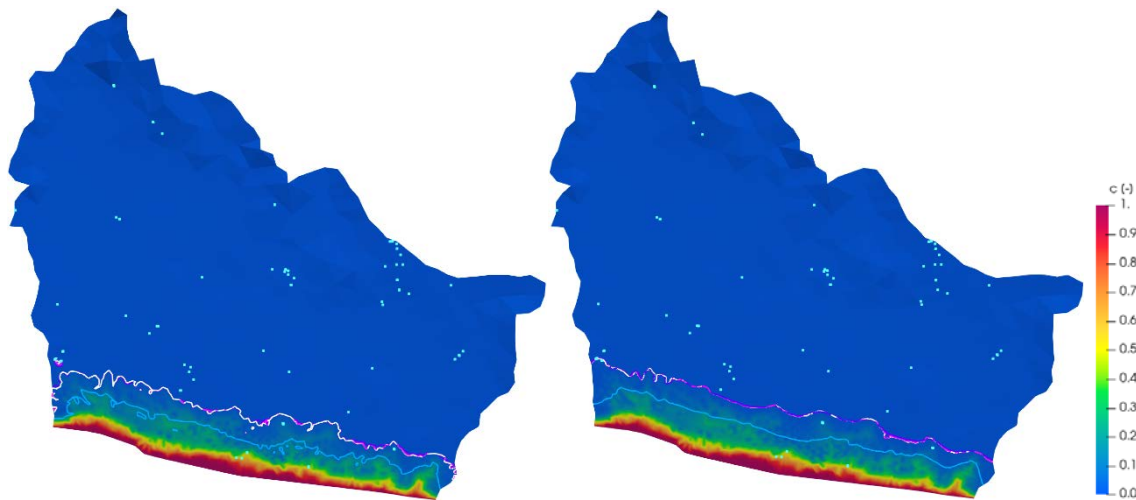


Abb. 35 Salzverteilung im Jahr 2100 in -60 m NN (links) und -100 m NN (rechts) Tiefe für Szenario 1.45 (Farbskala), 1.85 und 3.45;
Konturlinien: Trinkwassergrenze (250 mg Cl⁻/l)
weiß: Szenario 1.45, pink: Szenario 1.85, violett: Szenario 3.45
blau: Anfangszustand, türkis: Förderbrunnen

Da für das Modellgebiet existieren keine Wasserbedarfszenarien. Daher wurden nur die sechs in Tab. 2 aufgeführten Klimaszenarien bis zum Jahr 2100 simuliert. Abb. 35 zeigt die simulierten Werte für die relative Salzkonzentration in -60 m und -100 m NN Tiefe für die Szenarien 1.45 und 1.85 sowie das besonders trockene Szenario 3.45 (s. Abb. 36) im Vergleich. Im Anfangszustand befindet sich die Süß-/Salzwassergrenze nahe an der Küstenlinie, wie es auch die Messwerte (Abb. 34) suggerieren, die nur in zwei Beobachtungsbrunnen in direkter Nähe der Küste eine relevante Versalzung erkennen lassen. Um einen gesicherten Anfangszustand bestimmen zu können, wären weitere Messungen bzw. ein Monitoring der Chloridwerte über einen längeren Zeitraum notwendig.

Bedingt durch die hydraulischen Verhältnisse dringt das Meerwasser im unteren Bereich des Modells weiter in das Landesinnere vor als im oberen Bereich. Die Klimaszenarien üben nur einen geringfügigen Einfluss auf die Lage der Süß-/Salzwassergrenze aus. Diese und demzufolge auch die Trinkwassergrenze bewegen sich im Modell über alle Szenarien hinweg weiter in das Landesinnere. Es ist also davon auszugehen, dass unter den gegebenen und zukünftig höchstwahrscheinlich weiter steigenden Wasserentnahmeraten mit einem weiteren Vordringen der Süß-/Salzwassergrenze zu rechnen ist. Abb. 36 zeigt die Wasserbilanzen für die IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 jeweils für Variante 1, 3 und 5 der in TP 1 berechneten Grundwasserneubildungsszenarien.

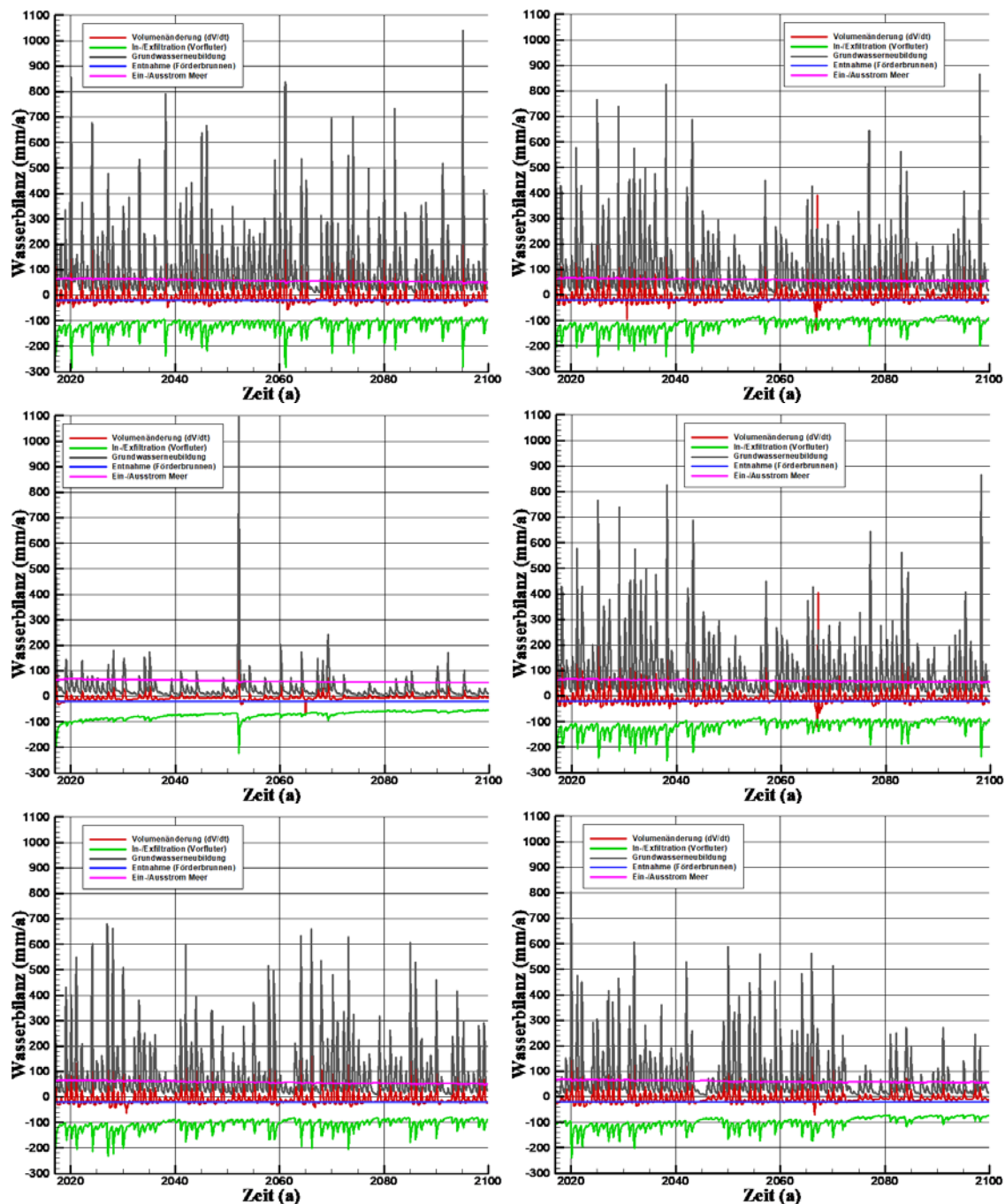
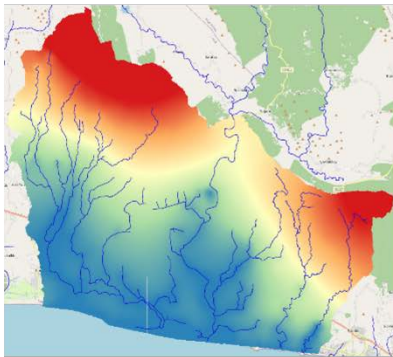


Abb. 36 Wasserbilanzen für die beiden IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 (links) und RCP 8.5 (rechts), von oben nach unten: Variante 1, 2 und 3 für den Zeitraum 2017-2100

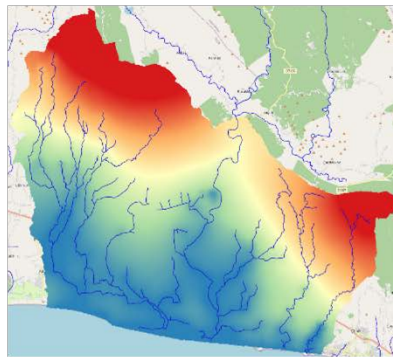
Aus den zeitabhängigen Resultaten für die Grundwasserstände, die Chloridkonzentrationen in drei Tiefen und das verfügbare Trinkwasserdargebot wurden die vereinbarten Indikatoren (Tab. 3) berechnet und zur Bewertung in das CAM-Tool überführt, s. Abb. 37 und Abb. 38.

Szenario 1.45

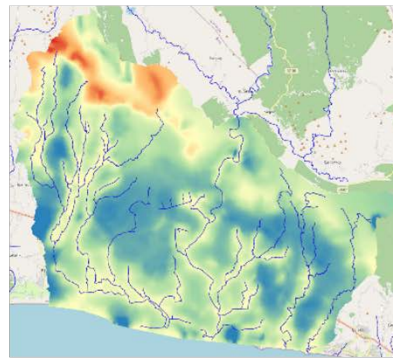
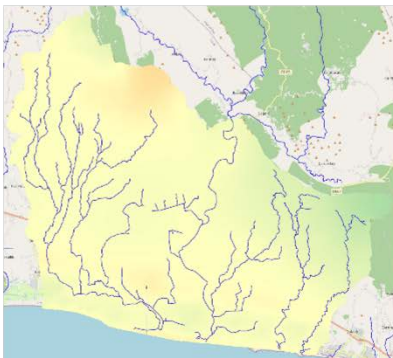
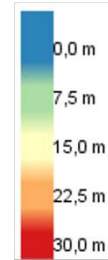
2021-2050



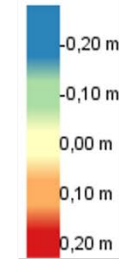
2071-2100



Grundwasser-
stand
Mittelwert

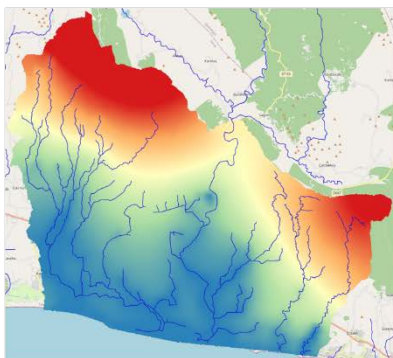


Grundwasser-
stand
Trend

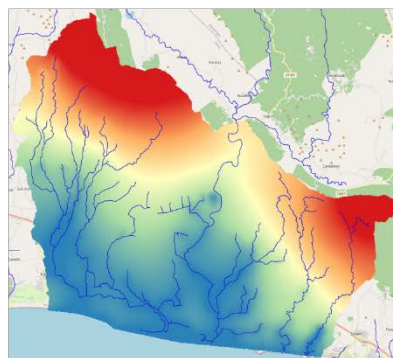


Szenario 1.85

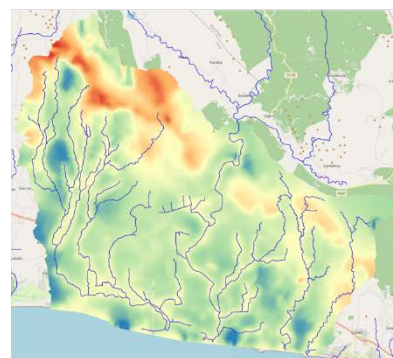
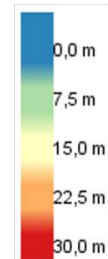
2021-2050



2071-2100



Grundwasser-
stand
Mittelwert



Grundwasser-
stand
Trend

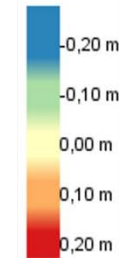


Abb. 37 Indikatoren für den Grundwasserstand im CAM für die Szenarien 1.45 und 1.85

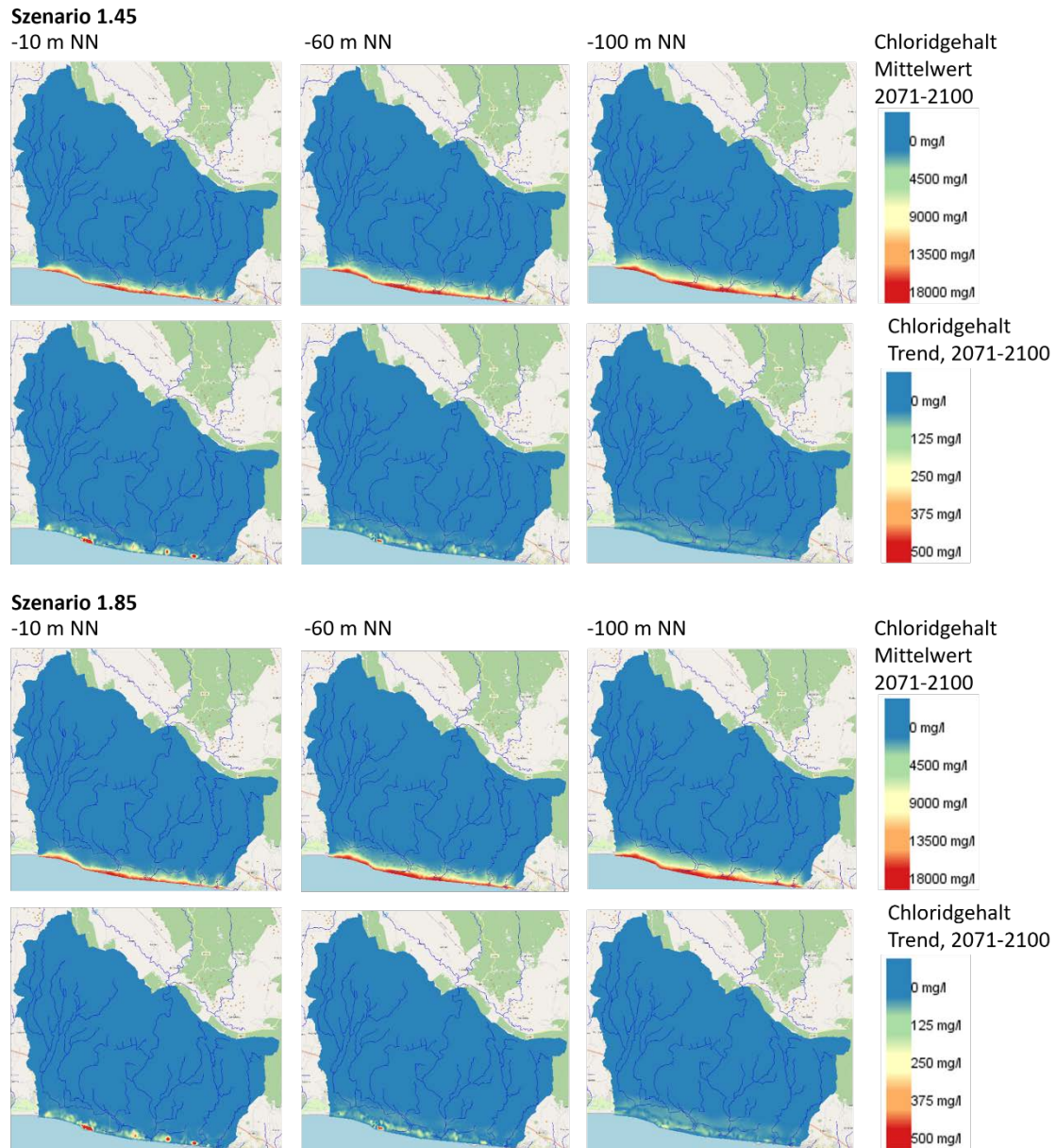


Abb. 38 Indikatoren für den Chlorigehalt in drei Tiefen, dargestellt im CAM für die Szenarien 1.45 und 1.85

Abb. 37 zeigt für die RCP Szenarien 4.5 und 8.5 nur sehr geringe Unterschiede in den Grundwasserständen für die 30jährigen Mittel der Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100. Im zweiten Prognosezeitraum unterscheiden sich lediglich die Trends der Grundwasserstände, wobei allerdings zu beachten ist, dass es sich um wenige Zentimeter handelt. Die sehr geringen Unterschiede zwischen den Szenarienergebnissen legen nahe, dass der Meeresspiegelanstieg in diesem Modell einen deutlich geringeren Einfluss auf die Grundwasserstände ausübt als im Modell Sandelermöns, was auf die stärkeren Unterschiede der Geländehöhen und damit der Grundwasserstände in diesem stark zur Küste

hin abfallenden Gebiet zurückgeführt wird. Der Chloridgehalt im Grundwasserleiter wird nur in unmittelbarer Nähe der Küstenlinie beeinflusst, s. Abb. 38

Das für die verschiedenen Szenarien für die beiden Prognosezeiträume berechnete Trinkwasserdargebot ist in Tab. 9 dargestellt. Für alle Szenarien nimmt das verfügbare Trinkwasserdargebot deutlich ab.

Tab. 9 Verfügbares Trinkwasserdargebot für die einzelnen Szenarien

Klimaszenario	Trinkwasserdargebot [Mio. m³]		
	2017	2050	2100
RCP 4.5, GWN 1	53506	52050	50158
RCP 8.5, GWN 1	53506	52047	50096
RCP 4.5, GWN 3	53506	51915	49914
RCP 8.5, GWN 3	53506	52047	50096
RCP 4.5, GWN 5	53506	52026	50117
RCP 8.5, GWN 5	53506	52000	50035

1.7. Wissenstransfer

Die im Projekt go-CAM weiterentwickelten Verfahren und neuen Kenntnisse sollen im Sinne eines Know-How-Transfers einen Beitrag zu Human Capacity Building in Regionen mit ähnlich gelagerten Problemen, z.B. Fortaleza (Brasilien) und Antalya (Türkei) liefern. Es wurde angestrebt, über Workshops Beiträge für den Ergebnis- und Wissenstransfer in die entsprechenden Strukturen bei den ortsansässigen Verbänden und Wasserbehörden sowie Entscheidungsträgern zu liefern und auch wissenschaftliche Unterstützung bei PhD-Studierenden im Zielgebiet zu leisten. Aufgrund der COVID-19-Pandemie konnte der wissenschaftliche Austausch in dem geplanten Format allerdings nicht stattfinden

1.8. Bewertung der Ergebnisse

Die Fördermaßnahme "Globale Ressource Wasser" (GROW) zielte ab auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einschließlich begleitender Bildungsmaßnahmen zu einer verbesserten und vorausschauenden Bewirtschaftung der Wasserressourcen. Damit sollte ein wichtiger Beitrag geleistet werden zur Umsetzung der nachhaltigen Entwicklungsziele (Sustainable Development Goals - SDGs) der Vereinten Nationen im

Wassersektor. Entscheidungsträger in Behörden und Unternehmen benötigen aktuelle Informationen und Bewertungen zum aktuellen Zustand der Wasserressourcen ebenso wie nachvollziehbare Prognosen zu ihrer zukünftigen Entwicklung unter unterschiedlichen Annahmen für die Entwicklung der Bedarfe. Damit können Risiken früher identifiziert und mögliche Maßnahmen im Sinne der Nachhaltigkeitsziele entworfen und bewertet werden.

Ziel des Vorhabens go-CAM war die Entwicklung, Implementierung und Anwendung einer multikriteriellen Steuerungsoptimierung für eine nachhaltige Wassernutzung in physiogeografisch unterschiedlichen Küstenregionen. Beiträge des hier beschriebenen Teilvorhabens waren der Aufbau von Modellen der dichteabhängigen Grundwasserströmung und des Schadstofftransportes auf regionalem Maßstab für die Zielregionen Ostfriesland und Antalya, die Aufarbeitung der Ergebnisse für das Coastal Aquifer Management Tool (CAM) sowie die Vermittlung dieser Thematik im Rahmen des Human Capacity Building (HCB).

Die Modellierung der dichtegetriebenen Grundwasserströmung im regionalen Maßstab über mehrere Dekaden stellt auch heute noch eine äußerst ressourcenintensive Aufgabe dar. Im Teilvorhaben der GRS konnte gezeigt werden, dass der zur Anwendung gebrachte Programmcode d3f++ die hohen fachlichen Ansprüche und Anforderungen an eine komplexe Modellierung der Grundwasserdynamik auf der regionalen Skala ($> 1.000 \text{ km}^2$) und für lange Betrachtungszeiträume von mehreren Dekaden erfüllt. Es ist gelungen, die Entwicklung der unterirdischen Wasserbilanzgrößen und der Süß-/Salzwassergrenze in komplexen Untergrundstrukturen über lange Zeiträume abzubilden.

Die Voraussetzungen waren in den einzelnen Arbeitsregionen sehr unterschiedlich. Während die durch die Projektpartner OOWV und Insight zur Verfügung gestellten geologischen bzw. davon abgeleiteten hydrogeologischen Modelle im Falle der Modellgebiete Sandelermöns und Großenkneten beispielhaft sind, lagen für das Modell Antalya kaum geologische Daten vor. Besonders wertvoll erwies sich der durch den Projektpartner LIAG auf Basis modernster geophysikalischer Messungen gewonnene 3d Datensatz zur aktuellen Salzverteilung im Modellgebiet Sandelermöns. Durch den OOWV und den NLWKN wurde für die Arbeitsregion Norddeutschland umfangreiches Datenmaterial zur Verfügung gestellt. Die Kopplung mit dem Programm PANTA RHEI über zeitabhängige und flächendifferenzierte Randbedingungen der Grundwasserneubildung erlaubte die Anwendung der Resultate des Projektpartners LWI und damit die

Berücksichtigung von Klimaszenarien in den Grundwassermodellen. Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Die Salzverteilung und damit die Lage der Trinkwassergrenze in der Modellregion Sandelermöns bleibt über alle simulierten Szenarien hinweg stabil. Es kann festgehalten werden, dass die WGA Sandelermöns deutlich außerhalb der möglichen Verschiebungen der Süß-/Salzwasser-Grenze bis zum Jahr 2100 liegt. Das gilt selbst bei einer angenommenen Erhöhung der Entnahmemenge auf 20 Mio. m³/Jahr. Für den Bereich der bereits heute sehr nahe an der Trinkwassergrenze liegenden WGA Feldhausen legen die Simulationsergebnisse ein engmaschiges Monitoring der Chlorid-Werte nahe.

Eine Zunahme des Einstroms vom Meer wird hauptsächlich durch den Meeresspiegelanstieg verursacht. Ein Einfluss dieses Einstroms auf die Lage der Süß-/Salzwasser-grenze lässt sich im Prognosezeitraum jedoch nicht feststellen. Die Auswirkungen auf die Salzkonzentration bleiben auf den Bereich in unmittelbarer Nähe der Küstenlinie beschränkt.

Ein großes Problem stellt nach wie vor die schlechte Datenlage bzgl. der Vorfluter, insbesondere über die aktive Entwässerung durch die Sielverbände dar. Zwar wurden im Vergleich zum Vorgängerprojekt NAWAK zusätzliche Daten erhoben, eine flächendeckende Erfassung findet jedoch noch immer nicht statt. Die Modelle zeigen deutlich, dass die Entwässerung durch die Vorfluter den Wasserhaushalt des Gebietes maßgeblich bestimmt. Schwankungen in der Grundwasserneubildung sowie Änderungen der Wasserförderung werden jeweils weitgehend durch eine veränderte Exfiltration durch die Vorfluter kompensiert führen und nicht zu wesentlichen Veränderungen des Gesamtwasservolumens im Gebiet. Ohne die Kenntnis der Sieltätigkeiten fehlt eine wichtige Größe zur Kalibrierung des Grundwassermodells bzw. zur Bewertung der erreichten Ergebnisse. Die Ergebnisse sind also weiterhin mit Ungewissheiten behaftet. Um die Belastbarkeit der durch die Modelle implizierten Aussagen zu erhöhen, ist eine Verbesserung der Datenlage bzgl. der Vorfluter, insbesondere ein vollständiges Monitoring der aktiven Entwässerung durch die Siel- und Schöpfwerkstätigkeiten notwendig.

Für das Modellgebiet Großenkneten ist im Prognosezeitraum nur ein sehr geringer Einfluss der Klimaszenarien auf den Grundwasserspiegel erkennbar. Die Stickstoffkonzentration in den Förderbrunnen blieb im Vergleich zum Anfangszustand 2017 nahezu konstant. Ein Einfluss der Klimaszenarien auf die Stickstoffkonzentration im Grundwasser ist daher nicht erkennbar.

Um belastbare Aussagen treffen zu können, müsste das Modell den Verbrauch von Pyrit und DOC in den Denitrifikationsprozessen berücksichtigen. Eine Grundlage dafür wäre die Erhebung zusätzlicher Daten über die Pyrit- und DOC-Verteilung im Modellgebiet.

Die Fallstudie Antalya wurde beeinträchtigt durch die sehr schlechte Datenlage bzgl. der Geologie, der Grundwasserstände, der Wasserförderung, der gegenwärtigen Chloridkonzentrationen in den Grundwasserleitern sowie der Pegel der Vorfluter. Daher ist das Modell mit stärkeren Ungewissheiten behaftet und sollte nur zu qualitativen Aussagen herangezogen werden.

Der Einfluss des prognostizierten Meeresspiegelanstiegs auf die Grundwasserverhältnisse ist deutlich geringer ausgeprägt als in der Fallstudie Sandelermöns. Die Klimaszenarien üben nur einen geringfügigen Einfluss auf die Lage der Süß-/Salzwassergrenze aus. Diese und demzufolge auch die Trinkwassergrenze bewegen sich im Modell über alle Szenarien hinweg weiter in das Landesinnere, und das verfügbare Trinkwasserdargebot nimmt deutlich ab. Es ist also davon auszugehen, dass unter den gegebenen und zukünftig höchstwahrscheinlich weiter steigenden Wasserentnahmeraten mit einem weiteren Vordringen der Süß-/Salzwassergrenze zu rechnen ist.

Für alle drei Modelle konnte eine Abschätzung des aktuellen und zukünftigen Wasserdargebots unter Berücksichtigung verschiedener Klima- und Wasserbedarfsszenarien vorgenommen werden. Aus den orts- und zeitabhängigen 3d Resultaten der Szenariensimulationen wurden die für eine Bewertung relevanten Indikatoren und Wasserhaushaltsgrößen zur Auswertung in das CAM-Tool eingespeist, wo sie für eine multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA) zur Verfügung stehen.

Für eine ausführliche Darstellung aller Ergebnisse des Vorhabens go-CAM, die sich aus der integralen Betrachtung der fünf Teilvorhaben ergibt, wird auf den gemeinsamen Abschlussbericht verwiesen.

1.9. Literatur

/BAS 94/ Bastian, P., Wittum, G.: Robustness and adaptivity: The UG concept. In: Multigrid Methods IV, proceedings of the fourth european multigrid conference, ed. by Hemker, P., Wesseling, P., 1994.

- /BEH 07/ Behre, K.-E.: A new Holocene sea-level curve for the southern North Sea. *Boreas* 36: 82-102, 2007.
- /ESC 13/ Eschenbach, W., Well, W.: Predicting the denitrification capacity of sandy aquifers from shorter-term incubation experiments and sediment properties. *Biogeosciences* 10 (2), S. 1013–1035; DOI: 10.5194/bg-10-1013-2013.
- /FEI 99/ Fein, E., Schneider, A. (eds.): d³f – ein Programmpaket zur Modellierung von Dichteströmungen. Final report. FKZ-02 C 0465 0. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-139, Braunschweig, 1999.
- /FEI 04/ Fein, E. (eds.): Software Package r³t. Model for Transport and Retention in Porous Media. Final report. FKZ-02 E 9148/2. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-192, Braunschweig, 2004.
- /FRO 12/ Frolkovič, P.: Application of level set method for groundwater flow with moving boundary, *Advances in Water Resources*, Volume 47: 56-66, 2012.
- /GRU 00/ Grube, A., Wichmann, K., Hahn, J., Nachtigall, K.H.: Geogene Grundwasserversalzung in den Poren-Grundwasserleitern Norddeutschlands und ihre Bedeutung für die Wasserwirtschaft, DVGW-Technologiezentrum Karlsruhe, ISSN: 1434-5765, 2000.
- /HAC 84/ Hackbusch, W.: Multi-Grid Methods and Applications. Springer-Verlag, 1984.
- /JOH 97/ Johannsen, K.: An aligned 3D-Finite-Volume Method for Convection-Diffusion Problems. *Notes on Num. Fluid Mech.*, 59: 227-243, 1997.
- /JOH 06/ Johannsen, K.: Numerical aspects of density driven flow in porous media, in: XVI International Conference on Computational Methods in Water Resources, 2006.
- /NAE 15b/ Nägel A, Vogel A and Wittum G (2015), "Evaluating linear and nonlinear solvers for density driven flow", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 292, 3-15.

- /NAE 20/ Nägel, A.: Efficient and Scalable Methods for Transient Problems in Computational Science and Engineering, Habilitationsschrift, Universität Frankfurt, 2020.
- /SCH 12/ Schneider, A. (ed.): Enhancement of the codes d3f and r3t. GRS-292 BMWi-FKZ 02 E 10336, 365 p.; Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Braunschweig, 2012.
- /SCH 13/ Schneider, A. (ed.): Representation of inhomogeneities in the flow and transport codes d^{3f} and r^{3t}, GRS 311, Braunschweig, 2013.
- /SCH 16/ Schneider, A. (ed.): Modelling of Data Uncertainties on Hybrid Computers (H-DuR). Final report, FKZ 02 E 11062A (BMWi), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-392, 2016.
- /SCH 17/ Schneider, A., Gehrke, A., Kröhn, K.-P., Zhao, H.: Qualification of the Code d^{3f++}. FKZ 02E11213 (BMWi), final report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-448, Braunschweig, 2017.
- /SCH 20/ Schneider, A., Gehrke, A., Kröhn, K.-P., Zhao, H.: Groundwater Flow and Transport in Complex Real Systems. FKZ 02E11476A-B (BMWi), final report, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-566, Braunschweig, 2020.
- /VOG 13/ Vogel, A., Reiter, S., Rupp, M., Nägel, A., Wittum, G.: UG 4: A novel flexible software system for simulating PDE based models on high performance computers. Computing and Visualization in Science 16 (4): 165-179, 2013.
- /WIT 89/ Wittum, G.: Multigrid methods for Stokes and Navier-Stokes equations. Transforming smooth. algorithms and numerical results. Numerische Mathematik. 54: 543-563, 1989.
- /WOL 17/ Wolf, J., Schneider, A., Zhao, H.: Entwicklung nachhaltiger Anpassungsstrategien für die Infrastrukturen der Wasserwirtschaft unter den Bedingungen des klimatischen und demografischen Wandels, Teilvorhaben 1, Abschlussbericht. FKZ 033W007A. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 2017.

2. Zahlenmäßiger Nachweis

Die Zuwendungen des BMBF flossen im Wesentlichen in Personalmittel, ein kleiner Teil in Reisekosten zu Vorhabentreffen.

	BMBF [€]	GRS [€]	Summe [€]
Personal	379 465,60	32 997,00	412 462,60
Reisekosten	4 164,80	362,16	4 526,96
SUMME	383 630,40	33 395,16	416 989,56
Prozent	92	8	100

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Als wesentlicher Bestandteil des Wasserkreislaufes und zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung bedarf das Grundwasser eines besonderen Schutzes (BMUB/UBA 2017). Nachhaltige Bewirtschaftung des Wasserhaushaltes bedeutet einen guten mengenmäßigen und qualitativen Grundwasserzustand und die mengen- und gütemäßige Sicherung der Wasserversorgung. Einerseits durch den Einfluss des Klimawandels, andererseits durch eine Übernutzung durch Tourismus, Landwirtschaft und Industrie oder auch durch eine starke Entwässerung von Marschland zugunsten der Landnutzung kommt es in Küstenregionen weltweit zu Nutzungskonflikten, die ohne ein kluges Management zu einer Verschiebung der Süß/Salzwassergrenze führen und somit die langfristige Versorgung mit Trinkwasser hoher Qualität gefährden können. In anderen Gebieten können Stoffeinträge aus der Landwirtschaft die Trinkwasserqualität gefährden.

Messungen der Grundwasserbeschaffenheit können nur punktuelle Informationen eines Ist-Zustandes liefern, aber kaum Erkenntnisse über Entwicklungen über lange Zeiträume. Grundwasserleiter, insbesondere in Küstengebieten, stellen in Verbindung mit o.g. Einflussfaktoren sehr komplexe Systeme dar. Ein Grundwassermanagement erfordert ein fundiertes Systemverständnis. Ohne die Anwendung leistungsfähiger 3d Modelle, die auf einer bestmöglichen Datenbasis arbeiten, lässt sich ein solches Systemverständnis nicht herstellen.

Im hier dargelegten Vorhaben wurde ein auf einem numerisch leistungsfähigen Grundwassercode beruhendes Instrumentarium erprobt und erfolgreich auf mehrere Modellgebiete angewendet. Prognosen über die Entwicklung der Trinkwasserqualität bis zum Jahr 2100 wurden unter Berücksichtigung mehrerer Szenarien für die klimatische Entwicklung und die Wasserförderung erstellt. Das Verbundprojekt insbesondere mit dem Praxis-Partner OOWV war Garant dafür, dass praxisrelevante Fragestellungen untersucht wurden. Desweiteren wurde ein starkes Augenmerk darauf gelegt, dass die Resultate der Modellrechnungen über das CAM-Tool für Akteure aus Wirtschaft und Politik verständlich und handhabbar verfügbar gemacht wurden.

Die geleisteten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen.

4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Finanzierung des für die Modellierung von dichteabhängigen Grundwasserströmungen in komplexen geologischen Strukturen entwickelte Programmpaketes d^{3f}/r^{3t} (seit 2015 zusammengeführt in d^{3f}++) erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Die Anwendung dieses Programmpaketes blieb in den letzten Jahren überwiegend auf die Modellierung von Grundwasserströmungen in potentiellen Wirtsgesteinen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle beschränkt. Der Einsatz von d^{3f}++ in neuen Aufgabenfeldern trägt zur Qualifizierung der Codes bei und erhöht den Bekanntheitsgrad. Die Simulationsergebnisse im Projekt go-CAM zeigen das Potential auf, das d^{3f}++ im Bereich Sicherung der Süßwasserressourcen in Küstenregionen aufweist. Hier können mit in der Vergangenheit aufgewendeten Steuergeldern erzielte Ergebnisse zur Lösung drängender Probleme beitragen.

Die Sicherstellung der Wasserversorgung ist ein Zentralpunkt der nachhaltigen Entwicklungsziele (SDG) der Vereinten Nationen und hat neben den humanitären Aspekten eine starke wirtschaftliche Bedeutung. Insbesondere in den küstennahen Ballungsräumen sind Meerwasserintrusionen eine ernsthafte Bedrohung der Grundwasserressourcen. Da der Druck auf die Grundwasserressourcen zunimmt, wächst die Notwendigkeit eines Grundwassermanagements und damit der Möglichkeit, über leistungsfähige Modelle das komplexe Zusammenwirken aller Faktoren, die einen

Grundwasserleiter beeinflussen, zu verstehen und für unterschiedliche Entwicklungspfade Prognosen erstellen zu können. So lassen sich mögliche Gegenmaßnahmen zur Vermeidung unerwünschter Entwicklungen ableiten, deren Folgen sich wiederum durch die Modelle abschätzen lassen.

Über die im Verbundprojekt entwickelte CAM-Plattform lassen sich mögliche künftige Entwicklungen unter dem Einfluss des Klimas, insbesondere des Meeresspiegelanstiegs oder der Grundwasserbewirtschaftung und deren Auswirkungen (Salzwasserintrusion, Veränderung der Grundwasserstände etc.) transparent darstellen, bewerten und für eine Moderation dokumentieren. Hier werden neben den Betreibern der Wasserwerke insbesondere die Fachbehörden im Wassersektor der Küstenbundesländer (NLWKN, Wasserbehörden) als mögliche Nutzer angesprochen.

Das Vorhaben hat insbesondere für die Wasserversorgung im Bereich Sandelermöns hilfreiche Ergebnisse geliefert. So zeigen die Ergebnisse, dass das Einzugsgebiet der Brunnen der WGA Sandelermöns über alle Klimaszenarien hinweg deutlich außerhalb der möglichen Verschiebungen der Süß-/Salzwasser-Grenze bis zum Jahr 2100 liegt. Das gilt selbst bei gegenüber den derzeit bewilligten stark erhöhten Entnahmemengen. Diese Erkenntnisse werden ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Genehmigungsverfahren in der Region sein.

Die erzielten Ergebnisse zeigen insgesamt, dass im norddeutschen Küstenraum bei Berücksichtigung des klimatischen und demographischen Wandels eine Übernutzung der Wasserressourcen regional nicht wahrscheinlich ist. Lokal sind allerdings Nutzungskonflikte zu prüfen und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen erforderlich. Mit einer umfassenden und nachhaltigen Steuerung der Wasserversorgung im Küstenbereich sind diese Nutzungskonflikte auf Grund der insgesamt günstigen hydrologischen und strukturellen Voraussetzungen in Deutschland beherrschbar. Eine direkte Einbeziehung von unterschiedlichen Nutzergruppen in Entscheidungen zur Wasserverteilung unter Nutzung der CAM-Plattform ermöglicht die notwendige Akzeptanz für eine Umsetzung von nachhaltigen Steuerungsstrategien.

Eine kurz- bis mittelfristige Verwertung der Ergebnisse für Wasserversorger anderer Gebiete im In- und Ausland hat hohe Erfolgsaussichten. Das gilt insbesondere für die im Teilprojekt erzielten Weiterentwicklungen in der Modellierung dichtegetriebener Grundwasserströmung regionaler Einzugsgebiete.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Eine der wichtigsten Veranstaltungen im internationalen Austausch ist das Salt Water Intrusion Meeting (SWIM), welches seit 1968 alle zwei bis drei Jahre die Forschungsergebnisse aus aller Welt in einem Tagungsband zusammenfasst. Pandemiebedingt fand während des Vorhabens go-CAM nur die 25. SWIM-Konferenz vom 17. - 22. Juni 2018 in Gdansk statt, auf der Ergebnisse aus dem Vorhaben vorgestellt werden konnten. Die Auswertungen der anderen Konferenzbeiträge zeigen, dass regionale Modelle dichtegetriebener Strömungsmodelle für komplexe geologische Verhältnisse mit Finite-Elementen- oder Finite-Volumen-Verfahren noch immer Ausnahmen darstellen.

Die Anwendung des unter Förderung vom BMBF und BMWi für die Endlagerung radioaktiver Abfälle entwickelten Programms d^{3f++} auf neue Fragestellungen hat zur Qualifizierung der Codes beigetragen und neue Einsatzmöglichkeiten in zukünftigen FuE-Vorhaben geschaffen. Durch die Anforderungen aus dem Vorhaben go-CAM, insbesondere die Größe der Modellgebiete, die numerisch stabile Modellierung der freien Grundwasseroberfläche in dichteabhängigen Strömungen auf regionaler Ebene sowie die Anbindung von Vorflutern konnte das Modell d^{3f++} entscheidend weiterentwickelt werden. Ein zeitgleich im Rahmen eines anderen Projektes entwickeltes Tool zur Modellkalibrierung wurde erfolgreich angewandt. Letztendlich konnte durch die Arbeiten im Vorhaben go-CAM die Marktreife von d^{3f++} deutlich verbessert werden.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Modellergebnisse der GRS sind wesentliche Bestandteile der im Vorhaben entwickelten CAM-Plattform. Auch nach Vorhabensende wird die Kooperation zwischen den Erstellern und Nutzern des CAM weitergeführt. Auf Bedarf der Nutzer können von den Modellierern zusätzliche Berechnungsvarianten oder Szenarien erstellt und in das CAM implementiert werden. Dies gilt insbesondere für auf Basis der bisher eingestellten Indikatoren abgeleitete Maßnahmen des Wassermanagements.

Bereits die große nationale Breitenwirkung des Vorhabens NAWAK in den Küstenregionen Deutschlands hatte eindrucksvoll die Bedeutung der Fragestellung „Sicherung der Wasserressourcen“ in Küstenregionen gezeigt. International ist diese Fragestellung als noch bedeutsamer einzustufen, da in vielen Ländern der Anteil der betroffenen Kommunen deutlich größer ist als in Deutschland. Die im Vorhaben go-CAM aufgeworfene Frage nach der Steuerung der Wasserressourcen in Küstenregionen unter den

Ungewissheiten des Klimawandels wird ist auch in vielen anderen Staaten von großer Bedeutung. Wie die Situation in der Türkei zeigt, hat die Fragestellung neben der wissenschaftlichen Bedeutung eine fundamentale wirtschaftliche Relevanz. Länder mit stark genutzten Küstengrundwasserleitern stellen somit für die im Vorhaben go-CAM eingesetzten Werkzeuge, im Teilvorhaben GRS insbesondere für den Programm-Code d^{3f++}, bedeutende potentielle Märkte dar.

5. Bekannt gewordene Fortschritte Dritter

Eine Arbeitsgruppe der Universität Oldenburg entwickelt gegenwärtig ein Grundwassermodell, das den küstennahen Raum zwischen Ems und Weser umfasst. Auch hier soll der Einfluss des Klimawandels auf die Lage der Süß-/Salzwassergrenze untersucht werden. Der gegenwärtige Stand der Arbeiten wurde auf einem Poster im Rahmen des 25. Saltwater Intrusion Meetings (SWIM) dargestellt.

Weitere für die Durchführung des Vorhabens relevante FE-Ergebnisse Dritter sind nicht bekannt.

6. Veröffentlichungen

Begutachtete Proceedings

SCHÖNIGER, H.M., ELEY, M., LANGMANN, T., SCHIMMELPFENNIG, S., KEJO, H., SANDER, M., WIEDERHOLD, H., RONCZKA, M., SCHNEIDER, A., ZHAO, H., KOCH, A. 2019. Saltwater meets fresh water - scientific approach meets societal needs. - Proceedings of the 38th IAHR World Congress. September 1-6, 2019, Panama City, Panama.

Proceedings

SCHNEIDER, A., ZHAO, H., WOLF, J., LOGASHENKO, D., REITER, S., VOGEL, A., HOWAHR, M., ELEY, M., GELLESZUN, M., SCHÖNIGER, H.M., WIEDERHOLD, H.: Modeling saltwater intrusion scenarios for a coastal aquifer at the German North Sea. Proceedings of 25th SWIM, Gdansk, Poland, 17-22 June 2018

SCHÖNIGER, H.M., SCHIMMELPFENNIG, S., ELEY, M., SCHNEIDER, A., WIEDERHOLD, H., HARMS, E., DE VRIES, D., SOBISCH, H.-G., SANDER, M. 2019. Strengthening groundwater governance by means of system-relevant indicators. Proceedings of the GRoW Midterm Conference - Global analyses and local solutions for sustainable water resources management. Frankfurt am Main, 20-21 February 2019. ISBN: 978-3-942664-00-4

Vorträge

SANDER, M., LANGMANN, T., SOBISCH, H.-G., WIEDERHOLD, H., SCHNEIDER, A. 2020. go-CAM - Implementing strategic development goals in Coastal Aquifer Management. - Webinar, Final Conference of the BMBF Funding Measure „Water as a Global Resource (GRoW), 22.10.2020.

Poster

LANGMANN, T., SCHNEIDER, A., ZHAO, H., ELEY, M., SCHÖNIGER, H.M., SCHIMMELPFENNIG, S., WOLF, J., WIEDERHOLD, H., 2020. Integrated hydrosystem modelling as a key contribution to the UN-SDG 6 targets. - Poster, GRoW Final Conference, 20.-21.10.2020, Berlin.

Geplante Veröffentlichungen

LANGMANN, T., SCHNEIDER, A., ZHAO, H., SCHÖNIGER, H.M., D., WOLF, J. (2022): Sealevel rise and groundwater recharge – the physical boundary conditions of a coastal aquifer (northwest Germany), EGU General Assembly 2022.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.	Gebiet D , durch den beweglichen Rand $\Gamma(t)$ unterteilt in den gesättigten Bereich $\Omega(t)$ (Lösung des DGL-Systems) und den ungesättigten Bereich $D \setminus \Omega(t)$ (außerhalb des Modells)	9
Abb. 2.	Lage des Modellgebietes Sandelermöns; rot: Modellgrenze; grün: Einzugsgebiete der drei Wassergewinnungsanlagen; gepunktet: Lage der Süß-/Salzwassergrenze gemäß NLWKN (schwarz vollständig, rot teilweise versalzt)	16
Abb. 3.	Hydrogeologisches Modell Sandelermöns, 50fach überhöht	19
Abb. 4.	Chloridkonzentration in 10 m (links) bzw. 60 m (rechts) Tiefe aus den HEM- Daten; rot: Modellgrenze; schwarz: Wasserschutzgebiete; grün: Förderbrunnen; gepunktet: Süß-/Salzwassergrenze lt. NLWKN	20
Abb. 5.	Grobgritter (50fach überhöht), Anfangs- und Randbedingungen sowie Entnahmefunnen im Grundwassermodell für die Region Sandelermöns; „c=1“ steht für die Salzkonzentration der Nordsee (35 g/l NaCl bzw. 18 g/l Cl ⁻)	21
Abb. 6.	Ergebnisse der Modellkalibrierung; links: Lage der Grundwasseroberfläche in Relation zu den Messpunkten; rechts: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Werten	22
Abb. 7.	Simulierte Lage der freien Grundwasseroberfläche für Szenario 1.45 mit moderater Förderrate und für Szenario 1.85 mit stärkerer Förderrate im Jahr 2100 (Darstellung 50fach überhöht)	23
Abb. 8.	Salzverteilung im Jahr 2100 in -60 m (links) und -100 m (rechts) NN für das Szenario 1.45 mit moderater Förderrate	24
Abb. 9.	Wasserbilanzen für das RCP-Szenario 4.5, Varianten 1, 3 und 5 mit der moderat erhöhten Trinkwasserförderung (links) und der höheren Trinkwasserförderung (rechts): Grundwasserneubildung, Wasserentnahme durch die Förderbrunnen, In- bzw. Exfiltration durch die Vorfluter und Änderung des Gesamtvolumens	26
Abb. 10.	Wasserbilanzen für das RCP-Szenario 8.5, Varianten 1, 3 und 5 mit der moderat erhöhten Trinkwasserförderung (links) und der höheren Trinkwasserförderung (rechts): Grundwasserneubildung, Wasserentnahme durch die Förderbrunnen, In- bzw. Exfiltration durch die Vorfluter und Änderung des Gesamtvolumens	27

Abb. 11.	Indikatoren für den Grundwasserflurabstand im CAM für ein gemäßigtes Szenario und ein trockenes Szenario mit höherer Wasserförderung	28
Abb. 12.	Indikatoren für den Chloridgehalt im CAM, RCP-Szenario 4.5, Variante 1, Förderraten des Wasserwerkes Sandelermöns bis zu 15 Mio. m ³ /a	29
Abb. 13.	Indikatoren für den Chloridgehalt im CAM, RCP-Szenario 8.5, Variante 1, Förderraten des Wasserwerkes Sandelermöns bis zu 20 Mio. m ³ /a	30
Abb. 14.	Modellgebiet Großenkneten mit Grundwassergleichen (blau), Förderbrunnen der Wassergewinnungsanlagen (türkis) und Wasserschutzgebieten (grau).....	34
Abb. 15.	Großenkneten, hydrogeologisches Modell mit Randbedingungen, 30fach überhöht; rechts oben: flächendifferenzierte Grundwasserneubildung als Ergebnis von PANTA RHEI (TP 1)	35
Abb. 16.	oben: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserständen; unten: Zeitliche Entwicklung der berechneten Grundwasserstände gegenüber den Messwerten (gestrichelte Linien) an fünf ausgewählten Messstellen.....	36
Abb. 17.	Lage der Grundwasseroberfläche im Modell als Ergebnis der Kalibrierung (50fach überhöhte Darstellung)	36
Abb. 18.	Wasserbilanz für das IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 (links) und 8.5 (rechts), Variante 1, 3 und 5 (von oben nach unten), für den Zeitraum 2017-2100.....	38
Abb. 19.	Indikatoren für den Grundwasserflurabstand im CAM für die Klimaszenarien 1.45 und 1.85	39
Abb. 20.	Nitrateintrag über den oberen Modellrand in Abhängigkeit von der Bodennutzung (grau: Förderbrunnen der WGA); Quelle: NLWKN	41
Abb. 21.	Verteilung der Nitrat-Messstellen im Modellgebiet	42
Abb. 22.	Stickstoffkonzentration in einer Tiefe von 6 m NN und -20 m NN für die Szenarien 1.45 und 1.05	43
Abb. 23.	Lage des Modellgebietes Antalya; grün: Beckenstruktur; pink: Gebiet der Studie; violett: Modellgebiet Hydrologie; rot: Modellgebiet Hydrogeologie; gelb/violett: Entnahmebrunnen, Quelle: Universität Antalya	44
Abb. 24.	Lage des Modellgebietes für das hydrogeologische Modell (rot) in Relation zum digitalen Geländemodell und Vorfluter (Mitte: Haupt-Vorfluter Köprüçay).....	45

Abb. 25.	Geologische Karte und Aquiferkarte (Quelle: Universität Antalya)	45
Abb. 26.	Südwest-Nordost-Vertikalschnitt durch das Modellgebiet; der für das Modellgebiet relevante Teil ist rot umrandet. (Quelle: Universität Antalya)	46
Abb. 27.	Abbildungen des alluvialen Aquifers (Quelle: Universität Antalya)	46
Abb. 28.	Links: Konstruierte Basis des Alluviums; rechts: schematischer Schnitt durch das 3d Modell	47
Abb. 29.	Antalya: hydrogeologisches Modell mit Randbedingungen, 5-fach überhöht, Vorflutern (blau) und Förderbrunnen (hellblau); rechts oben: flächendifferenzierte Grundwasserneubildung 2015, Ergebnis von PANTA RHEI (TP 1).....	47
Abb. 30.	Stationäre Kalibrierung Antalya: Vergleich der berechneten mit den gemessenen Grundwasserständen	48
Abb. 31.	Stationäre Kalibrierung Antalya: Zeitliche Entwicklung der berechneten Grundwasserstände gegenüber den Messwerten (gestrichelte Linien) in acht ausgewählten Messstellen.....	49
Abb. 32.	Lage der Grundwasseroberfläche als Ergebnis der Kalibrierung	49
Abb. 33.	Geschwindigkeitsfeld (links: 0 m NN; rechts: -900 m NN) als Ergebnis der Kalibrierung, logarithmische Skala	50
Abb. 34.	Chloridkonzentration im Modell Antalya; Messwerte [mg/l]	50
Abb. 35.	Salzverteilung im Jahr 2100 in -60 m NN (links) und -100 m NN (rechts) Tiefe für Szenario 1.45 (Farbskala), 1.85 und 3.45.....	51
Abb. 36.	Wasserbilanzen für die beiden IPCC-Klimaszenarien RCP 4.5 (links) und RCP 8.5 (rechts), von oben nach unten: Variante 1, 2 und 3 für den Zeitraum 2017-2100	52
Abb. 37.	Indikatoren für den Grundwasserstand im CAM für die Szenarien 1.45 und 1.85	53
Abb. 38.	Indikatoren für den Chloridgehalt in drei Tiefen, dargestellt im CAM für die Szenarien 1.45 und 1.85	54

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.	Wasserbedarfsszenarien für das Modell Sandelermöns	13
Tab. 2.	Rechenfälle aus den kombinierten Klima- und Wasserbedarfsszenarien.....	14
Tab. 3.	Durch das Grundwassermodell bereitgestellte Indikatoren	15
Tab. 4.	Permeabilitäten im Ergebnis der Modellkalibrierung	22
Tab. 5.	Abstand der Trinkwassergrenze zum nächstgelegenen Brunnen der WGA Sandelermöns	24
Tab. 6.	Verfügbares Trinkwasserdargebot für die einzelnen Szenarien	31
Tab. 7.	Permeabilitäten im Ergebnis der Modellkalibrierung	35
Tab. 8.	Angenommener Stickstoffeintrag für den historischen Zeitraum 1940-2016 für die einzelnen Nutzungsarten; Quelle: OOWV/IWW	40
Tab. 9.	Verfügbares Trinkwasserdargebot für die einzelnen Szenarien	61

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-949088-51-3