

Adressat/Auftraggeber:

Amprion Offshore GmbH
René Benkendorf
Robert-Schuman-Straße 7
44263 Dortmund
Tel.: + 49 (0) 162 199 4413
E-Mail: rene.benkendorf@amprion.net

TenneT Offshore GmbH
Steffen Hinneburg
Eisenbahnlängsweg 2 a
31275 Lehrte
Tel.: +49 (0) 5132 89 2673
E-Mail: steffen.hinneburg@tennet.eu

Bearbeitung:

delta h Ingenieurgesellschaft mbH
Prof. Dr.-Ing. Christoph M. König
Dr. Simon Schröder
Dr.-Ing. Katrin Brömme
Parkweg 67
58453 Witten
Tel.: +49 2302 / 91 406 – 22
Fax: +49 2302 / 91 406 – 20
E-Mail: ck@delta-h.de

Witten, den 19.03.2024

delta h Ingenieurgesellschaft mbH



Prof. Dr.-Ing. Christoph M. König

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung.....	8
2	Einordnung des Modells	9
2.1	Leistungsmerkmale der numerischen Berechnung.....	11
2.2	Modellgüte	12
3	Theoretische Grundlagen der Berechnung.....	14
3.1	Die Strömungsgleichung.....	14
3.2	Die Transportgleichung eines gelösten Stoffes	17
3.3	Kopplung von Transport- und Strömungsgleichung im dichteabhängigen Fall	20
3.4	Wärmemodellierung	21
4	Datengrundlage	23
4.1	Geländemodell	23
4.2	Oberflächengewässer	24
4.3	Geologischer Aufbau	25
4.3.1	Durchlässigkeiten.....	27
4.3.2	Effektive Porositäten	28
4.3.3	Dispersivitäten	28
4.3.4	Diffusionskoeffizient	28
4.4	Grundwassermessstellen und -messwerte	28
4.5	Grundwasserentnahmen.....	29
4.6	Grundwasserneubildung	33
4.6.1	Prozesse und Einflussgrößen	34
4.6.2	Eingangsparameter für SPRING	41
4.6.3	Ermittlung der instationären Grundwasserneubildung.....	46
4.6.4	Vergleich der Verfahren zur Grundwasserneubildungsberechnung	49
4.7	Hydraulische Randbedingungen.....	52
4.8	Dichteparameter	52
4.9	Wärmeparameter.....	53
4.10	Kabeltrassen	54
4.10.1	Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität.....	55
4.10.2	Wetterdaten: Lufttemperatur und Globalstrahlung.....	56

4.10.3	Auslastung der Kabel und die daraus resultierende Verlustleistung.....	56
5	Erstellung eines hydrogeologischen Modells (HGM).....	57
5.1	Abgrenzung des Modell- bzw. Bilanzraums.....	57
5.2	Zu- und Abflusskomponenten	60
5.3	Interaktion zwischen Gewässern und Grundwasser	60
6	Numerisches Modell	62
6.1	3D-Modell.....	62
6.1.1	Ortsdiskretisierung -Elementnetz	62
6.1.2	Zeitdiskretisierung und Courant-Zahl	68
6.1.3	Péclet-Zahl	68
6.1.4	Numerische Dispersion.....	68
6.2	Vertikalmodelle	69
7	Modellkalibrierung.....	71
7.1	Stationäre Kalibrierung.....	71
7.2	Instationäre Kalibrierung.....	74
7.3	Zusätzliche Plausibilisierung des Modells.....	81
8	Prognoserechnungen.....	83
8.1	Betrieb der geplanten Kabelsysteme: Prognose der Temperaturverteilung und der Dichteänderung	83
8.2	Ausweitung der Trinkwassergewinnung in die östliche Süßwasserlinse	89
8.2.1	Nullvariante ohne Förderung.....	95
8.2.2	Vertikalbrunnen	95
8.2.3	Horizontalbrunnen.....	104
9	Zusammenfassung und Bewertung der Berechnungsergebnisse.....	109
10	Literatur	113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Insel Langeoog, Lage der Süßwasserlinse (weiß) und der geplanten Kabeltrassen	9
Abbildung 2:	Skizze der Systemrandbedingungen in einem Vertikalschnitt (c – Konzentration, q – Quelle/Senke)	11
Abbildung 3:	Abhängigkeit der Sättigung S vom Kapillardruck p_c	16
Abbildung 4:	Abhängigkeit des relativen K-Wertes k_{rel} von der Sättigung S	16

Abbildung 5: Longitudinale Dispersivität in Abhängigkeit von der Ausbreitungslänge aus unterschiedlichen Feldversuchen (aus [20]).....	19
Abbildung 6: Geländeoberfläche der Insel Langeoog (interpoliert aus dem DGM1 des LGLN)	24
Abbildung 7: Angenommene Höhen der Vorflutpotentiale im Modellgebiet Langeoog	24
Abbildung 8: Sloppersee, Juli 2010 [35].....	25
Abbildung 9: Vertikalschnitt durch das 3D-Modell mit Zuordnung der Geologie	27
Abbildung 10: 3D-Ansicht der Begrenzungsflächen der geologischen Schichten im Modell (farbliche Abstufung für verschiedene Lagehöhen).....	27
Abbildung 11: Lage der Grundwassermessstellen und Angabe zur Information der Verfilterung.....	29
Abbildung 12: Jahresfördermengen der Brunnen im Modell 2018 [2].....	30
Abbildung 13: Jahresfördermengen der Brunnen auf Langeoog 1951-2022	30
Abbildung 14: Mittlere Fördermengen je Monat aus Tagesfördermengen 2019-2023	31
Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der täglichen Abweichung vom Monatsmittel aus Tagesfördermengen 2019-2023	31
Abbildung 16: Aus den Jahresfördermengen stochastisch generierte tägliche Fördermengen für die Jahre 1951-2018.....	32
Abbildung 17: Vergleich der stochastisch generierten täglichen Fördermengen (links) mit den gemessenen täglichen Fördermengen (rechts)	32
Abbildung 18: Prozess-Komponenten (vereinfachte Prinzipskizze)	34
Abbildung 19: RUBINFLUX-Workflow (vereinfachte Prinzipskizze) (links) und Prozessgrößen (rechts)	35
Abbildung 20: Einflussgrößen für die Abflussberechnung nach SCS-Verfahren.....	37
Abbildung 21: RUBINFLUX-Entleerungsfunktion für den Bodenspeicher (Θ_{FK} Bodenwassergehalt bei Feldkapazität [%], Θ_{PWP} Bodenwassergehalt bei Permanentem Welkepunkt [%], $\Theta(t)$ aktueller Bodenwassergehalt [%], Θ_{nFK} nutzbare Feldkapazität [%]).....	41
Abbildung 22: Ableitung des Hydrologischen Bodentyps und der Bodenartengruppe aus den Bodenarten nach KA5 [19].....	43
Abbildung 23: Flächen für die Zuordnung der Boden-Parameter im Modell entspr. Tabelle 9	44
Abbildung 24: Im Modell zugewiesene Flächennutzungen	45
Abbildung 25: Im Modell zugewiesene Versiegelungsgrade in % [40]	45
Abbildung 26: Exemplarische Zeitreihe der Wetterdaten für RUBINFLUX (Ausschnitt).....	46
Abbildung 27: Berechnete Jahressummen der Grundwasserneubildung 1971-2020	48
Abbildung 28: Berechnete flächendifferenzierte Grundwasserneubildung der Verfahren mGROWA22 (oben) und RUBINFLUX (unten)	50

Abbildung 29: Gegenüberstellung berechneter Basisabflusszeitreihen auf der Basis der Neubildung (Monatswerte) aus mGROWA (rot) und RUBINFLUX (schwarz) mit der gemessenen Zeitreihe (orange) am Pegel in einem mittelgroßen Einzugsgebiet	51
Abbildung 30: Gegenüberstellung berechneter Basisabflusszeitreihen auf der Basis der Neubildung (Monatswerte) aus mGROWA (rot) und RUBINFLUX (schwarz) sowie der von SPRING berechneten Abflussganglinie mit Direktabfluss (Neubildung in Tageswerten) (blau) mit der gemessenen Zeitreihe (orange) am Pegel in einem mittelgroßen Einzugsgebiet.....	51
Abbildung 31: Zusammenhang zwischen der Konzentration c [kg/kg] in SPRING und der Dichte ρ [kg/m ³]	53
Abbildung 32: Modellkonzept der temperaturrelevanten Randbedingungen (schematisch)	53
Abbildung 33: Lage der im Modell zu berücksichtigenden Kabeltrassen mit 3 ONAS im Trassenkorridor C6a und 5 ONAS im Trassenkorridor C6b	55
Abbildung 34: Beispielhafter Verlauf eines Erdkabels von der Oberfläche bis zur maximalen Tiefe mit Übergangsbereich	55
Abbildung 35: Konzeptmodell Modellrand, Vertikalschnitte der 3 Varianten	58
Abbildung 36: Konzeptmodell Modellrand in 3 Varianten: Randstreifenbreite von 0 m (oben), 180 m (mitte) und 570 m (unten)	59
Abbildung 37: Interaktion Gewässer-Grundwasser bei Gewässervernetzung	60
Abbildung 38: Lokale Verfeinerung des horizontalen Modellnetzes in der Umgebung von potentiellen Brunnenstandorten im Osten der Insel Langeoog.....	63
Abbildung 39: Lokale Verfeinerung des horizontalen Modellnetzes in der Umgebung der geplanten Kabeltrassen.....	63
Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Elementlängen im horizontalen Modellnetz.	64
Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Elementqualität.	65
Abbildung 42: Vertikale Diskretisierung im Modellgebiet.....	66
Abbildung 43: Finite-Elemente-Netz des Modells Insel Langeoog mit Gewässernetz (blaue Linien), bestehenden und potentiellen Brunnenstandorten sowie geplanten Kabel-trassen im Osten der Insel	67
Abbildung 44: Schnitt zur Erstellung des Vertikalmodells.	69
Abbildung 45: Generierung eines 2D-Vertikalmodells entlang einer Stromlinie aus [22].....	70
Abbildung 46: Vergleich der Ergebnisse aus dem 3D-Modell (oben) und dem 2D-Vertikalmodell in Schnitt 2 (unten)	70
Abbildung 47: Konstruierter Grundwassergleichenplan, Markierungen für Gewässer, Kabeltrassen, Brunnen (Dreiecke) und Grundwassermessstellen (Kreise)	72

Abbildung 48: Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen (stationär) an den Grundwassermessstellen (blaue ausgefüllte Kreise) im Bereich Brunnenfeld West, im Hintergrund: Brunnenfeld West (Dreiecke).....	73
Abbildung 49: Scatterplot der gemessenen und berechneten Grundwasserstände (stationär) [mNHN]	74
Abbildung 50: Instationäre Kalibrierung: Überblick der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien, Umrandung von Teilgebieten für Detaildarstellungen.....	75
Abbildung 51: Instationäre Kalibrierung: Detail 1 der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien	75
Abbildung 52: Instationäre Kalibrierung: Detail 2 der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien	76
Abbildung 53: Instationäre Kalibrierung: Detail 3 der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien	76
Abbildung 54: Instationäre Kalibrierung: Berechnete (blau) und gemessene (rot) Ganglinie an ausgewählten Messstellen.....	77
Abbildung 55: Ausgangszustand: Vertikalschnitt durch das Brunnenfeld West mit geologischen Schichten (Nummerierung gemäß Tabelle 13) und Grundwassergleichen (blaue Linien)	79
Abbildung 56: Ausgangszustand Süß- und Salzwasser: Horizontalschnitte mit Konzentrationen größer als 0,25 g/l.....	80
Abbildung 57: Mächtigkeit der Süßwasserlinse und der Übergangszone zum Salzwasser im Modell bei einer Breite von 2500 m	81
Abbildung 58: Stationäre Temperaturverteilung auf der Höhe von -32,72 mNHN, Lage des Vertikalschnitts West-Ost	83
Abbildung 59: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt West – Ost (Überhöhung 1:10, 1:1) mit GW-Potentiallinien	84
Abbildung 60: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd entlang des Kabels West, NOR-14-1 IBN 2032 Blockland/neu, Überhöhung 1:10 (oben), Überhöhung 1:1 (unten).....	85
Abbildung 61: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd (Überhöhung 1:10) entlang des metallischen Rückleiters, NOR-14-1 IBN 2032 Blockland/neu.....	85
Abbildung 62: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd (Überhöhung 1:10) entlang des HVDC-Kabels Ost, NOR-19-2 IBN 2037 SR Ried.....	86
Abbildung 63: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd (Überhöhung 1:10) entlang des HVDC-Kabels Ost, NOR-20-1 IBN 2039 SR Rastede	86
Abbildung 64: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt West – Ost (Überhöhung 1:1) mit GW-Potentiallinien, Strömungsfeld mit Temperaturverteilung (Überhöhung 1:1, Zoom Kabelbündel im östlichen Korridor C6b).....	87

Abbildung 65: Stationäres Strömungsfeld mit Temperaturverteilung in 5 Vertikalschnitten (Überhöhung 1:1), Lage der Schnitte.....	88
Abbildung 66: Stationäre Reduktion der Dichte aufgrund der Wärmeausbreitung im Vertikalschnitt West – Ost.....	89
Abbildung 67: Brunnenfeld Ost: Lage der vom OOWV vorausgewählten Flächen für Brunnen	90
Abbildung 68: Upconing (übernommen aus [27])	91
Abbildung 69: Einflussparameter Upconing	92
Abbildung 70: Grundwasseroberfläche und Flurabstände in der westlichen Süßwasserlinse ohne Trinkwasserförderung (oben) und mit Trinkwasserförderung (unten)	93
Abbildung 71: Differenz der Grundwasseroberfläche in der westlichen Süßwasserlinse zwischen den Zuständen ohne und mit Trinkwasserförderung bei einer Dispersivität von 60 m	94
Abbildung 72: Salzkonzentrationen in einem Nord-Süd-Vertikalschnitt durch das westliche Brunnenfeld für den Zustand ohne Trinkwasserförderung (oben) und mit Trinkwasserförderung (unten)	94
Abbildung 73: Brunnenfeld im Osten: Nullvariante ohne Förderung, Flurabstände.....	95
Abbildung 74: Brunnenfeld im Osten: Lage der Vertikalbrunnen für die Prognoserechnung	96
Abbildung 75: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Vergleich der Konzentrationen im Vertikalschnitt A-E für die Zustände (i) ohne Förderung, (ii) Gesamtförderung 100.000 m ³ /a, (iii) Gesamtförderung 150.000 m ³ /a.....	97
Abbildung 76: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Grundwasseroberfläche und Konzentrationen > 0,25 g/l an der freien Oberfläche bei einer Gesamtfördermenge von 100.000 m ³ /a (oben) bzw. 150.000 m ³ /a (unten).....	98
Abbildung 77: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m ³ /a, Strömungsfeld und Konzentrationen, Vergleich zwischen Rechnung ohne und mit Dichteabhängigkeit	99
Abbildung 78: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m ³ /a, Grundwasseroberfläche und Flurabstände	100
Abbildung 79: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m ³ /a, Differenz der Grundwasseroberfläche zum Nullzustand.....	101
Abbildung 80: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m ³ /a, Bahnlinien (für jeden Brunnen jeweils farblich abgesetzt), Grundwasseroberfläche, Konzentrationen an der freien Oberfläche, Lage der Kabeltrassen	102
Abbildung 81: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m ³ /a, Bahnlinien (für jeden Brunnen jeweils farblich abgesetzt), Grundwasseroberfläche, Konzentrationen an der freien Oberfläche.....	103
Abbildung 82: Brunnenfeld im Osten: Lage der Horizontalbrunnen für die Prognoserechnung	104

Abbildung 83: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Vergleich der Konzentrationen im Vertikalschnitt A-E für die Zustände (i) ohne Förderung, (ii) Gesamtförderung 100.000 m³/a, (iii) Gesamtförderung 150.000 m³/a..... 105

Abbildung 84: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Grundwasseroberfläche und Flurabstände 106

Abbildung 85: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Differenz der Grundwasseroberfläche zum Nullzustand 107

Abbildung 86: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Bahnlinien (für jeden Brunnen jeweils farblich abgesetzt)..... 108

Abbildung 87: Lage der Süßwasserlinse anhand von HEM-Daten mit Markierungen für Brunnenfeld West, untersuchtes Brunnenfeld Ost sowie geplante Kabeltrassen 111

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameter der VAN GENUCHTEN Funktion..... 15

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Datengrundlagen 23

Tabelle 3: Zuordnung der geologischen Schichten auf Modellschichten 26

Tabelle 4: Durchlässigkeitsbeiwerte (Startwerte) der geologischen Schichten im Modell 28

Tabelle 5: Lage der Filter der Brunnenmessstellen und ihre Zuordnung im 3D-Modell 33

Tabelle 6: Klassifizierung der Bodenfeuchteklasse [11]..... 37

Tabelle 7: Klassifizierung des Hydrologischen Bodentyps nach [17] 38

Tabelle 8: Übersicht der benötigten Prozess-Parameter zur Ermittlung der Grundwasserneubildung nach der Methode RUBINFLUX..... 42

Tabelle 9: Ableitung der Boden-Parameter [18]..... 44

Tabelle 10: Flächennutzungsgruppen mit der in SPRING vergebenen Kennzahl 44

Tabelle 11: Vergleich der mittleren Jahressummen der Grundwasserneubildung für die Verfahren mGROWA22 und RUBINFLUX 49

Tabelle 12: Parameter für die Berechnung des Wärmetransports..... 56

Tabelle 13: Kalibrierte Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten der geologischen Schichten im Modell..... 78

Tabelle 14: Vergleich der Mächtigkeiten der Süßwasserlinse nach verschiedenen Methoden..... 81

Tabelle 15: Mächtigkeiten der Süßwasserlinse mit verschiedenen Fördermengen..... 82

1 Veranlassung und Zielsetzung

Der Ausbau der Offshore-Windenergie wird einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Ziele des Klimaschutzprogramms 2030 leisten. Die rechtlichen Voraussetzungen für den erforderlichen Offshore-Ausbau wurden insbesondere im Rahmen der Novellierung des Windenergie-auf-See-Gesetzes (WindSeeG) geschaffen, indem die zu installierende Leistung von Windenergieanlagen auf See zuletzt 2023 deutlich erhöht wurde (§ 1 Abs. 2 WindSeeG).

Um diese Offshore-Ziele umsetzen zu können, sind Offshore-Netzanbindungssysteme (ONAS) zum Anschluss der Offshore-Windparks an das landseitige Übertragungsnetz erforderlich.

Im Flächenentwicklungsplan (FEP), der die Festlegungen des WindSeeG konkretisiert, wird für die ONAS bestimmt, über welchen Grenzkorridor diese in die 12-Seemeilen-Zone und damit in das Küstenmeer geführt werden sollen.

Für den Grenzkorridor N-III wird die Führung von ONAS über die Inseln Baltrum und Langeoog untersucht. Hierzu wurde 2020/2021 das Raumordnungsverfahren (ROV) „Seetrassen 2030“ durchgeführt. In der Landesplanerischen Feststellung vom 18.10.2021 wurde durch das Amt für regionale Landesentwicklung (ArL) Weser- Ems festgestellt, dass der Baltrum-Korridor unter Beachtung von Maßgaben mit den Erfordernissen der Raumordnung vereinbar ist. Im Ausblick der Landesplanerischen Feststellung wurde weiterhin dargelegt, dass über den Baltrum-Korridor hinaus weitere Netzanbindungssysteme erforderlich werden und beim Langeoog-Korridor „keine rechtlichen Verbotstatbestände oder verletzten Ziele der Raumordnung bestehen“.

Auf Grundlage der festgelegten Offshore-Ausbauziele und der Ergebnisse des ROV „Seetrassen 2030“ wurde die delta h Ingenieurgesellschaft mbH (delta h) im Rahmen der Fortsetzung der Prüfung des Langeoog-Korridors von Amprion Offshore GmbH (AOS) und TenneT Offshore GmbH (TOG) im Jahr 2022 beauftragt, die Verträglichkeit der Errichtung und des Betriebs von ONAS mit der Trinkwassergewinnung auf Langeoog zu prüfen.

Bei einer Trassenführung über den Grenzkorridor N-III und Langeoog würde die Insel Langeoog, vergleichbar mit bereits umgesetzten Vorhaben im Norderney II-Korridor oder mit den geplanten Baltrum-Systemen, mittels Horizontalbohrungen unterquert werden. Dabei wird auch die Süßwasserlinse (Abbildung 1) gequert, die auf der Insel Langeoog zur Trinkwassergewinnung genutzt wird. Die Mächtigkeit der Linse erreicht auf der Insel Langeoog zwischen 54 m und 64 m. Die Trinkwassergewinnung erfolgt aktuell im westlichen Teil der Süßwasserlinse. Die Horizontalbohrungen würden die Süßwasserlinse im östlichen Teil der Süßwasserlinse, der bisher nicht zur Trinkwassergewinnung genutzt wird, queren.

Zwar liegen bereits Gutachten zu möglichen Auswirkungen auf die Süßwasserlinse durch die Errichtung von ONAS vor. Diese Gutachten betrachten allerdings den Einfluss der baulichen Ausführung auf das Grundwasser. Zu einem möglichen Einfluss von Horizontalbohrungen auf die Süßwasserlinsen unter Langeoog und Baltrum wurde im Auftrag des Übertragungsnetzbetreibers (ÜNB) TenneT Offshore GmbH eine Risiko- und Gefährdungsanalyse von der Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH (BIG)

erstellt (Bericht vom 17.06.2021, [28]). Im Nachgang wurde am 09.07.2021 eine ergänzende Stellungnahme vorgelegt [29].

Um darüber hinaus auch mögliche betriebsbedingte Auswirkungen der ONAS vertieft zu untersuchen, sollte ein gekoppeltes Grundwasserströmungs-, Dichte- und Wärmemodell entwickelt werden, um belastbare Aussagen und Prognosen zur Vereinbarkeit der ONAS mit einer Trinkwassernutzung auf Langeoog ableiten zu können. Insbesondere vor dem Hintergrund einer zukünftigen Erschließung der östlichen Süßwasserlinse zur Trinkwassergewinnung ist auch die mögliche betriebsbedingte Beeinflussung des Grundwassers zu untersuchen. Dabei steht die durch die geplanten Erdkabelsysteme verursachte Wärmeausbreitung, aber auch die Interaktion der Süß- und Salzwasserkörper, im Mittelpunkt der Betrachtung.

Die Ergebnisse der Modellierung sollen im Rahmen einer fachgutachterlichen Bewertung als Nachweis der Verträglichkeit, i.S. einer Sicherstellung der zukünftigen Trinkwassergewinnung bei Realisierung von acht ONAS in zwei verschiedenen Korridoren (C6a, C6b), die Gegenstand der Untersuchungen im ROV „Seetrassen 2030“ waren, zugrunde gelegt werden können.

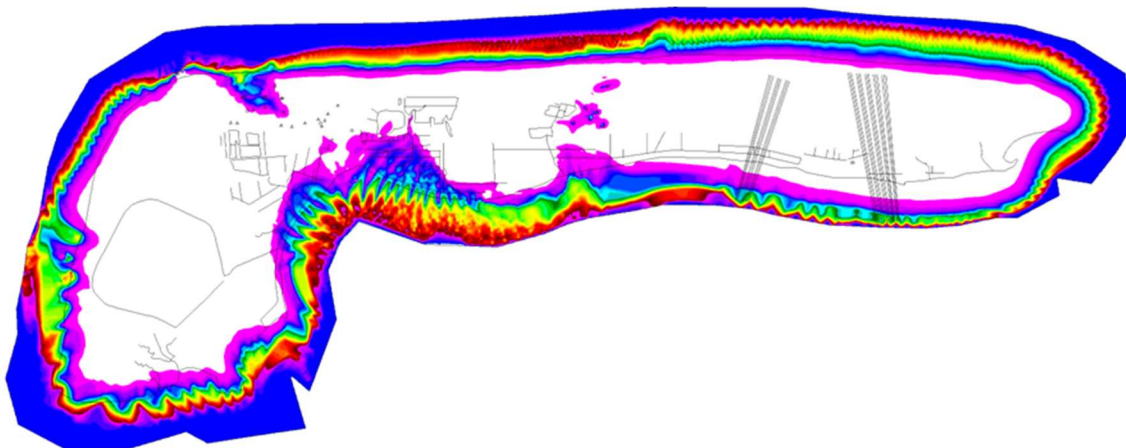


Abbildung 1: Insel Langeoog, Lage der Süßwasserlinse (weiß) und der geplanten Kabeltrassen

2 Einordnung des Modells

Vor dem Hintergrund der Trinkwassergewinnung aus der Süßwasserlinse wurden 2000 (Diplomarbeit von B. Michaelis, TU Braunschweig) und 2004 (Dissertation von K. Naumann, TU Braunschweig) bereits erste 3D-Modelle von Teilgebieten der Insel Langeoog erstellt, dabei wurden jedoch die Dichteunterschiede zwischen Süß- und Salzwasser nicht berücksichtigt [2]. Das erste Modell, das die komplette Insel modelliert und Dichteunterschiede berücksichtigt, wurde durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe erstellt und ist in [2] dokumentiert. Es wird im folgenden Modell 2018 genannt.

Die wichtigsten abzubildenden Prozesse nach [2] sind:

- Das Niederschlagswasser, welches durch die Geländeoberfläche infiltriert, verdrängt das sich unter der Insel befindliche Meerwasser.

- Zwischen Salz- und Süßwasser besteht eine Übergangsschicht (Interface), deren Position vom Ghyben-Herzberg-Prinzip definiert wird: Je höher der Grundwasserspiegel (oberhalb NHN) im Gleichgewichtszustand ist, umso tiefer reicht die Süßwasserlinse unter der Insel, wobei das Verhältnis angenähert 1:40 beträgt [31].
- Der Wasserstand ist abhängig von verschiedenen Parametern, wie der hydraulischen Leitfähigkeit, der Grundwasserneubildungsrate und dem Dichtekontrast zwischen Süß- und Salzwasser.
- Die Süßwasserlinse besteht nur deshalb, weil sie kontinuierlich mit Neubildungswasser versorgt wird. Die Linse wird ständig neu gebildet, denn alles in ihr enthaltene Süßwasser strömt unaufhörlich der Ausflusszone im Strandbereich zu. Würde die Grundwasserneubildung aufhören, so würde das Salzwasser mit der höheren Dichte das Süßwasser verdrängen, bis die Linse verschwunden wäre.
- Die Fließpfade in der Linse verlaufen dabei anfangs annähernd vertikal, bis sie in die Salz-Süßwassermischungszone übergehen, wo das Wasser an der Inselbegrenzung ins Meer fließt. Das Wasseralter, definiert als die Zeit, die sich ein Wasserpartikel seit seiner Neubildung im Untergrund befindet, nimmt dabei entlang eines Fließpfades, und damit innerhalb der Süßwasserlinse mit der Tiefe, zu [30].

Das hier neu erstellte Modell hat sich zunächst in der Geometrie und der Wahl der Randbedingungen an dem in [2] erstellten Modell orientiert und wurde dann in wesentlichen Punkten weiterentwickelt. Die wichtigsten Unterschiede zu den bisherigen Modellierungen sind:

- Die Breite des Meeresstreifens zwischen Küstenlinie und Modellrand wurde auf 570 m reduziert. Ziel der Reduktion war eine Reduktion der Knotenanzahl des horizontalen Netzes, um das Netz vertikal stärker verfeinern zu können, ohne zu lange Rechenzeiten zu erzeugen. Eine stärkere Verfeinerung in vertikaler Richtung ist notwendig, um numerische Instabilitäten am Übergang zwischen Süß- und Salzwasser zu vermeiden.
- Die geologischen Schichten wurden entsprechend des vorliegenden geologischen Untergrundmodells feiner aufgelöst. Dadurch entstanden insgesamt 14 verschiedene Durchlässigkeitsbereiche. Ziel dieser Erweiterung war es, die vorhandenen neuen Informationen zum Untergrund im Modell zu berücksichtigen und damit die Gesamtaussagequalität des Modells zu verbessern.
- Die Anzahl der vertikalen Elementschichten im dreidimensionalen Finite-Elemente-Netz war mit 108 wesentlich höher als die im Modell 2018 verwendeten 25 Schichten. Die maximale Schichtmächtigkeit beträgt 10 m, die minimale Schichtmächtigkeit liegt unter 2,0 m. Ziel der stärkeren vertikalen Verfeinerung war die verbesserte Abbildung vertikaler Strömungskomponenten unter Vermeidung numerischer Instabilitäten am Süß-Salzwasser-Übergang.
- Die Geländeoberfläche wurde mit einem DGM1 (statt DGM30) interpoliert. Das Graben- und Vorflutersystem wurde sehr detailliert im Modell abgebildet. Ziel dieser Erweiterung war die verbesserte Abbildung der Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktion, die sich umgekehrt wieder auf das Grundwasserströmungssystem auswirkt.
- Es wurde eine instationäre Grundwasserneubildung in Tagesschritten als Randbedingung an der Oberfläche auferlegt. Die zeitliche Dynamik der Grundwasserstände und damit der Ausprägung der Süßwasserlinse hängt im Wesentlichen von der zeitlichen Dynamik der

Grundwasserneubildung ab. Um diese Dynamik im Modell richtig abbilden zu können, ist die Verwendung einer instationären Grundwasserneubildung unabdingbar.

- Die Förderraten der Brunnen wurden instationär ebenfalls in Tagesschritten abgebildet, um die zuvor erwähnte Dynamik der Ausprägung der Süßwasserlinse richtig abbilden zu können, insbesondere vor dem Hintergrund der jahreszeitlich stark schwankenden Entnahmemengen durch den Tourismus.
- Das Modell wurde aufgrund der aktuellen Fragestellung zum Einfluss der geplanten Kabelsysteme um die Komponente Wärmetransport erweitert.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über das Modellkonzept und die wichtigsten Systemrandbedingungen in einem stark vereinfachten Vertikalschnitt in Nord-Süd-Richtung durch die Insel.

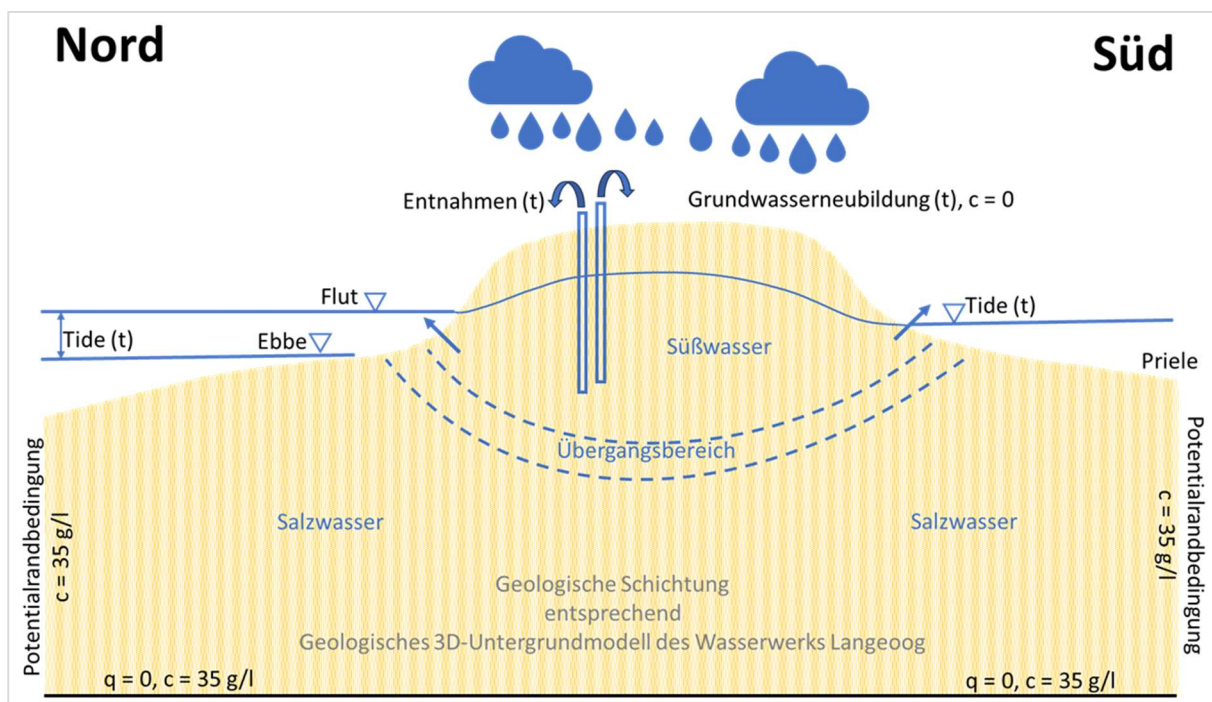


Abbildung 2: Skizze der Systemrandbedingungen in einem Vertikalschnitt (c – Konzentration, q – Quelle/Senke)

2.1 Leistungsmerkmale der numerischen Berechnung

Die wichtigsten Leistungsmerkmale der numerischen Berechnung sind hier zusammengefasst:

- 3D-Modell mit 14 Mio. Knoten, instationäre Berechnung über 30 Jahre in Tagesschritten => 10.950 Zeitschritte
- Gesättigt / ungesättigte Berechnung: Anwendung der Richards-Gleichung mit nichtlinearem Van-Genuchten-Modell (Druck-Sättigungsfunktionen und Funktionen für den relativen K-Wert)
- Ortsdiskretisierung mit linearen und bilinearen finiten Elementen, horizontale Diskretisierung 2 - 30 m, vertikale Diskretisierung 2,5 – 10 m
- Zeitdiskretisierung der instationären Strömungsgleichung mit einem impliziten Eulerverfahren

- Zeitdiskretisierung der Transportgleichung: Implizites Operator-Split-Verfahren mit einer Streamline-Upwind-Technik mit iterativem PCG (Preconditioned Conjugate Gradient)-Verfahren
- Ermittlung einer instationären Neubildung auf Tagesbasis, Abbildung von Niedrigwasser- und Hochwasserzuständen
- Dichteabhängige Rechnung für Salz-/Süßwasserrechnung
- Kopplung Grundwassermodell mit Niederschlags-Abfluss-Modell
- Nichtlineares Vorflutmodell mit Manning-Strickler-Ansatz
- Iteration der Nichtlinearitäten (gesättigt / ungesättigte Strömung, Kopplung von Strömung- und Stofftransport über die Dichte und die Viskosität, Mengenbeschränkung bei Leakage-Randbedingungen) über eine Picard-Iteration
- Untersuchung / Vergleich des 3D-Modells (Schnitt) mit einem 2D-Vertikalmodell
- Instationäre Kalibrierung über einen Zeitraum von 4 Jahren
- Viskositätsabhängige Rechnung für den Temperatureinfluss der Kabeltrassen
- Berechnung Wärmeausbreitung für den Betriebszustand mit gleichzeitigem Betrieb aller Kabel und 100% Auslastung
- Betrachtete Varianten Trinkwasserförderung:
 - Nullvariante: Ohne Förderung
 - Süßwasserrechnung
 - Mit Förderung im Westen, ohne Förderung im Osten
 - Vertikalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 100.000 m³/a
 - Vertikalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a
 - Horizontalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 100.000 m³/a
 - Horizontalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a

2.2 Modellgüte

Bei der Modellierung wurden die einschlägigen Richtlinien in DVGW-Arbeitsblatt W107 [24] und GeoBerichte 15 des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) [25] berücksichtigt, um eine hohe Modellgüte zu erzielen. Nach dem DVGW-Arbeitsblatt W107 [24] lässt sich das erstellte Modell wie folgt kategorisieren:

- Prozesse: Strömungsmodell, Transportmodell, dichtegekoppeltes Modell

Das hier vorgestellte Modell bildet die Grundwasserverhältnisse bei gemeinsamen Vorkommen von Süß- und Salzwasser ab. Es berücksichtigt neben der Strömung und dem Transport (Salzkonzentration) über die Dichte auch die Rückkopplung vom Transportmodell zum Strömungsmodell und ist damit ein dichtegekoppeltes Modell.

- Modellgröße: Mittelmaßstäbliches Modell

Der Modellraum umfasst die gesamte Landfläche (ca. 20 km²) der Insel Langeoog zusätzlich erweitert um einen Streifen von ca. 570 m um die Insel. Die Gesamtmodellfläche beträgt damit ca. 37 km².

- Räumliche und zeitliche Modelldimension: Instationäres 3-dimensionales Modell

Das Modell ist ein vollständiges 3-dimensionales Modell, bei dem die Modelloberkante durch die Geländeoberfläche beschrieben wird. Die Modellunterkante liegt unterhalb der Quartärbasis bei -130 mNHN. Das Modell rechnet instationär über 30 Jahre in Tagesschritten.

- Wiedergabetreue: Planungsmodell, Bewirtschaftungsmodell

Das Modell beschreibt die Hydrodynamik des Grundwassers im Aussagegebiet, das der gesamten Insel Langeoog entspricht. Die Grundwasserneubildung wurde flächendifferenziert und instationär in Tagesschritten berechnet. Das Modell wurde anhand der vorliegenden Grundwasserganglinien über 4 Jahre instationär kalibriert. Damit ist das Modell in der Lage, die Reaktion des geohydraulischen Systems auf veränderte Randbedingungen, z. B. durch zusätzliche Entnahmen im Osten der Insel, zu prognostizieren.

Das Modell kann als Bewirtschaftungsmodell sowohl für Fragestellungen der Wärmeausbreitung als auch für die Trinkwassergewinnung verwendet werden.

Für die korrekte Abbildung der jahreszeitlichen Schwankungen an der Geländeoberfläche ist eine Kalibrierung der Wärmeparameter erforderlich. Die Temperaturen können nicht direkt als Randbedingung an der Geländeoberfläche angegeben werden, da dies verhindern würde, dass in der Simulation Wärme vom Kabel über die Geländeoberfläche abgeführt werden kann. Stattdessen wird in den Berechnungsmodellen mit einer dünnen Luftschicht oberhalb der Geländeoberfläche gearbeitet. Um den Wärmeübergang von der Luft zum Erdreich korrekt abzubilden, müssen alle entsprechenden Parameter kalibriert werden. Da es hierbei lediglich um die Kalibrierung des Simulationsprinzips geht, kann für die Kalibrierungsphase jeder beliebige Standort mit geeigneten Messdaten verwendet werden. Für den Standort Langeoog selbst liegen keine Messungen vor. Daher wird hierfür auf die Daten aus dem von Amprion beauftragten Versuchsaufbau im „Freiburger Experiment“ [26] zurückgegriffen.

3 Theoretische Grundlagen der Berechnung

Die für die Grundwassermodellierung eingesetzte Software ist das Programmsystem SPRING. Es ermöglicht die Berechnung von 2D- und 3D-Grundwasserströmungs-, Wärme- und Stofftransportmodellen. SPRING basiert auf der numerischen Finite-Elemente-Methode und erlaubt die Kombination von instationären, dichte- und viskositätsabhängigen Strömungs- und Wärmetransportberechnungen.

Zur Berechnung der dreidimensionalen instationären gesättigten / ungesättigten dichteabhängigen Strömungs- und Wärmetransportgleichung wird das Programmmodul SITRA des Programmsystems SPRING eingesetzt. Das Programmmodul weist in Bezug auf die hier betrachtete Problemstellung

- instationäre Strömung / Wärmetransport
- dichteabhängige Strömung
- gesättigte / ungesättigte Verhältnisse

folgende Leistungsmerkmale auf:

- Für die Ortsdiskretisierung werden (je nach Elementtyp) lineare bzw. bilineare Finite Elemente verwendet. Dreiecke und Vierecke für 2-dimensional-ebene Fragestellungen und Tetraeder-, Pentaeder- und Hexaeder-Elemente für dreidimensionale Problemstellungen.
- Die instationäre Strömungsgleichung wird mit einem impliziten Eulerverfahren diskretisiert (Crank – Nicolson).
- Für die Zeitdiskretisierung der Transportgleichung wird ein implizites Operatorsplitverfahren mit streamline-upwind Technik verwendet.
- Für die Berechnung gesättigter / ungesättigter Strömung wird die Richards-Gleichung mit Druck-Sättigungs-funktionen und Funktionen für die relative Permeabilität nach VAN GENUCHTEN verwendet.
- Die Nichtlinearitäten (gesättigt / ungesättigte Strömung, Kopplung von Strömung und Stofftransport über die Dichte und Viskositäten, Mengenbeschränkung bei Leakage-Randbedingungen) werden über eine PICARD-Iteration iteriert.

3.1 Die Strömungsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung und das Gesetz von DARCY können entweder mit dem Potential h oder mit dem Wasserdruck p als Variable mathematisch beschrieben werden. Dichteabhängige Strömungsverhältnisse lassen sich allerdings am besten über eine Formulierung mit dem variablen Wasserdruck p erfassen. Zudem sind bei Berechnungen mit über die Zeit schwankender Grundwasseroberfläche (gesättigte / ungesättigte Verhältnisse) die Größen „Sättigung“ und „relative Permeabilität“ zu berücksichtigen, für die in der Literatur empirische Funktionen in Abhängigkeit vom Druck angegeben sind.

Das Gesetz von HUBBERT liefert die Beziehung zwischen dem Druck p [N/m^2], dem Potential h [m] und der Lagehöhe z [m]:

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad (1)$$

mit

- h = Potential [m],
 z = Lagehöhe [m],
 p = Druck [N/m²],
 ρ = Dichte [kg/m³],
 g = Fallbeschleunigung [m/s²].

Für die Filtergeschwindigkeiten v_f [m/s] gilt das generalisierte Gesetz von DARCY

$$\mathbf{v}_f = -\frac{\mathbf{k} k_r}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla z) \quad (2)$$

mit

- \mathbf{k} = symmetrischer Tensor der Permeabilität [m²],
 k_r = $k_r(S_r)$ relative Permeabilität nach VAN GENUCHTEN [-], mit
 S_r = $S_r(p)$ Sättigungsgrad nach VAN GENUCHTEN [-],
 μ = dynamische Viskosität [kg/(m s)],
 ∇ = $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$
 z = Lagehöhe [m],
 p = Druck [N/m²],
 ρ = Dichte [kg/m³],
 g = Fallbeschleunigung [m/s²].

Für die gesättigt/ungesättigte Berechnung wurde ein Parametersatz für die VAN GENUCHTEN Funktionen $k_r(S_r)$ und $S_r(p)$ verwendet. In Abhängigkeit der Wasserdurchlässigkeit, die als Index für den Bodentyp angesehen werden kann, wurden die Parameter aus Tabelle 1 angesetzt. Um unrealistische Gesamtdurchlässigkeiten zu vermeiden, wurden außerdem die relativen Permeabilitäten nach unten auf 0,0001 begrenzt (siehe auch Abbildung 3 und Abbildung 4).

Tabelle 1: Parameter der VAN GENUCHTEN Funktion

Parameter	Wert
Bodentyp	1
Maximale Sättigung S_s [-]	1,0
Restsättigung S_{res} [-]	0,2
Wassereintrittsdruck p_e [N/m ²]	400
Kurvenparameter	1,35
Untere Schranke des relativen K-Werts $k_{rel,MIN}$ [-]	0,0001

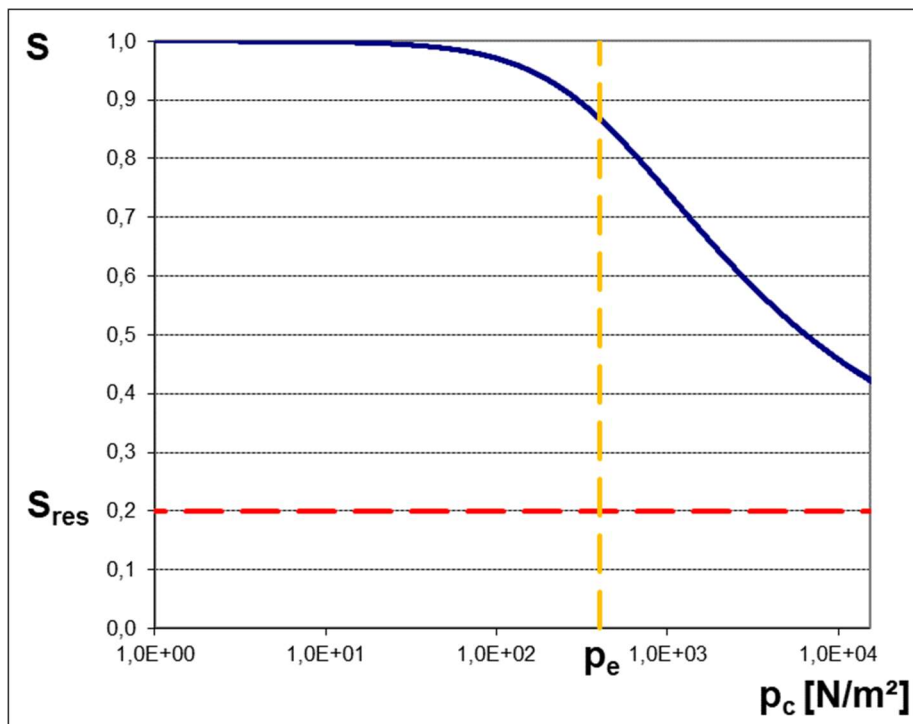


Abbildung 3: Abhängigkeit der Sättigung S vom Kapillardruck p_c

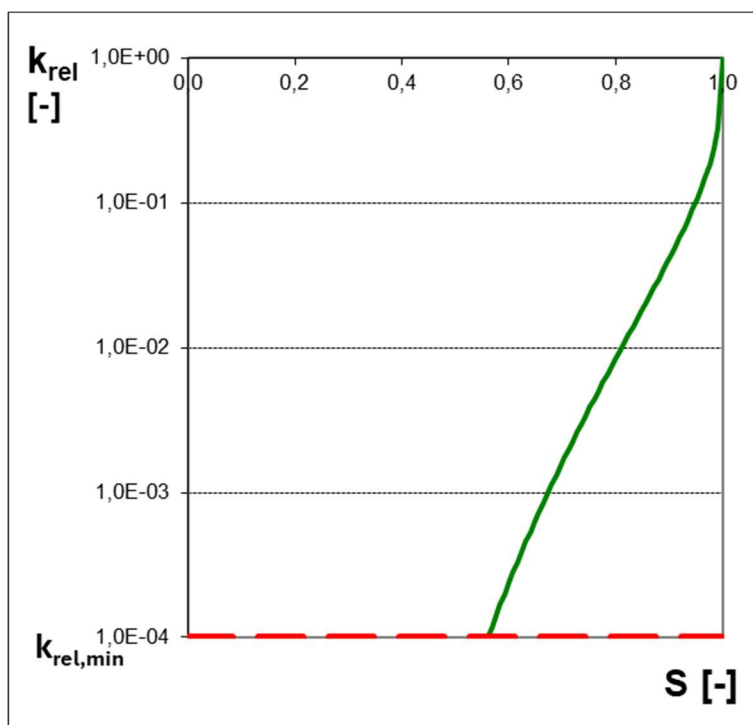


Abbildung 4: Abhängigkeit des relativen K -Wertes k_{rel} von der Sättigung S

Aus dem Gesetz der Massenerhaltung und dem generalisierten Gesetz von DARCY lässt sich die instationäre Druckgleichung herleiten:

$$\left[S_r \rho S_{op} + n \rho \frac{\partial S_r}{\partial p} \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\rho \mathbf{k} k_r}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla z) \right] = q \tag{3}$$

mit

\mathbf{k} = symmetrischer Tensor der Permeabilität [m^2],

k_r	=	$k_r(S_r)$ relative Permeabilität nach VAN GENUCHTEN [-], mit	
S_r	=	$S_r(p)$ Sättigungsgrad nach VAN GENUCHTEN [-],	
μ	=	dynamische Viskosität [kg/(m s)],	
∇	=	$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$	
z	=	Lagehöhe [m],	
p	=	Druck [N/m ²],	
ρ	=	Dichte [kg/m ³],	
g	=	Fallbeschleunigung [m/s ²].	
t	=	Zeit [s],	
n	=	Porosität des Grundwasserleiters [-],	
q	=	Quellen/Senkenterm [kg / (s m ³)],	
S_{op}	=	spezifischer Speicherkoeffizient [m s ² /kg],	
		$S_{op} = \alpha (1 - n) + \beta n$	(4)
α	=	Matrixkompressibilität [m s ² /kg],	
β	=	Fluidkompressibilität [m s ² /kg].	

Diese partielle Differentialgleichung wird ergänzt durch Randbedingungen:

- vorgegebener Druck (Randbedingung 1.Art, Dirichlet-RB),
- vorgegebener Zu- oder Abfluss (Randbedingung 2.Art, Neumann-RB),
- Leakagebeziehung mit Mengenbeschränkung (Randbedingung 3.Art, Cauchy-RB).

Zusätzlich wird eine Anfangsbedingung für den Startzeitpunkt benötigt:

- Anfangsdruck zum Startzeitpunkt t_0 der instationären Rechnung.

Die bei der Randbedingung 3. Art angeführte Mengenbeschränkung gibt die Möglichkeit, Maximalwerte für die In- und Exfiltrationsvolumina bei Leakagebeziehungen anzugeben. Ergeben sich nach der Lösung der Strömungsgleichung bereichsweise größere In- bzw. Exfiltrationsvolumina als die angegebenen Maximalwerte, so werden an den entsprechenden Knoten die Randbedingungen 3. Art ersetzt durch Randbedingungen 2. Art. Dabei werden die genannten Maximalwerte als Ex- bzw. Infiltrationsvolumina angesetzt. Danach wird die Strömungsgleichung erneut gelöst.

Werden Festpotentiale als Randbedingungen angesetzt oder für Leakage-Randbedingungen Vorfluthöhen eingegeben, so sind diese für die Druckformulierung in entsprechende Druckhöhen umzurechnen.

3.2 Die Transportgleichung eines gelösten Stoffes

Die Ausbreitung eines gelösten Stoffes (mit Konzentration c [kg_{Stoff}/kg_{Lösung}]) im porösen Medium wird grundsätzlich durch die folgenden Vorgänge beeinflusst:

- Nichtkonservative Transportprozesse wie Sorption, chemische oder biologische Abbaureaktionen.
- Advektiver / konvektiver Massenfluss j_k [(m kg)/(s kg)]:

$$\mathbf{j}_k = \mathbf{v} c \quad (5)$$

mit

\mathbf{v} = Abstandsgeschwindigkeit $\mathbf{v} = \mathbf{v}_f / n$ [m/s],

\mathbf{v}_f = Filtergeschwindigkeit [m/s],

n = Porosität des Grundwasserleiters [-],

- Diffusiver Massenfluss \mathbf{j}_m [(m kg)/(s kg)] (1. Ficksches Gesetz):

$$\mathbf{j}_m = -d_m \nabla c \quad (6)$$

mit

d_m = Diffusionskonstante [m²/s],

∇ = $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$

c = Konzentration [kg/kg]

- Hydromechanische Dispersion \mathbf{j}_d [(m kg)/(s kg)] durch unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten in den Poren bzw. die Porengrößenverteilung:

$$\mathbf{j}_d = -\mathbf{D} \nabla c, \quad (7)$$

mit

\mathbf{D} = symmetrischer Dispersionstensor [m²/s]

∇ = $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$

c = Konzentration [kg/kg]

Die Koeffizienten des symmetrischen Dispersionstensors \mathbf{D} [m²/s] sind nach [21] wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} D_{1,1} &= \alpha_L \frac{v_1^2}{v} + \alpha_{TH} \frac{v_2^2}{v} + \alpha_{TV} \frac{v_3^2}{v} & D_{2,1} &= D_{1,2} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{v_1 v_2}{v} \\ D_{2,2} &= \alpha_{TH} \frac{v_1^2}{v} + \alpha_L \frac{v_2^2}{v} + \alpha_{TV} \frac{v_3^2}{v} & D_{3,1} &= D_{1,3} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_1 v_3}{v} \\ D_{3,3} &= \alpha_{TV} \frac{v_1^2}{v} + \alpha_{TH} \frac{v_2^2}{v} + \alpha_L \frac{v_3^2}{v} & D_{3,2} &= D_{2,3} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{v_2 v_3}{v} \end{aligned} \quad (8)$$

mit $v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2} =$ Betrag der Abstandsgeschwindigkeit im kartesischen Koordinatensystem [m/s],

$v_1, v_2, v_3 =$ Komponenten der Abstandsgeschwindigkeit [m/s],

α_L = longitudinale Dispersivität [m],

α_{TH} = transversal-horizontale Dispersivität [m],

α_{TV} = transversal-vertikale Dispersivität [m].

Feldversuche (vgl. [20]) haben gezeigt, dass die Größenordnung der Dispersivitäten in einem porösen Medium unter anderem von der Größenordnung der beobachteten Ausbreitungslänge abhängt (Abbildung 5).

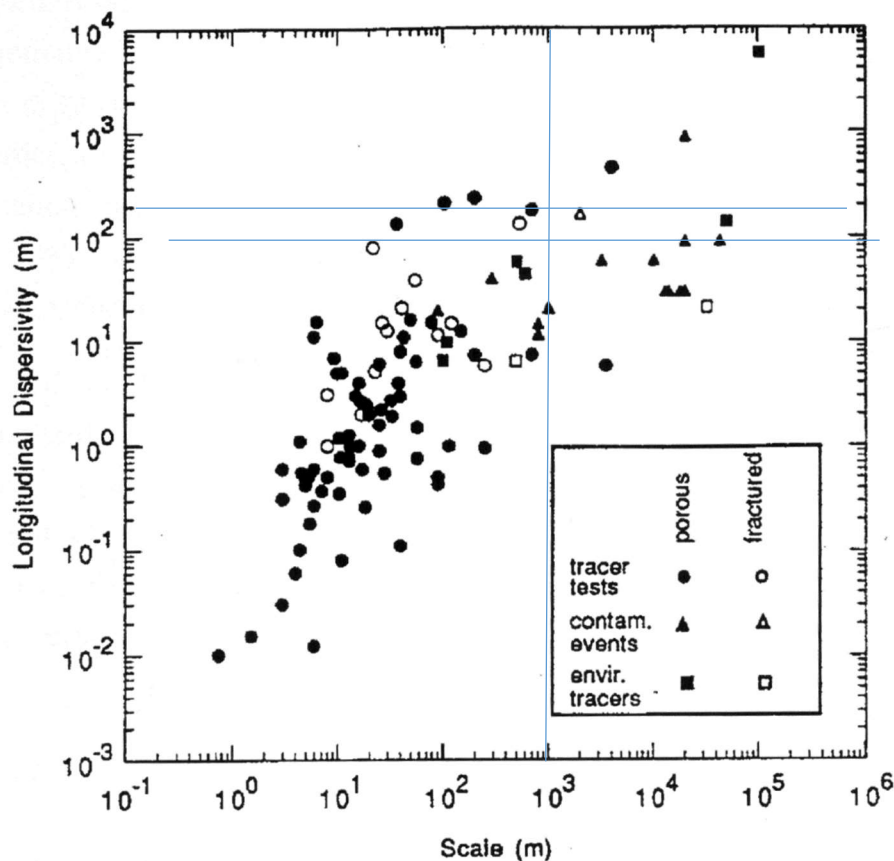


Abbildung 5: Longitudinale Dispersivität in Abhängigkeit von der Ausbreitungslänge aus unterschiedlichen Feldversuchen (aus [20]).

Das Gesetz der Massenerhaltung liefert die allgemeine Transportgleichung:

$$\frac{\partial(nS_r \rho c)}{\partial t} + \nabla(nS_r \rho(\mathbf{j}_k + \mathbf{j}_m + \mathbf{j}_d)) = qc^* + R_c + q_c \tag{9}$$

mit

- n = Porosität des Grundwasserleiters [-],
- S_r = S_r(p) Sättigungsgrad nach VAN GENUCHTEN [-],
- ρ = Dichte [kg/m³],
- c = Konzentration [kg/kg],
- t = Zeit [s],
- ∇ = $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$
- \mathbf{j}_k = advektiver / konvektiver Massenfluss [(m kg)/(s kg)],
- \mathbf{j}_m = diffusiver Massenfluss [(m kg)/(s kg)],
- \mathbf{j}_d = hydromechanische Dispersion [(m kg)/(s kg)],
- q = Quellen/Senkenterm [kg / (s m³)],
- c* = Konzentration zu- und abfließender Mengen [kg/kg],
- R_c = Summe aller nichtkonservativen Transportprozesse [(kg s)/m³],
- q_c = Massenzu- bzw. -abfluss [(kg s)/m³].

Durch Anwendung der Produktregel auf den Advektions- / Konvektionsterm und Einsetzen der Kontinuitätsbedingung der Strömungsgleichung ergibt sich bei Vernachlässigung der nicht konservativen Transportprozesse ($R_c = 0$) die instationäre Stofftransportgleichung:

$$(n S_r \rho) \frac{\partial c}{\partial t} + (n S_r \rho) \mathbf{v} \nabla c - \nabla (n S_r \rho (d_m \mathbf{1} + \mathbf{D}) \nabla c) = q (c^{in} - c) \quad (10)$$

mit

n	=	Porosität des Grundwasserleiters [-],
S_r	=	$S_r(p)$ Sättigungsgrad nach VAN GENUCHTEN [-],
ρ	=	Dichte [kg/m^3],
c	=	Konzentration [kg/kg],
t	=	Zeit [s],
\mathbf{v}	=	Abstandsgeschwindigkeit [m/s],
∇	=	$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$
d_m	=	Diffusionskonstante [m^2/s],
\mathbf{I}	=	Einheitsmatrix,
\mathbf{D}	=	symmetrischer Dispersionstensor [m^2/s]
q	=	Quellen/Senkenterm [$\text{kg} / (\text{s m}^3)$],
c^{in}	=	Zuflusskonzentration [kg/kg].

Die Differentialgleichung wird ergänzt durch Randbedingungen:

- Vorgabe von festen Konzentrationen (Randbedingung 1. Art),
- Vorgabe eines Massenstroms (Randbedingung 2. Art).

Zusätzlich wird eine Anfangsbedingung für den Startzeitpunkt benötigt:

- Anfangskonzentration zum Startzeitpunkt t_0 der instationären Rechnung.

3.3 Kopplung von Transport- und Strömungsgleichung im dichteabhängigen Fall

Hat der gelöste Stoff (z. B. Salz) einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Dichte des Fluids

$$\rho = \rho(c), \text{ mit } c = \text{Konzentration } [\text{kg}_{\text{Stoff}} / \text{kg}_{\text{Lösung}}],$$

so handelt es sich bei der Strömungsgleichung und Stofftransportgleichung um ein über die Dichte gekoppeltes System von Differentialgleichungen.

Die Differentialgleichung für den Druck muss noch durch einen – durch Dichteänderungen bedingten – Konzentrationsspeicherterm ergänzt werden:

$$\left[S_r \rho S_{op} + n \rho \frac{\partial S_r}{\partial p} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + \left[n S_r \frac{\partial \rho}{\partial c} \right] \frac{\partial c}{\partial t} - \nabla \left[\frac{\rho \mathbf{k} k_r}{\mu} (\nabla p + \rho \mathbf{g} \nabla z) \right] = q \quad (11)$$

Konzentrations-
speicherterm

mit

S_r	=	$S_r(p)$ Sättigungsgrad nach VAN GENUCHTEN [-],
ρ	=	Dichte [kg/m^3],
S_{op}	=	spezifischer Speicherkoeffizient [m^2/kg],
n	=	Porosität des Grundwasserleiters [-],
p	=	Druck [N/m^2],
t	=	Zeit [s],
c	=	Konzentration [kg/kg],
∇	=	$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$
\mathbf{k}	=	symmetrischer Tensor der Permeabilität [m^2],
k_r	=	$k_r(S_r)$ relative Permeabilität nach VAN GENUCHTEN [-], mit
μ	=	dynamische Viskosität [$\text{kg}/(\text{m s})$],
g	=	Fallbeschleunigung [m/s^2],
z	=	Lagehöhe [m],
q	=	Quellen/Senkenterm [$\text{kg} / (\text{s m}^3)$].

Bei der Berechnung dichteabhängiger Strömungen ist darauf zu achten, dass mit dichteändernden Konzentrationen die Druckrandbedingungen entsprechend zu korrigieren sind. Bei größerer Salzkonzentration baut derselbe Druck ein niedrigeres Potential auf. Da am Rand des 3-dimensionalen Modells dichteändernde Konzentrationen vorliegen, müssen die Potential- bzw. Druckrandbedingungen so angepasst werden, dass sie die Druckverteilung des Salzwassers im Meer richtig widerspiegeln.

3.4 Wärmemodellierung

Für die Betrachtung der Wärmeausbreitung in der Umgebung von Erdkabeln wird das Grundwassermodell um die Parametrisierung des Wärmemodells ergänzt. Wesentlichen Einfluss hat die Wahl der thermischen Randbedingungen, insbesondere der Randbedingungen an der Geländeoberfläche. Für eine realistische Temperaturverteilung ist eine gemischte Randbedingung, die die Lufttemperatur in Kombination mit der Direkteinstrahlung der Sonne koppelt, erforderlich. Die Verlustleistung der Erdkabel wird als Energierandbedingung im Modell angesetzt.

Wärme kann sich nicht nur konvektiv und diffusiv mit dem Fluid ausbreiten, sondern auch über die wärmeleitfähige Matrix transportiert werden. Deshalb müssen in dem Wärmetransportmodell der Wärmetransport und die Wärmeausbreitung berechnet werden.

Es wird ein Wärmetransportmodell mit Abbildung der hydrogeologischen Gegebenheiten erstellt. Die Randbedingungen und Eingangsparameter (geologische Informationen, Leitfähigkeiten, Wärmekapazität, Dichte, Sättigung, etc.) werden in Annäherung an die realen Verhältnisse gewählt.

SPRING ermöglicht die Kopplung von Stofftransport und Wärmetransport.

In vielen hydrogeologischen Systemen haben Dichteveränderungen einen entscheidenden Einfluss auf die Grundwasserdynamik. Unterschiede in Salzgehalt oder Temperatur führen dabei zu Dichtegradienten innerhalb eines Grundwasserleiters. Der Ausgleich instabiler Dichteschichtungen überprägt die horizontale Strömung in Richtung des regionalen Potentialgradienten und kann dichtegetrieben eine

Rotationsbewegung des Grundwassers erzeugen (freie Konvektion). Durch diese Rotationsbewegung können sich Konvektionszellen ausbilden und das Wasser strömt „im Kreis“.

Eine mögliche Dichteschichtung bildet ungeachtet des geologischen Baus des Gebirges eine natürliche Abgrenzung aus. Verursacht werden solche Konvektionszellen mit in sich geschlossenen Kreislaufströmungen durch die Kombination aus Dichteschichtung – saline Wässer sind schwerer als Süßwasser und streben nach unten – und Wärmeschichtung – warme Wässer steigen auf.

Bei der Berechnung von Strömungsvorgängen in einem porösen Medium, das sowohl einem nicht vernachlässigbaren Temperatureinfluss unterliegt als auch einer Dichteänderung aufgrund von Salzgehalten, sind drei Gleichungen (Strömungs-, Transport- und Energiegleichung) durch die Dichte gekoppelt:

$$\zeta = \zeta(C, T) .$$

Der Dichtespeicherterm der Strömungsgleichung lautet in diesem Fall

$$nS_r \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \left(nS_r \frac{\partial \zeta}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left(nS_r \frac{\partial \zeta}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} \quad (12)$$

n	=	Porosität des Grundwasserleiters [-],
S _r	=	S _r (p) Sättigungsgrad nach VAN GENUCHTEN [-],
ζ	=	Dichte [kg/m ³],
t	=	Zeit [s],
T	=	Temperatur [K],
C	=	Konzentration [kg/kg].

Zusätzlich sind Energie- und Strömungsgleichung durch die temperaturabhängige Viskosität

$$\mu = \mu(T) .$$

gekoppelt.

4 Datengrundlage

In diesem Kapitel werden alle notwendigen Daten zur Erstellung des dreidimensionalen dichteabhängigen instationären Strömungs- und Wämetransportmodells beschrieben. Tabelle 2 gibt eine Übersicht zur Herkunft der Daten.

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Datengrundlagen

Parameter	Herkunft der Daten
Geologische Schichten	Geologisches 3D-Untergrundmodell des Wasserwerks Langeoog [4]
Durchlässigkeiten (k_f -Wert)	Geologisches 3D-Untergrundmodell des Wasserwerks Langeoog [4]
Porosität	Literatur
spezifische Wärmekapazität	VDI 4640 Blatt 1 [38]
Wärmeleitfähigkeit	VDI 4640 Blatt 1 [38]
Korndichte der Gesteinsmatrix	VDI 4640 Blatt 1 [38]
Lufttemperatur	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Niederschlag	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Luftfeuchtigkeit	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Sonnenscheindauer	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Windgeschwindigkeit	Deutscher Wetterdienst (DWD)
Versiegelungsgrad	COPERNICUS 2018 [40]
Lagehöhe	DGM1 (LGLN)
Flächennutzung	Basis-DLM (LGLN) [36]
Bodenklasse	Literatur (entspr. Bodentyp)
Wassergehalt bei Feldkapazität	BÜK200/BK50 (NIBIS)
Wassergehalt bei permanentem Welkepunkt	BÜK200/BK50 (NIBIS)
Verlustleistung der Kabel	Amprion/TenneT

4.1 Geländemodell

Um die Geländeoberfläche und die Lage von Gräben und Vorflutern auf der Insel Langeoog möglichst detailliert abbilden zu können, wurde durch Amprion das digitale Geländemodell DGM1 des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) zur Verfügung gestellt (Abbildung 6). Die DGM-Daten sind lagemäßig im ETRS89/UTM-Koordinatensystem bestimmt, die Höhe bezieht sich auf das DHHN2016 mit Normalhöhen-Null (NHN). Das DGM1 für die Insel Langeoog wurde im April 2020 erfasst, hat eine einheitliche Gitterweite von 1,0 m und weist eine Höhengenaugigkeit von 0,3 m auf. Es besteht aus 36,8 Mio. Datenpunkten, die auf das Modellnetz interpoliert wurden.

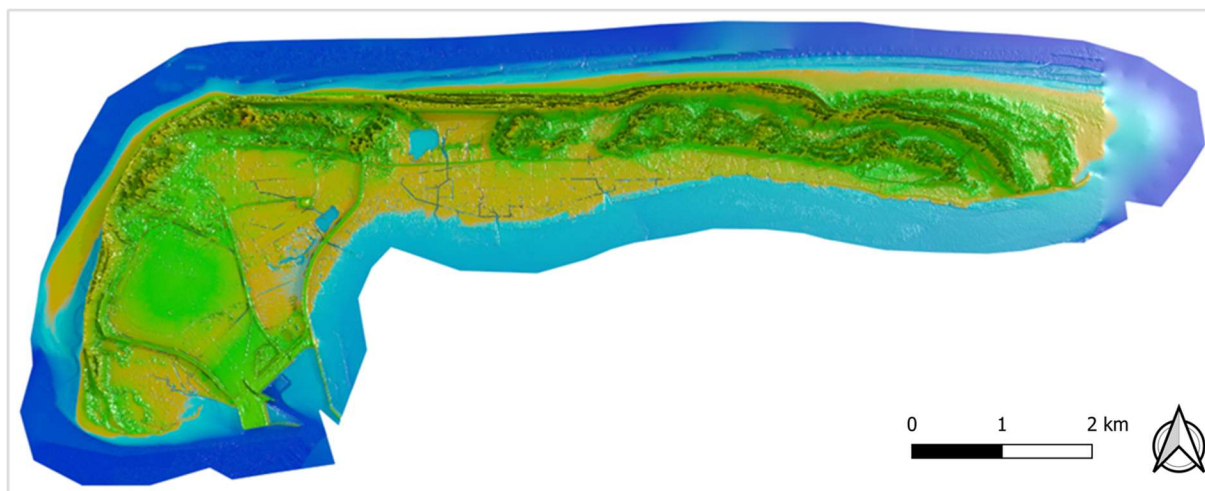


Abbildung 6: Geländeoberfläche der Insel Langeoog (interpoliert aus dem DGM1 des LGLN)

4.2 Oberflächengewässer

Das im Modell abgebildete Gewässersystem (Abbildung 7) basiert auf frei verfügbaren Geo-Informationen, die über das Geoinformationssystem OpenStreetMap (OSM) [33] abgerufen und für das Modell digitalisiert wurden. Da keine Informationen aus Wasserspiegelmessungen vorlagen, wurden die Vorflutpotentiale aus den Geländehöhen abgeleitet, abhängig von den Abflussmöglichkeiten um einen Betrag zwischen 20-50 cm abgesenkt und, wenn notwendig, auf ein durchgängiges Gefälle korrigiert. Die Höhe der entsprechenden Vorflutpotentiale an den Modellknoten kann Abbildung 7 entnommen werden.

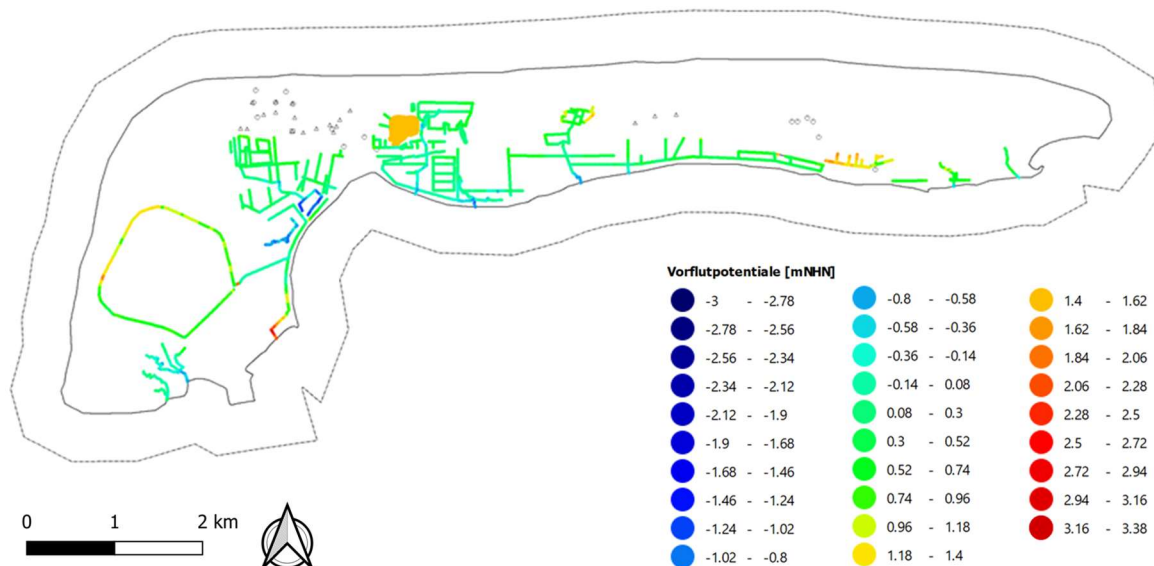


Abbildung 7: Angenommene Höhen der Vorflutpotentiale im Modellgebiet Langeoog

Diese Vorflutwasserstände und die Leakagekoeffizienten, welche das Verhältnis zwischen der Durchlässigkeit der kolmatierten Schicht und deren Mächtigkeit beschreiben, wurden während der Kalibrierung lokal angepasst.

Ein bedeutsames stehendes Gewässer ist der Sloppersee oder Schloppersee im westlichen Teil der Insel. Das bis zu 12 Meter tiefe Brackgewässer mit den Maßen 150 m × 200 m befindet sich östlich des

Inseldorfes, westlich der Große Schlopp (Groote Sloop) genannten Gegend, einer aus einem Dünen-
durchbruch bei der Weihnachtsflut im Jahre 1717 entstandenen Landschaftsstruktur. Er bildete sich
1971 durch die Entnahme von Sandmassen für den Küstenschutz [34].



Abbildung 8: Sloppersee, Juli 2010 [35]

Der Wasserstand des Sloppersees wurde aus zur Verfügung gestellten Messdaten des Oldenburgisch-
Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) mit 1,57 mNHN abgeleitet.

Die Nordsee wurde an den Küstenrändern mit 0 mNHN als Wasserstand definiert.

4.3 Geologischer Aufbau

Für die Erstellung des hydrogeologischen Modells stand das Geologische 3D-Untergrundmodell des
Wasserwerks Langeoog [4] zur Verfügung. Das Modell beschreibt das grundwasserwirtschaftlich ge-
nutzte Aquifersystem aus quartären Lockersedimenten. Die Verbreitung, die Tiefenlage und die Mäch-
tigkeit der einzelnen geologischen Sedimentkörper sind darin dreidimensional kartiert.

Die Insel Langeoog besteht aus pleistozänen und holozänen Ablagerungen. Die Liegendgrenze zum
Pleistozän, die sogenannte Quartärbasis, liegt in einer Tiefe von etwa -50 m NHN. Die pleistozäne Ab-
folge beginnt punktuell mit altpleistozänen Ablagerungen im südwestlichen Bereich der Insel. Es fol-
gen die glazifluviatilen Sande der Elster-Kaltzeit und die Beckenablagerungen der Lauenburger Schich-
ten. Darauf folgen saalezeitliche Ablagerungen, sowohl in Form von glazifluviatilen Sanden als auch
der nachfolgend stark erodierten Drenthe-Hauptmoräne. Eemzeitliche Sedimente sind aufgrund des
vorübergehenden Meeresspiegelanstiegs in mariner Fazies in morphologischen Hohlformen abgela-
gert, aber lediglich im zentralen Teil der Insel anzutreffen. In der anschließenden Weichsel-Kaltzeit
wurde das Modellgebiet nicht mehr vom Gletschervorstoß erreicht. Daher liegen aus dieser Zeit peri-
glaziale Sedimente fluviatilen und äolischen Ursprungs vor. Holozäne Einheiten bilden den Abschluss
der geologischen Abfolge Langeoogs. [4]

Die dreidimensionalen Lageinformationen des geologischen Modells wurden übernommen und auf vertikale Knotenschichten des Modells übertragen. Tabelle 3 zeigt die Zuordnung im Modell.

Tabelle 3: Zuordnung der geologischen Schichten auf Modellschichten

Element-schicht im Modell	Kurzbe-zeichnung	Geologische Schicht
1	qhy	Künstliche Aufschüttungen
2	qhfls	Flugsand (Holozän)
3	qhKs1	Küstenholozän (klastisch)
4	qhKt1	Küstenholozän (tonig)
5	qhy	Künstliche Aufschüttungen
6	qhKs2	Küstenholozän (klastisch)
7	qhhn1	Niedermoortorf
8	qwf	Fluviatile Ablagerung (Weichsel)
9	qee	Interglaziale Ablagerungen (Eem)
10	qdgf	Schmelzwassersande (Drenthe, Saale-Eiszeit)
11	qL_lio	Linsen des Lauenburger Tons
12	qdgf	Schmelzwassersande (Drenthe, Saale-Eiszeit)
13	qLt	Lauenburger Ton
14	qegf1	Schmelzwassersande (Elster)
15	qp	Altpleistozän
16		Unterbau (Tertiär, Kreide, Perm) des erstellten quartär-geologischen Modells: Oberkante = Quartärbasis; fiktive Unterkante bei -130 m NN

Abbildung 9 zeigt die umgesetzte Geologie der Insel Langeoog im Modell in einem Vertikalschnitt von Süd nach Nord sowie von Nord nach West. In der Abbildung 10 sind zudem die Begrenzungsflächen der geologischen Schichten im Modell in einer 3D-Ansicht dargestellt.

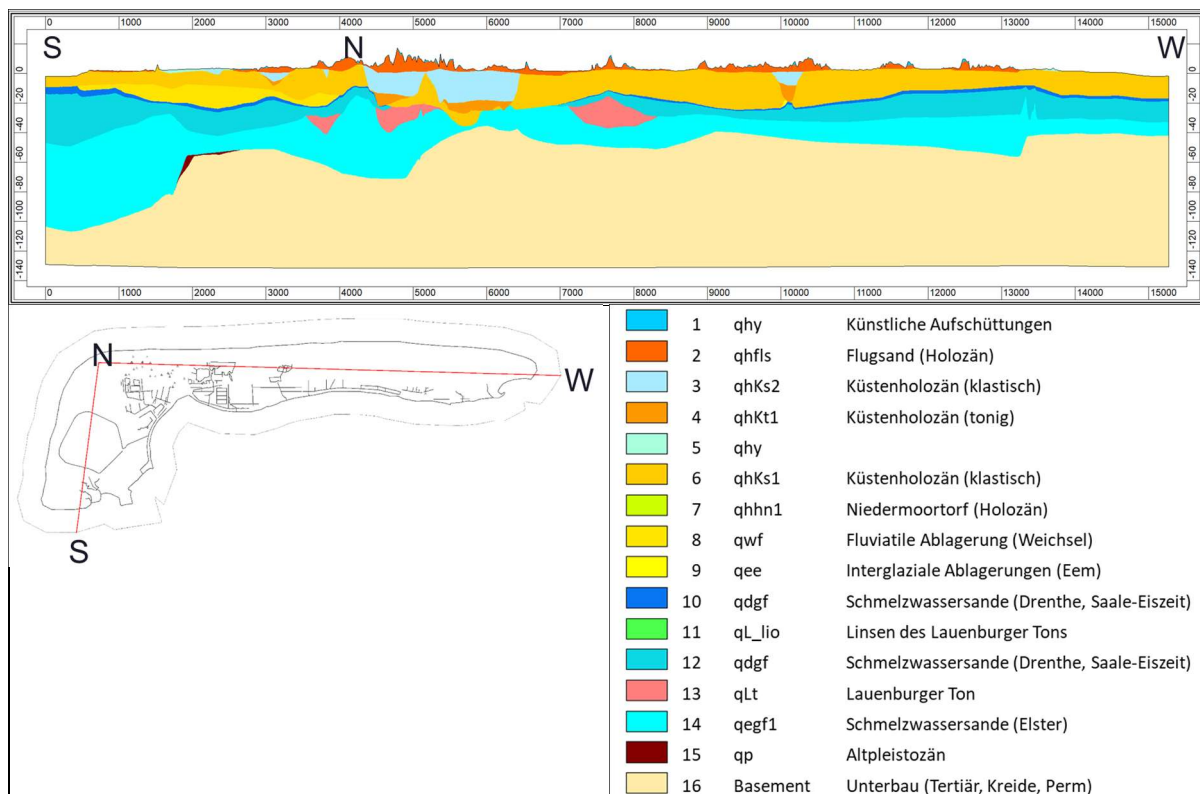


Abbildung 9: Vertikalschnitt durch das 3D-Modell mit Zuordnung der Geologie

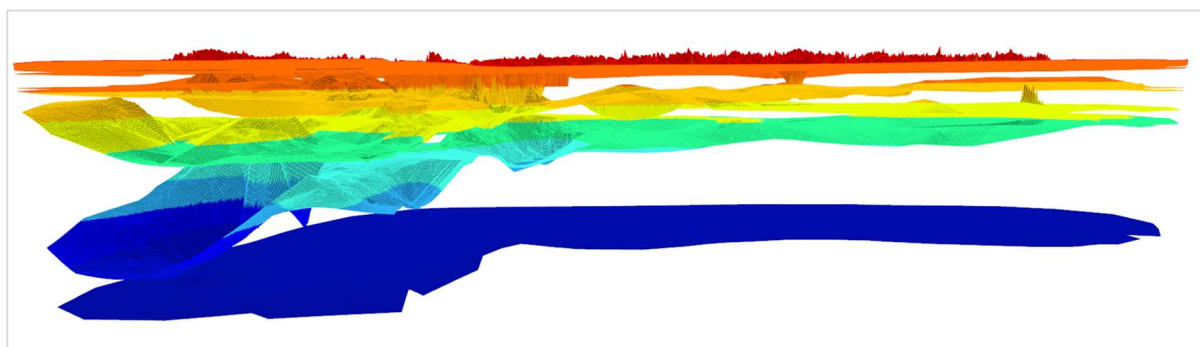


Abbildung 10: 3D-Ansicht der Begrenzungsflächen der geologischen Schichten im Modell (farbliche Abstufung für verschiedene Lagenhöhen)

4.3.1 Durchlässigkeiten

Entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu einer geologischen Schicht wurden den Modellschichten Durchlässigkeitsbeiwerte als Startwerte für die Kalibrierung zugewiesen. Sie orientieren sich an den Angaben in [4]. Tabelle 4 zeigt die gewählten Wertebereiche.

Tabelle 4: Durchlässigkeitsbeiwerte (Startwerte) der geologischen Schichten im Modell

Element-schicht im Modell	Kurzbez.	Geologische Schicht	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s] (Startwerte, von/bis)	
1	qhy	Künstliche Aufschüttungen	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
2	qhfls	Flugsand (Holozän)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
3	qhKs1	Küstenholozän (klastisch)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
4	qhKt1	Küstenholozän (tonig)	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
5	qhy	Künstliche Aufschüttungen	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$
6	qhKs2	Küstenholozän (klastisch)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
7	qhhn1	Niedermoortorf	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
8	qwf	Fluviatile Ablagerung (Weichsel)	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
9	qee	Interglaziale Ablagerungen (Eem)	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$
10	qdgf	Schmelzwassersande (Drenthe, Saale-Eiszeit)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
11	qL_lio	Linsen des Lauenburger Tons	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$
12	qdgf	Schmelzwassersande (Drenthe, Saale-Eiszeit)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
13	qLt	Lauenburger Ton	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7}$
14	qegf1	Schmelzwassersande (Elster)	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-2}$
15	qp	Altpleistozän	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$
16		Tertiär, Kreide, Perm	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-5}$

4.3.2 Effektive Porositäten

Die effektiven Porositäten für die Modellschichten wurden entsprechend ihrer Durchlässigkeiten mit Werten zwischen 10 bis 18 % definiert und während der instationären Kalibrierung angepasst.

4.3.3 Dispersivitäten

Die Dispersivität bestimmt die Dispersion eines gelösten Stoffes in einem porösen Medium. Für das Modell wurden Dispersivitäten entsprechend der Grafik von Gelhar [20] (Abbildung 5) zwischen 10 und 60 m angenommen. Anhand von Vergleichsrechnungen zur Ausdehnung der Süßwasserlinse wurde der Wert 60 m für die longitudinale Dispersionslänge gewählt (siehe Kap. 7.3).

4.3.4 Diffusionskoeffizient

Der Diffusionskoeffizient für Salz (NaCl) wurde gemäß [39] mit $2,2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ definiert.

4.4 Grundwassermessstellen und -messwerte

Für die Kalibrierung stehen durch den OOWV übermittelte Messdaten von 138 Grundwassermessstellen und 30 Brunnenmessstellen im Zeitraum 01/1993 – 04/2023 zur Verfügung. Bei allen 30 Brunnenmessstellen sind die Filterober- und -unterkante bekannt, sodass über die Filterstrecke ein gleiches Potential auf den entsprechenden numerischen Schichten im Modell angesetzt werden kann. Teilweise wurden Brunnen abgeschaltet und zu Grundwassermessstellen umfunktioniert. Umgekehrt

wurden auch einige Grundwassermessstellen zu Brunnen ausgebaut. Bei den Grundwassermessstellen ist die Filteroberkante nur bei 72 Messstellen bekannt, die Filterunterkante bei 114 Messstellen. Abbildung 11 gibt einen Überblick zum Vorliegen der Filterober- und -unterkanten an den Messstellen. Fehlt die Information der Filteroberkante, ist keine Zuordnung der Messstelle zur geologischen Schicht möglich und die Messwerte sind nur eingeschränkt für die Kalibrierung geeignet. Dies gilt insbesondere für die Messstellen im Osten der Insel. Dort liegen keine Informationen zur Verfilterung vor. Außerdem wurden sie erst kürzlich errichtet und weisen nur kurze Messreihen auf.

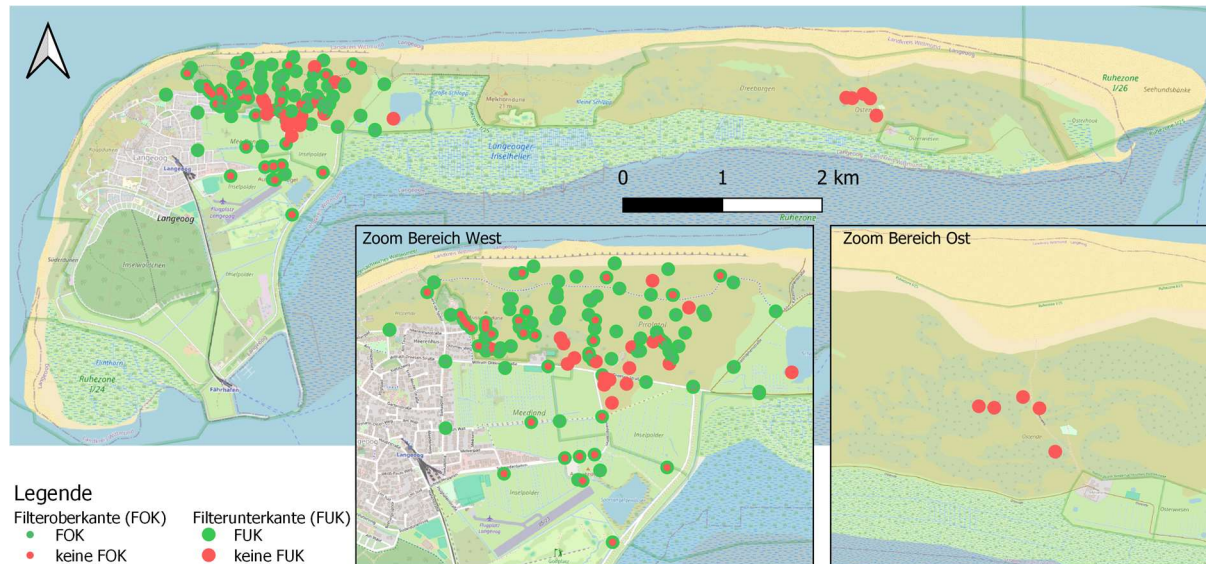


Abbildung 11: Lage der Grundwassermessstellen und Angabe zur Information der Verfilterung

4.5 Grundwasserentnahmen

Das Wasserwerk West wurde 1934 in Betrieb genommen und stellt die Hauptwasserversorgung der Insel dar. Es fördert Grundwasser aus der westlichen Süßwasserlinse. Das Brunnenfeld befindet sich nordöstlich des Dorfes und besteht aus heute 18 aktiven Förderbrunnen [2]. Die folgenden Informationen lagen zu den Grundwasserentnahmen vor:

- Grundwasserentnahmen im Modell 2018 an 17 Brunnen mit jeweils einer konstanten Jahresfördermenge (Abbildung 12) [2]
- durch den OOWV bereitgestellte Daten zu Jahresfördermengen zwischen 1951 und 2022 (Abbildung 13), Tagesfördermengen und täglichen Brunnenlaufzeiten von 2019 bis März 2023

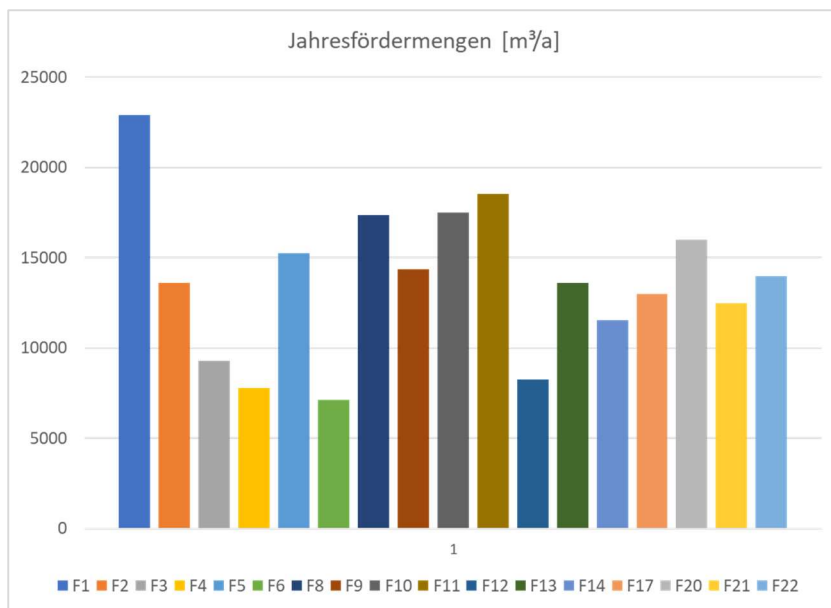


Abbildung 12: Jahresfördermengen der Brunnen im Modell 2018 [2]

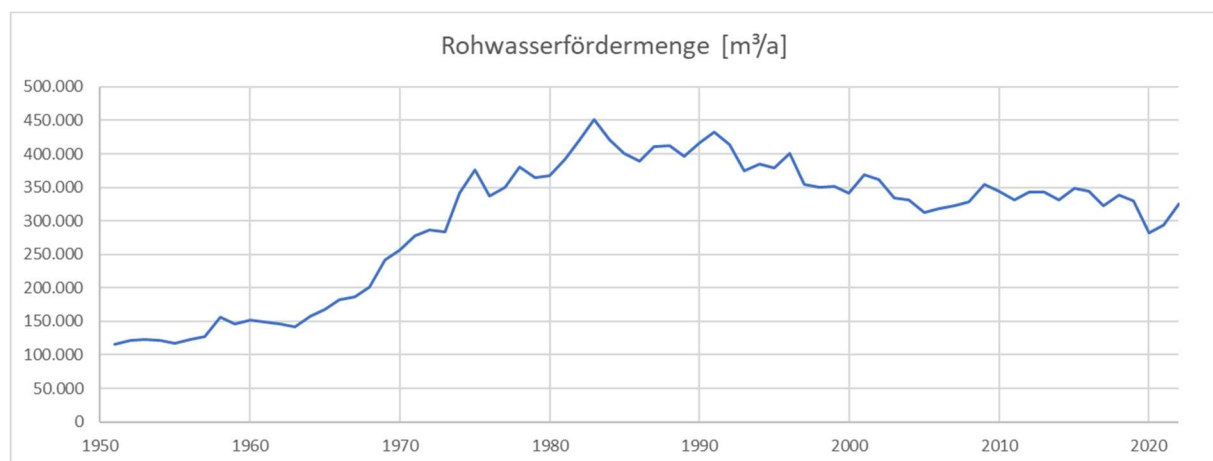


Abbildung 13: Jahresfördermengen der Brunnen auf Langeoog 1951-2022

Das neu erstellte Modell der Insel Langeoog hat das Ziel, die instationären Zusammenhänge zwischen Grundwasserneubildung, Grundwasserentnahmen und Tiderandbedingung detailliert abzubilden. Aus diesem Grund wird eine instationäre Grundwasserneubildung in Tagesschritten (Kap. 4.6) aufgelegt und entsprechend sollten auch die Grundwasserentnahmen tagesscharf aufgelöst werden.

Die Tagesfördermengen des Zeitraums 2019-2023 wurden statistisch analysiert. Ergebnis waren mittlere Tagesfördermengen je Monat (Abbildung 14) sowie eine Häufigkeitsverteilung der täglichen Abweichung vom Monatsmittel (Abbildung 15).

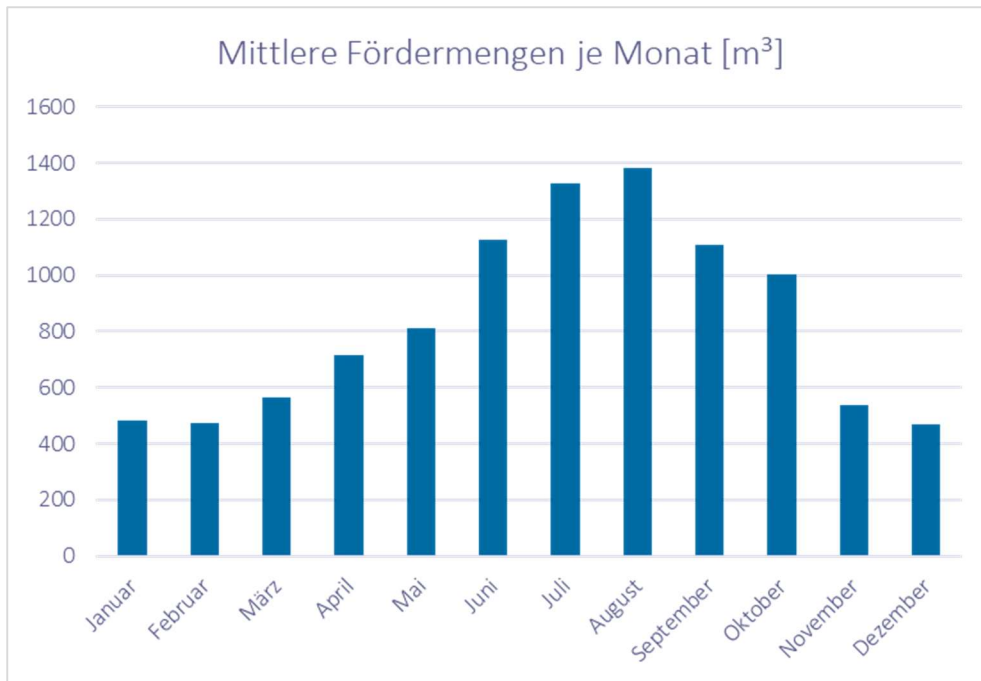


Abbildung 14: Mittlere Fördermengen je Monat aus Tagesfördermengen 2019-2023

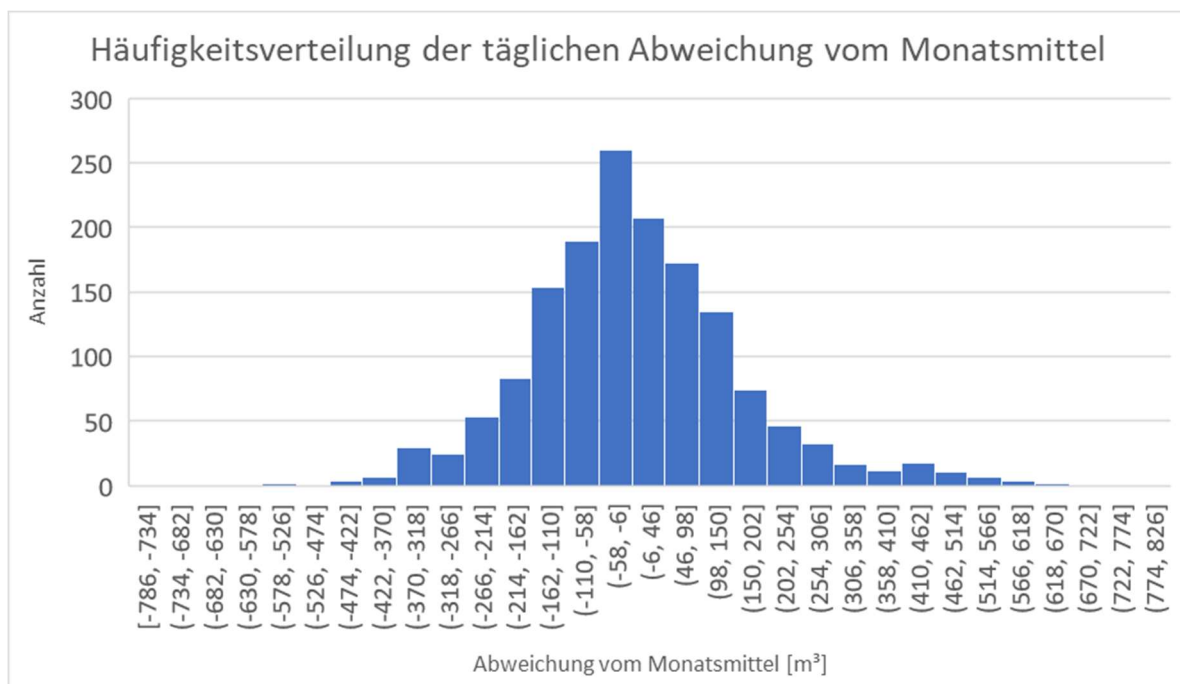


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der täglichen Abweichung vom Monatsmittel aus Tagesfördermengen 2019-2023

Aus den Jahresfördermengen wurden mit dieser Auswertung mit zufälligen normalverteilten Abweichungen Tagesfördermengen für den Zeitraum 1951-2018, in dem keine täglichen Fördermengen vorlagen, stochastisch generiert (Abbildung 16). Der Vergleich der stochastisch generierten mit den gemessenen täglichen Fördermengen (Abbildung 17) ergab eine gute Übereinstimmung, so dass beide Datensätze zu einer Zeitreihe kombiniert wurden. Die resultierende vollständige Zeitreihe der Grundwasserentnahmen in Tagesschritten für den Zeitraum 1951-2022 wurde auf der Basis des Verteilungsschlüssels aus dem Modell 2018 auf die Einzelbrunnen verteilt und entsprechend als

Modellrandbedingung 2. Art (Volumenstrom [m^3/Zeit]) zugewiesen. Tabelle 5 zeigt, in welchen Modellschichten die Förderbrunnen im Modell implementiert wurden.

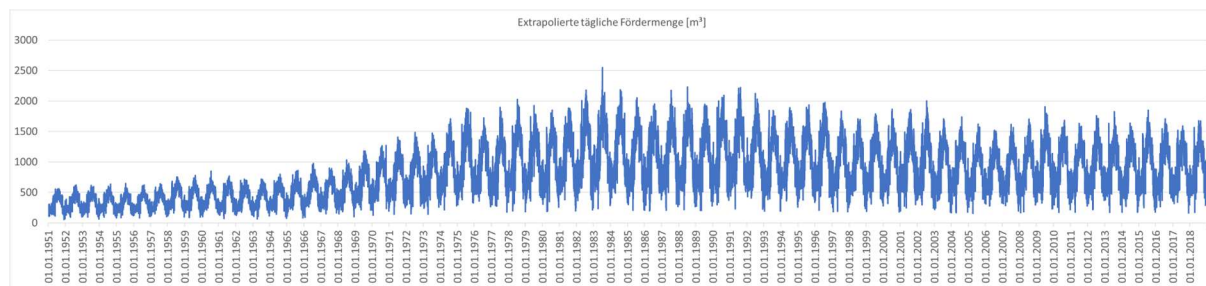


Abbildung 16: Aus den Jahresfördermengen stochastisch generierte tägliche Fördermengen für die Jahre 1951-2018

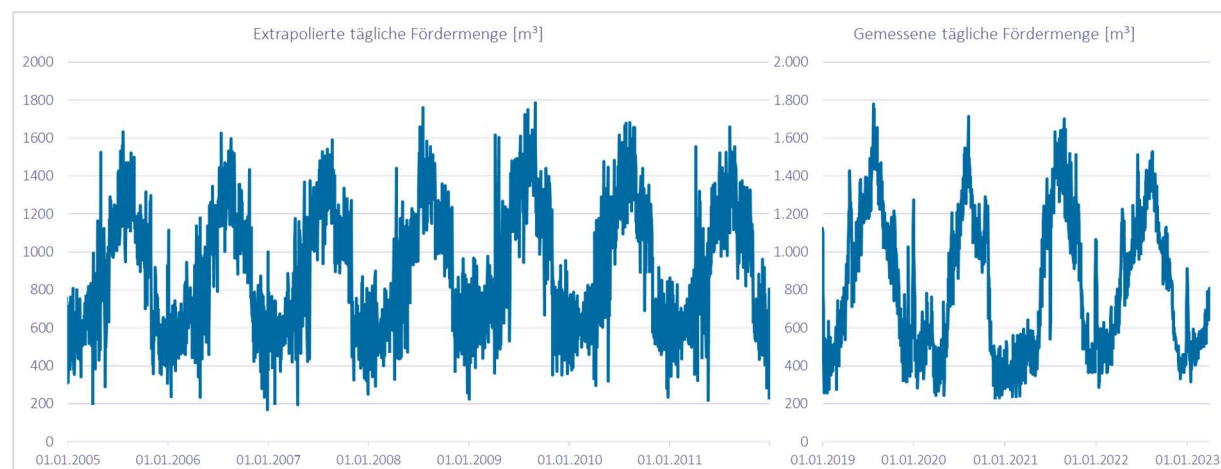


Abbildung 17: Vergleich der stochastisch generierten täglichen Fördermengen (links) mit den gemessenen täglichen Fördermengen (rechts)

Für detailliertere Analysen wurden die Brunnenlaufzeiten für die Jahre 2019-2023 auf Tageszeiten aufgeteilt, um kleinere Zeitschrittweiten verwenden zu können. Damit kann z. B. das wechselseitige An- und Abschalten der Brunnen untersucht werden. Dabei wurde angenommen, dass die tägliche Brunnenlaufzeit am Stück erfolgt und entweder ab Mitternacht oder bis Mitternacht gefördert wird. So werden an aufeinanderfolgenden Tagen Brunnenlaufzeiten zusammengefasst, dass möglichst keine Abschaltung dazwischen stattfindet, d. h., dass ein Brunnen an einem Tag bis um Mitternacht läuft und am darauffolgenden Tag durchgehend ab Mitternacht weiterläuft. Tage ohne Brunnenlaufzeiten für einzelne Brunnen helfen bei der Einordnung der Zeitpunkte. Zugleich wird angenommen, dass nahezu identische Laufzeiten unterschiedlicher Brunnen am gleichen Tag bedeuten, dass diese Brunnen gleichzeitig laufen. Aufgrund dieser Kriterien wurde ein ausführlicher Zeitplan rekonstruiert.

Tabelle 5: Lage der Filter der Brunnenmessstellen und ihre Zuordnung im 3D-Modell

Messst.nr.	Kurz-bez.	Messst.-Typ	FOK m NHN	FUK m NHN	Modell- schicht von	Modell- schicht bis
3620010	F1	Förderbrunnen	-8,265	-13,265	15 (-6.84m)	18 (-13.64m)
3620020	F2	Förderbrunnen	-6,241	-11,241	35 (-7.11m)	37 (-11.85m)
3620030	F3	Förderbrunnen	-7,917	-12,917	35 (-8.25m)	37 (-12.88m)
3620040	F4	Förderbrunnen	-9,498	-14,498	21 (-8.69m)	36 (-15.47m)
3620050	F5	Förderbrunnen	-4,767	-9,767	15 (-4.69m)	17 (-9.62m)
3620060	F6	Förderbrunnen	-11,064	-16,064	38 (-10.34m)	46 (-15.15m)
3620070	F7	Peilrohr	-8,555	-13,655	15 (-7.41m)	18 (-14.15m)
3620080	F8	Förderbrunnen	-9,644	-14,644	37 (-9.30m)	39 (-13.82m)
3620090	F9	Förderbrunnen	-7,665	-12,665	36 (-8.21m)	38 (-12.96m)
3620100	F10	Förderbrunnen	-6,713	-11,713	16 (-5.13m)	20 (-10.04m)
3620110	F11	Förderbrunnen	-26,87	-34,87	47 (-27.15m)	77 (-32.20m)
3620111	F11.1	Schüttungspeilrohr	-4,158	-6,158	17 (-5.03m)	17 (-5.03m)
3620112	F11.2	Schüttungspeilrohr	-27,158	-29,158	47 (27.15m)	77 (-32.20m)
3620120	F12	Förderbrunnen	-2	-12	34 (-2.15m)	38 (-11.51m)
3620121	F12.1	Schüttungspeilrohr	-7,263	-9,263	36 (-6.83m)	38 (-11.51m)
3620130	F13	Peilrohr	-25,25	-33,25	40 (-25.65m)	46 (-33.68m)
3620140	F14	Förderbrunnen	-3,534	-9,534	33 (-2.58m)	36 (-9.76m)
3620141	F14.1	Schüttungspeilrohr	-5,534	-6,534	34 (-4.97m)	34 (-4.97m)
3620150	F15	Förderbrunnen	-2,282	-10,282	14 (-3.12m)	17 (-9.69m)
3620151	F15.1	Schüttungspeilrohr	-5,282	-6,282	15 (-5.34m)	15 (-5.34m)
3620160	F16	Förderbrunnen	-3,506	-10,506	14 (-3.34m)	17 (-9.93m)
3620161	F16.1	Schüttungspeilrohr	-4,006	-5,006	15 (-5.54m)	15 (-5.54m)
3620170	F17	Förderbrunnen (Logger)	-11,524	-17,524	33 (10.43m)	36 (-17.60m)
3620171	F17.1	Schüttungspeilrohr	-17,524	-18,524	36 (-17.60m)	36 (-17.60m)
3620180	F18	Förderbrunnen	-8,5	-14,5	16 (-7.68m)	26 (-14.93m)
3620200	F20	Förderbrunnen	-10,997	-15,997	17 (-10.60m)	36 (-16.72m)
3620201	F20.1	Schüttungspeilrohr	-10,997	-15,997	17 (-10.60m)	36 (-16.72m)
3620210	F21	Förderbrunnen	-10,977	-18,977	17 (-11.35m)	46 (-18.53m)
3620211	F21.1	Schüttungspeilrohr	-10,977	-18,977	17 (-11.35m)	46 (-18.53m)
3620220	F22	Förderbrunnen	-10,994	-16,994	17 (-11.12m)	19 (-15.94m)
3620221	F22.1	Schüttungspeilrohr	-10,994	-16,994	17 (-11.12m)	19 (-15.94m)

4.6 Grundwasserneubildung

Für Modellrechnungen zu Grundwasserbewegung und Wärmetransport werden Informationen zur Grundwasserneubildung benötigt. Die Grundwasserneubildung auf dem oberen Modellrand des Aquifersystems ist eine sensible Größe [25]. Ihre Berechnung wird im Folgenden deshalb detailliert beschrieben.

Da die modellierten Prozesse instationär sind, wird auch die Grundwasserneubildung instationär abgebildet. Die für die Grundwassermodellierung verwendete Software SPRING stellt für die Berechnung

einer instationären tagesscharfen Grundwasserneubildung die Methode RUBINFLEX [5] zur Verfügung. Das Berechnungsergebnis von RUBINFLEX geht in jedem Zeitschritt und für jedes Element als Neumann-Randbedingung in die Berechnung der Grundwasserströmung ein.

Die Methode RUBINFLEX ist ein hydrologisches Modell und basiert auf der Ermittlung der täglichen Bodenwasserbilanz in Abhängigkeit der Standorteigenschaften und mit Berücksichtigung schneller Abflusskomponenten aus Hangneigung und Bodenfeuchte, sowie aus dem Befestigungsgrad. Der Speicherung von Niederschlagswasser im Bodenwasserspeicher wird darüber hinaus an schneefreien Tagen die Interzeptionsspeicherung vorgeschaltet.

RUBINFLEX wurde im Rahmen einer Studie zu Auswirkungen von zu erwartenden Klimaänderungen auf die Grundwasserstände für das Einzugsgebiet der Stadt Düsseldorf im Auftrag der Stadt Düsseldorf entwickelt. RUBINFLEX ist eine gemeinschaftliche Entwicklung vom Lehrstuhl für Angewandte Physische Geographie am Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum unter Leitung von Professor Harald Zepp, und der delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten.

Die für RUBINFLEX neu entwickelte Entleerungsfunktion des Bodenspeichers sowie die Gesamtmethodik von RUBINFLEX wurden an mehrjährigen Messreihen der Grünland-Lysimeter in Rheindahlen (Löss; NEW – NiederrheinWasser GmbH, Mönchengladbach) und St. Arnold (Sand; Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), Recklinghausen) erfolgreich geprüft [5].

4.6.1 Prozesse und Einflussgrößen

Die Ermittlung von Sickerwasserraten nach RUBINFLEX beinhaltet die Wasser-Bilanzgrößen der folgenden Prozesse (Abbildung 18):

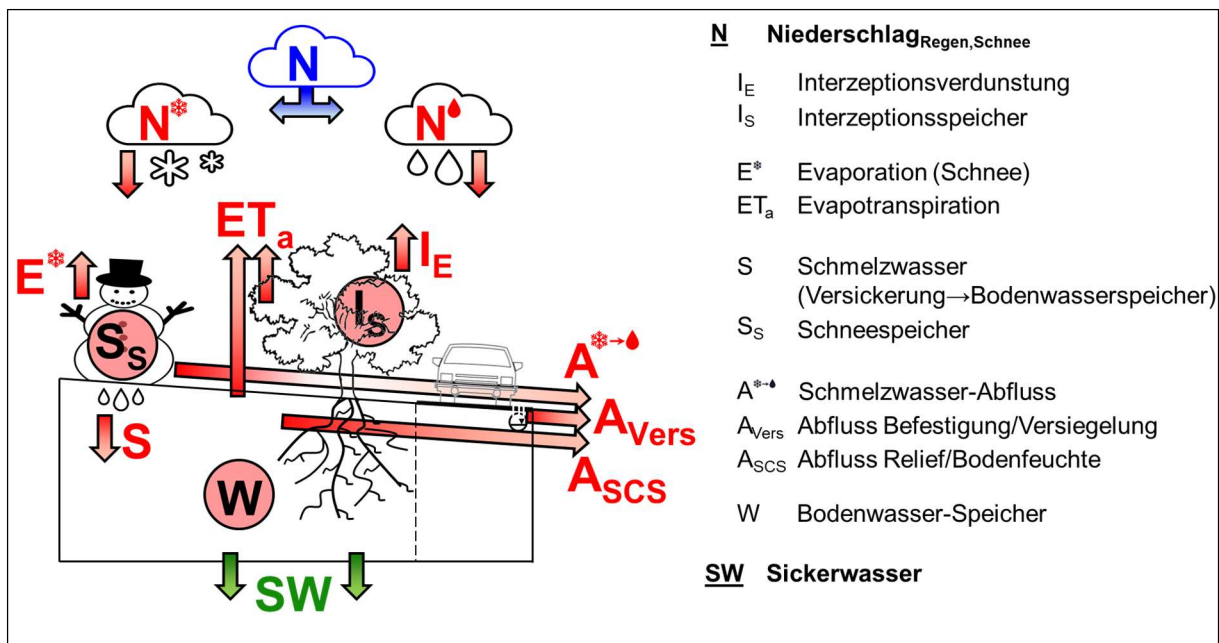


Abbildung 18: Prozess-Komponenten (vereinfachte Prinzipskizze)

Die Abfolge der Bilanzierung vom Niederschlag zur Sickerwasserrate lässt sich vereinfacht wie folgt darstellen (Abbildung 19):

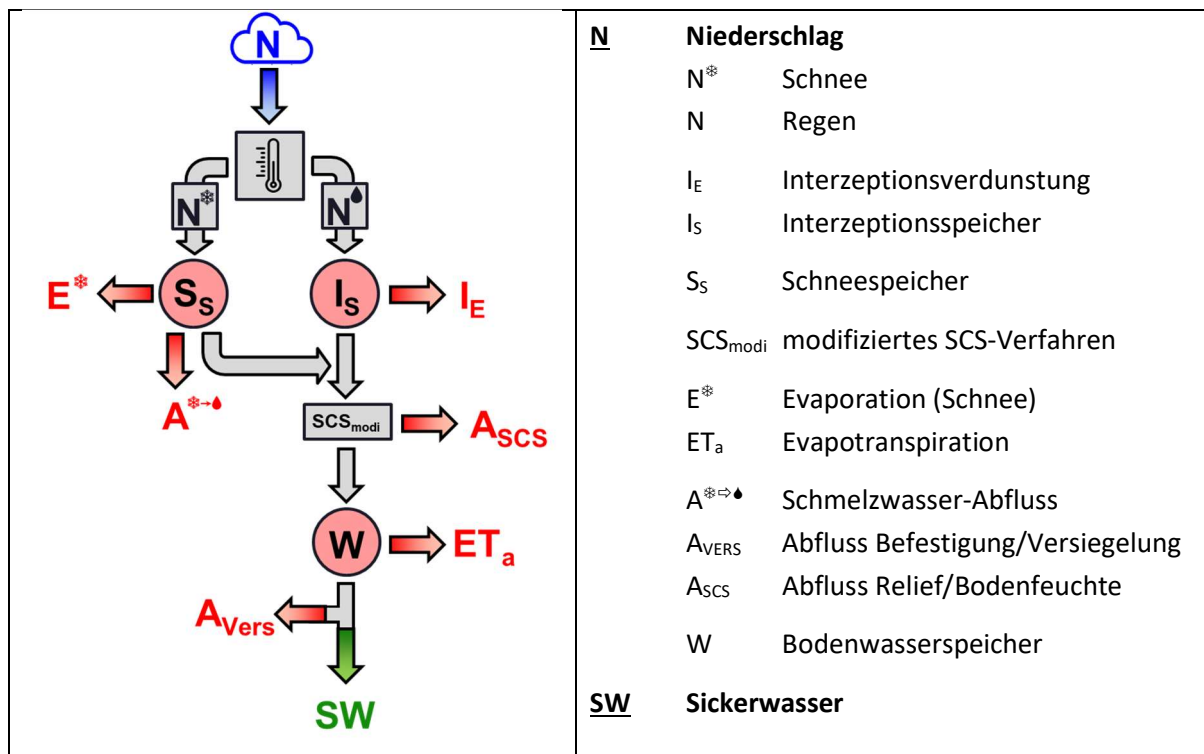


Abbildung 19: RUBINFLUX-Workflow (vereinfachte Prinzipskizze) (links) und Prozessgrößen (rechts)

Die Prozesse und ihre Einflussgrößen lassen sich zusammenfassen in:

- Niederschlag
 - mit optionaler Berücksichtigung der Lufttemperatur-abhängigen Anteile
 - Regen/flüssig
 - Schnee/fest (optional bei aktiviertem Schnee-Modul)
- Verdunstung (Evapotranspiration und Interzeption)
 - Interzeption (nicht bei aktiviertem Schnee-Modul und vorhandener Schneedecke)
 - Speicherung von Niederschlag auf der Vegetationsoberfläche
 - Verdunstung von gespeichertem Niederschlag von der Vegetationsoberfläche
 - Verdunstung aus vorhandener Schneedecke (Schneespeicher) (bei aktiviertem Schnee-Modul)
 - Verdunstung durch Evaporation (Boden) und Transpiration (Pflanze)
- *Schnelle* Abfluss-Komponenten
 - Oberflächenabfluss
 - in Abhängigkeit von Versiegelungs- bzw. Befestigungsgrad
 - Direktabfluss
 - in Abhängigkeit der Hangneigung, der Bodenfeuchte aus den zurückliegenden Niederschlägen, des hydrologischen Bodentyps und der Landnutzung
 - Schmelzwasser-Abfluss
 - (bei aktiviertem Schnee-Modul als Zuschlag zum Direktabfluss)
- Bodenwasser-Speicher,
 - definiert durch den gebundenen, nicht für Vegetation verfügbaren Anteil des Wassergehalts

(permanenter Welkepunkt) und den gegen die Schwerkraft haltbaren Wassergehalt durch den Boden (Feldkapazität).

Der durch den Bodenwasser-Speicher nicht speicherbare und nicht durch Vegetation entnommene Anteil des verfügbaren Wassers entspricht der Versickerung ins Grundwasser (Sickerwasser bzw. Neubildung).

a. Simulation des Bodenwasserhaushalts

Das Bodenwasserhaushaltsmodell von RUBINFLUX bildet die bidirektionalen Zusammenhänge zwischen den täglichen Evapotranspirations-, Direktabfluss- und Sickerwasserhöhen, dem Niederschlag und der aktuellen Bodenfeuchte für jedes einzelne Element des Grundwassermodells ab.

RUBINFLUX verwendet eine zeitliche Auflösung von einem Tag, entsprechend werden die Tagessummen der genannten Prozesse jeweils aus einem Tageswert der Bodenfeuchte abgeleitet. Die Abbildung der vertikalen räumlichen Verteilung der Bodenfeuchte entfällt.

Die Simulation des Bodenwasserhaushalts beginnt mit einem Wassergehalt bei Feldkapazität zu Beginn von Tag 1. In der Grundwassermodellierung ist entsprechend ein geeigneter Startzeitpunkt zu wählen oder ein ausreichender Vorlaufzeitraum von ca. 1 Jahr für die Bodenwasserhaushaltssimulation zu wählen. An allen folgenden Tagen entspricht der Wassergehalt zu Tagesbeginn dem Wassergehalt zum Ende des Vortages und ermittelt sich nach der folgenden Gleichung:

$$W_i = W_{i-1} + N_{i-1} - A_{i-1} - I_{i-1} - ET_{i-1} - SW_{i-1} \quad (13)$$

W_i [mm]	Bodenwassergehalt zu Tagesbeginn
W_{i-1} [mm]	Bodenwassergehalt am Ende des vorausgegangenen Tages
N_{i-1} [mm]	Niederschlag am vorausgegangenen Tag
A_{i-1} [mm]	Direktabfluss am vorausgegangenen Tag
I_{i-1} [mm]	Interzeption am vorausgegangenen Tag
ET_{i-1} [mm]	Evapotranspiration am vorausgegangenen Tag
SW_{i-1} [mm]	Sickerwasserabgabe an den tieferen Untergrund am Ende des vorausgegangenen Tages

Die einzelnen Komponenten der Gleichung (13) werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

b. Direktabfluss

Der Direktabfluss wird nach dem SCS-Verfahren des USDA nach [9] und [11] in der Modifikation für Mitteleuropa nach [12] ermittelt. Er setzt sich aus den beiden Anteilen

- Direktabfluss aus Hangneigung und Bodenfeuchte (A_{SCS}) und
- Oberflächenabfluss aus Versiegelungs- bzw. Befestigungsgrad (A_{VERS})

zusammen. Für die Berechnung werden die folgenden Eingangsdaten benötigt:

- Niederschlag [mm/d],
- Curve-Number-Wert (CN-Wert) [-],

- Hydrologischer Bodentyp nach SCS-Verfahren [-],
- Landnutzung [-],
- Hangneigung [m/m],
- Versiegelungsgrad [%].

Abbildung 20 zeigt qualitativ, wie sich die Parameter Bodenfeuchte, Hangneigung, Rückhaltevermögen der Flächennutzung und Durchsickerung des Bodens auf die Höhe des Direktabflusses auswirken.

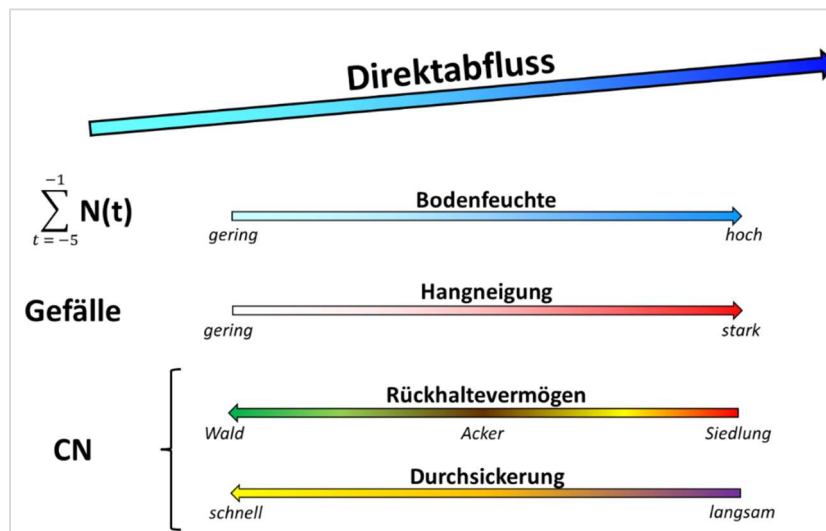


Abbildung 20: Einflussgrößen für die Abflussberechnung nach SCS-Verfahren

Der Einfluss der Hangneigung auf den Direktabfluss aus Hangneigung und Bodenfeuchte (A_{SCS}) wird durch eine stetige Funktion abgebildet und beschreibt qualitativ einen Direktabfluss gegen Null bei einer Hangneigung gegen Null und einen großen Direktabfluss bei großer Hangneigung.

Der CN-Wert beschreibt den maximalen Rückhalt des Bodens in Abhängigkeit von Gebietseigenschaften (Flächennutzung und Hydrologischer Bodentyp) und Bodenfeuchte [17]. Die aktuelle Bodenfeuchtekategorie ergibt sich im Modell aus der Niederschlagssumme der fünf vorausgegangenen Tage und in Abhängigkeit von Vegetations- oder Ruheperiode gemäß Tabelle 6. Die Bodenfeuchtekategorie bestimmt als einzige zeitabhängige Variable die Ausprägung des CN-Werts und somit die verbleibende maximale Rückhaltekapazität des Bodens an einem gegebenen Tag. Es gilt: Je größer der CN-Wert, desto geringer ist die Rückhaltekapazität.

Tabelle 6: Klassifizierung der Bodenfeuchtekategorie [11]

Bodenfeuchtekategorie	Niederschlagssumme der letzten 5 Tage [mm]	
	Vegetationsperiode	Ruheperiode
1	< 30	< 15
2	30 – 49	15 – 29
3	≥ 50	≥ 30

Das SCS-Verfahren unterscheidet vier Bodentypen, die das Versickerungsvermögen des Bodens klassifizieren (vgl. Tabelle 7). Es gilt: Je größer das Versickerungsvermögen ist, desto geringer ist der Abfluss.

Tabelle 7: Klassifizierung des Hydrologischen Bodentyps nach [17]

Bodentyp	Beschreibung
A	Böden mit großem Versickerungsvermögen, auch nach starker Vorbe- feuchtung, z.B. tiefe Sand- und Kiesböden
B	Böden mit mittlerem Versickerungsvermögen, tiefe bis mäßig tiefe Böden mit mäßig feiner bis mäßig grober Textur, z.B. mitteltiefe Sandböden, Löß, (schwach) lehmiger Sand
C	Böden mit geringem Versickerungsvermögen, Böden mit feiner bis mäßig feiner Textur oder mit wasserstauer Schicht, z.B. flache Sandböden, sandiger Lehm
D	Böden mit sehr geringem Versickerungsvermögen, Tonböden, sehr flache Böden über nahezu undurchlässigem Material, Böden mit dauernd sehr hohem Grundwasserspiegel

Der Oberflächenabfluss aus Versiegelungs- bzw. Befestigungsgrad (A_{VERS}) wird in Abhängigkeit von der Größe des Versiegelungs- bzw. Befestigungsgrads ermittelt, da davon ausgegangen wird, dass dieser Anteil der Kanalisation zufließt und somit nicht zur Versickerung zur Verfügung steht. Hierfür wird die aus der Bodenwasserbilanz resultierende Sickerwasserrate um den Anteil der Versiegelung reduziert.

c. Interzeption

In RUBINFLUX werden die Prozesse Interzeption und Interzeptionsverdunstung durch die in Hoyningen-Huene [6] und ATV-DVWK-M 504 [7] beschriebenen Verfahren abgebildet. Hierfür werden die folgenden Eingangsdaten benötigt:

- (Freiland-)Niederschlag N_o [mm]
- Blattflächenindex LAI [m^2/m^2]
- Max. mögliche Verdunstung ET_{max} [mm]

Die tägliche Interzeptionshöhe wird in Abhängigkeit des für die Flächennutzung gegebenen Blattflächenindex – die Summe der Blattflächen über der Fläche des Bodens – bestimmt [6].

d. Evapotranspiration

Die potenzielle Verdunstung wird nach Monteith-Rijtema in der Version der Gras-Referenz-Verdunstung nach FAO [8] berechnet und kulturartenspezifisch durch Bestandskoeffizienten angepasst. Das zu Tagesbeginn im Interzeptionsspeicher verfügbare Wasser wird zu Lasten der potenziellen Verdunstung des Tages vermindert. Die Disse-Funktion [13] dient der Reduktion der potenziellen Verdunstung auf die tatsächliche Transpiration. Sinkt der Wassergehalt im Wurzelraum des Bodens, so ist die Transpiration reduziert. Die Ermittlung der täglichen, tatsächlichen (aktuellen) Verdunstung ET_a [mm/Tag] über den Boden (Evaporation) und die Vegetation (Transpiration) erfolgt nach dem Berechnungsweg

$$ET_0 \rightarrow f_h \times ET_0 \rightarrow ET_{max}, E_I \rightarrow ET_a \quad (14)$$

ET_0 [mm/Tag]	Gras-Referenz-Verdunstung
f_h [-]	Korrekturfaktor Hangexposition [10]
ET_{max} [mm/Tag]	Maximal mögliche Evapotranspiration (abhängig von Landnutzung und hydrologischem Bodentyp)
E_I [mm/Tag]	Interzeptionsverdunstung

Hierfür werden die folgenden Eingangsdaten benötigt:

- Lufttemperatur [°C]
- Dampfdruck [hPa] oder rel. Luftfeuchte [%]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Sonnenscheindauer [h] oder Globalstrahlung [kWh/m²]
- Höhe über Meeresniveau [mNHN]
- Geographische Breite [°]
- Geländemodell zur Ermittlung von Hangneigung und Exposition [mNHN]
- Bestandskoeffizient K_c (Standortfaktor) [-]
- Wassergehalt bei Permanentem Welkepunkt [Vol.-%]
- Wassergehalt bei Feldkapazität [Vol.-%]
- Simulationstiefe [dm]

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Lage von Hangbereichen zur Einfallrichtung der Sonneneinstrahlung wird die Grasreferenzverdunstung in Abhängigkeit der Hangexposition korrigiert. Je nach Ausrichtung des Hanges nach Norden oder Süden und der Neigung erfolgt eine Reduzierung (Nordhang) oder Erhöhung (Südhang) der potenziellen Verdunstungsrate.

Bei den Bestandskoeffizienten zur Ermittlung von ET_{max} wurde zwischen Ackerflächen und allen anderen Landnutzungen unterschieden. Für Ackerflächen wurden monatliche Bestandskoeffizienten aus empirischen Untersuchungen einer Lysimeteranlage [7] übernommen. Für alle anderen Flächen wurden nach [14] mittlere jährliche Standortfaktoren für die definierten Landnutzungsklassen und Hydrologischen Bodentypen abgeleitet und in Abhängigkeit von Vegetations- und Ruhephasen in monatliche Bestandskoeffizienten überführt.

Die Interzeptionsverdunstung E_I wird aus der Interzeptionshöhe, der Anfangsfüllhöhe des Interzeptionsspeichers und der maximalen, standortbezogenen Verdunstung ET_{max} abgeleitet.

Zur Bestimmung der tatsächlichen (aktuellen) Verdunstung ET_a wird die maximale Verdunstung entsprechend der aktuellen Bodenfeuchte reduziert. Die Reduktionsbeziehung nach [13] beschreibt den mit abnehmender Bodenfeuchte überproportionalen Rückgang der tatsächlichen Verdunstung.

Die Simulationstiefe gibt die Mächtigkeit der Bodenschicht an, die in der Berechnung betrachtet wird. Standardmäßig ist sie auf 13 dm eingestellt.

e. Sickerwasserabgabe

Ebenso wie sich die Transpiration mit abnehmender Bodenfeuchte nichtlinear verringert, vermindert sich die Durchsickerung des Bodens. RUBINFLUX berücksichtigt mit einer neu entwickelten Entleerungsfunktion, dass nicht erst ab der Überschreitung der Feldkapazitätsgrenze Wasserabgabe aus dem Boden stattfindet. Durchsickerung beginnt vor Erreichen der Feldkapazität und ist verzögert nach dem Überschreiten dieser Grenze. Die tägliche Sickerwasserabgabe (SW_i) wird nach den folgenden Gleichungen berechnet:

$$SW_i = \begin{cases} s_i \cdot x \cdot d, & x > 1 \\ s_i \cdot d, & x \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$s_i = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (16)$$

$$x = W_i \cdot d^{-1} - \theta_{FK} = \theta_i - \theta_{FK} \quad (17)$$

SW_i [mm]	Sickerwasserabgabe an den tieferen Untergrund
W_i [mm]	Bodenwassergehalt zu Tagesbeginn
θ_i [%]	Bodenwassergehalt zu Tagesbeginn
θ_{FK} [%]	Bodenwassergehalt bei Feldkapazität
s_i [-]	Sickerungsfaktor
d [dm]	Simulationstiefe
x [%]	Differenz zwischen aktuellem Bodenwassergehalt zu Tagesbeginn und Wassergehalt bei Feldkapazität

Bei Bodenfeuchtwerten nahe der Feldkapazität tritt eine kräftige Sickerwasserabgabe auf (Abbildung 21), oberhalb von $\theta_{FK} + 1\text{Vol.}\%$ ist sie sogar sehr stark, aber niemals so stark, dass alles überschüssige Wasser sofort nach unten abgeschlagen wird. Mit abnehmender Feuchte lässt die Formulierung auch unterhalb der Feldkapazität noch Wasserabgabe zu. Die Wasserabgabe aus dem 13 dm mächtigen Boden wird als Grundwasserneubildung definiert.

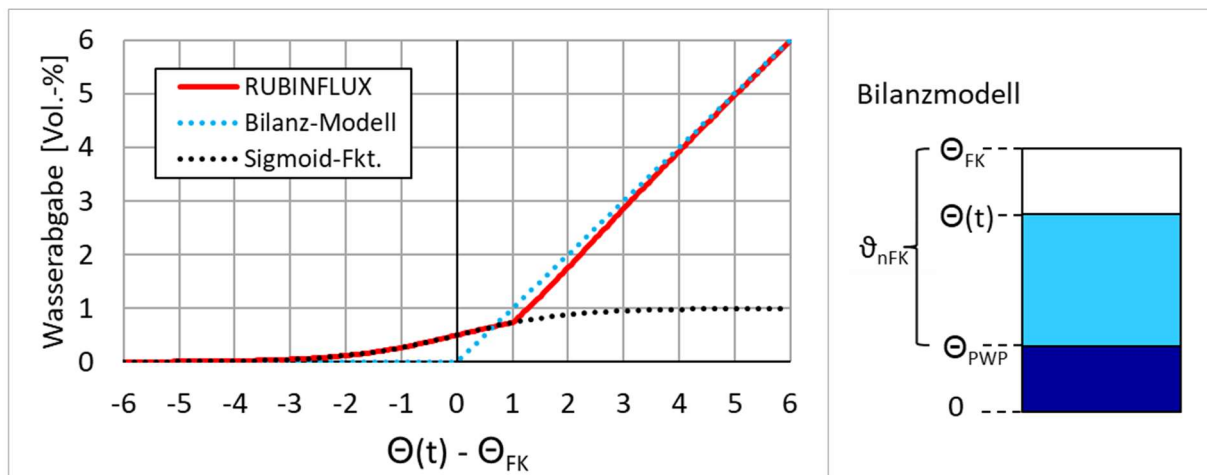


Abbildung 21: RUBINFLUX-Entleerungsfunktion für den Bodenspeicher (Θ_{FK} Bodenwassergehalt bei Feldkapazität [%], Θ_{PWP} Bodenwassergehalt bei Permanentem Welkepunkt [%], $\Theta(t)$ aktueller Bodenwassergehalt [%], ϑ_{nFK} nutzbare Feldkapazität [%])

4.6.2 Eingangsp Parameter für SPRING

Die für die Ermittlung der Grundwasserneubildung nach der Methode RUBINFLUX notwendigen Eingangsdaten sind unterteilt in

- Wetterdaten-Zeitreihen
Zuweisung über in SPRING definierte Zonen mit eindeutiger Kennzahl
- Flächendifferenzierte Standortparameter
Attributierung über SPRING-Netz
- Typisierte Standortparameter
in separater Datenbank modifizierbar
- Standortparameter, die sich aus den vorhandenen Modelldaten bzw. aus anderen Parametern berechnen lassen

Eine vereinfachte Zusammenstellung zeigt Tabelle 8.

Die notwendigen Wetterdaten beinhalten die tägliche Niederschlagsmenge und die täglichen Verdunstungsgrößen (Lufttemperatur, Sättigungsparameter über Dampfdruck oder relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlungsparameter über Sonnenscheindauer oder Globalstrahlung).

Die flächendifferenzierten Standortparameter umfassen die Wassergehalte des Bodens bei Feldkapazität und permanentem Welkepunkt, das Versickerungsvermögen des Bodens (Hydrologischer Bodentyp), die Landnutzung und ihr Versiegelungs- bzw. Befestigungsgrad sowie die Geländeoberfläche und die geographische Breite. Die Flächendifferenzierung erfolgt anhand der Netzelemente des SPRING-Modells.

Standortparameter, die von der Kombination anderer Standortparameter abhängen und für die somit nicht die Notwendigkeit einer flächendifferenzierten Definition besteht, werden als typisierte Standortparameter definiert. Ein Beispiel hierfür ist der für die Ermittlung der maximal möglichen Verdunstung notwendige Bestandskoeffizient. Dieser gilt (ohne weitere räumliche Eigenschaften) für Standorte mit identischer Landnutzung und identischem hydrologischen Bodentyp gleichermaßen.

Standortparameter wie Lagehöhe, Gefälle und Hangexposition werden aus der Geländeoberfläche, die standardmäßig auf das Modellnetz zugewiesen wird, berechnet. Die Bodenfeuchte ist ein variabler Parameter, der sich während der Berechnung verändert.

Tabelle 8: Übersicht der benötigten Prozess-Parameter zur Ermittlung der Grundwasserneubildung nach der Methode RUBINFLUX

Prozess	Parameter	Zeitlich variabel	Abhängigkeit
potenzielle Verdunstung	Verdunstungsgrößen	ja	
	Lagehöhe ü. Meeresspiegel	nein	Geländeoberfläche
	Geographische Breite	nein	
	Hangexposition	nein	Geländeoberfläche
	Bestandskoeffizient	ja	Hydrologischer Bodentyp Flächennutzung
Interzeption, Interzeptionsverdunstung	Niederschlag	ja	
	Blattflächenindex	ja	Flächennutzung
schnelle Abflusskomponenten	Niederschlag	ja	
	Gefälle	nein	Geländeoberfläche
	Curve-Number-Wert	nein	Hydrologischer Bodentyp Flächennutzung
	Bodenfeuchte	ja	Niederschlag
	Versiegelungs-/ Befestigungsgrad	nein	
aktuelle Verdunstung	Niederschlag	ja	
	Wassergehalte FK, PWP	nein	
	Simulationstiefe	nein	Hydrologischer Bodentyp
Schnee-Modul-Komponenten	Niederschlag	ja	
	Verdunstungsgrößen	ja	

Wetterdaten → Zeitreihe
Standortparameter → flächendifferenziert
Standortparameter → typisierbar
Standortparameter → aus Modell/Berechnung ableitbar

a. Geländehöhen

Zur Ermittlung des Gefällegradienten und der Hangexposition wird die Geländehöhe benötigt. Das verwendete Geländemodell wird in Kap. 4.1 beschrieben.

b. Bodenparameter

Als Grundlage für die anzusetzenden Bodenparameter diene die Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200, Blatt CC2310 Helgoland V1.1, 2009). RUBINFLUX benötigt eine Bodenartengruppe (Ziffern 0 bis 9), die sich aus der Bodenart ergibt (Abbildung 22). Auf der Basis der Verknüpfungsregel 1.11 der AG Boden [18] werden aus der Bodenart die Wassergehalte bei Erreichen der Feldkapazität und bei Erreichen des Permanenten Welkepunkts abgeleitet Tabelle 9. Abbildung 23 zeigt die flächendifferenzierte Zuordnung der verwendeten Bodenparameter.

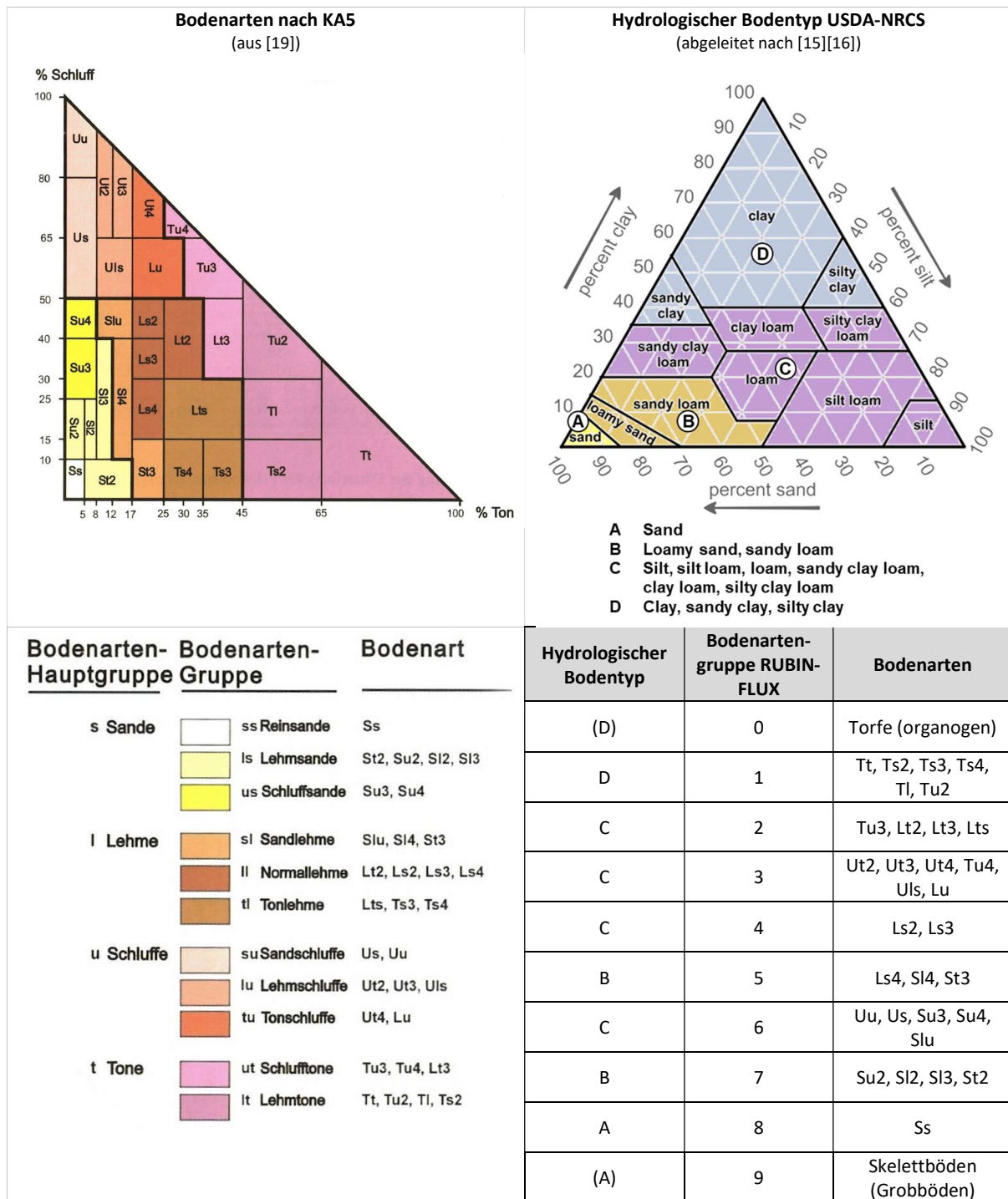


Abbildung 22: Ableitung des Hydrologischen Bodentyps und der Bodenartengruppe aus den Bodenarten nach KA5 [19]

Tabelle 9: Ableitung der Boden-Parameter [18]

Bodentyp BÜK200	Profil	FK [mm/ dm]	nFK [mm/ dm]	We [cm]	Wasser- gehalt FK [Vol.-%]	nFK [Vol.-%]	Wasser- gehalt PWP [Vol.-%]	Hydrolog. Bodentyp
Q/MC4	fSms	224,5	178,5	80	28,1	22,3	5,8	A
Q5	Su2,fSms	169	139	60	28,2	23,2	5	A
ZS2	mSfs	109	89	25	43,6	35,6	8	A
ZS3	fSms	233,5	179	50	46,7	35,8	10,9	A
G/MR-MC3	fS	250	197	50	50	39,4	10,6	A
MRz1	ffS	318	189	50	63,6	37,8	25,8	A

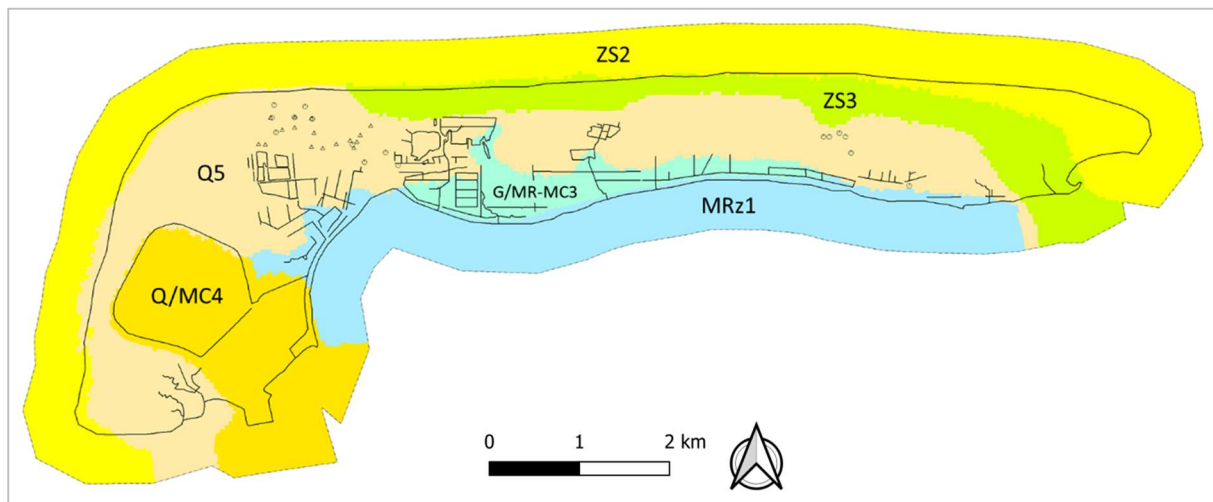


Abbildung 23: Flächen für die Zuordnung der Boden-Parameter im Modell entspr. Tabelle 9

c. Flächennutzung

Die Grundlagen zur Flächennutzung wurden dem Basis-DLM [36] entnommen. Die Flächennutzung wird in die in Tabelle 10 enthaltenen Nutzungsgruppen unterschieden.

Tabelle 10: Flächennutzungsgruppen mit der in SPRING vergebenen Kennzahl

ID	Nutzung
1	Grünland
6	Wasserfläche
7	Wohnbau, Industrie, Gewerbe, Schiffsverkehr, Flughafen, öffentliche Einrichtungen, sonstige Flächen mit Gebäuden
10	Düne
15	Hecken, Gebüsch, Streuobst

Die dem Modellnetz zugewiesenen Flächennutzungen können Abbildung 24 entnommen werden.

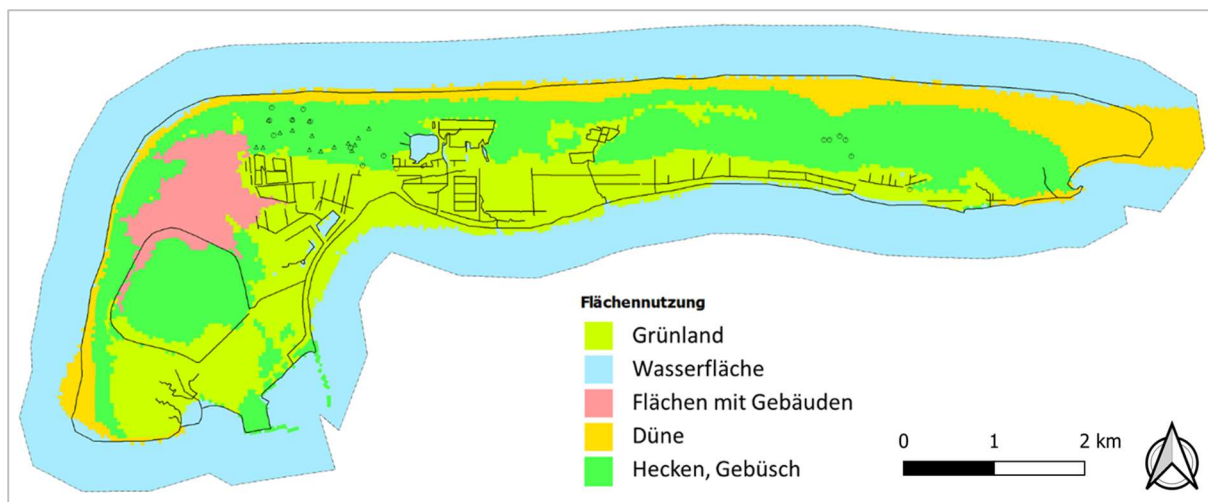


Abbildung 24: Im Modell zugewiesene Flächennutzungen

Der prozentuale Versiegelungsgrad wurde den Daten des European Union's Copernicus Land Monitoring Service [40] entnommen und ist in Abbildung 25 dargestellt. Für Flächen mit Gebäuden (ID = 7) variiert der Versiegelungsgrad abhängig vom Anteil der tatsächlich bebauten Fläche. Auf Gewässerflächen (ID = 6) wird angenommen, dass keine Neubildung stattfindet, deshalb wird hier der Versiegelungsgrad auf 100% gesetzt. Alle übrigen Flächen werden unter Vernachlässigung von Verkehrswegen als nicht versiegelt angenommen, der Versiegelungsgrad ist hier 0%.

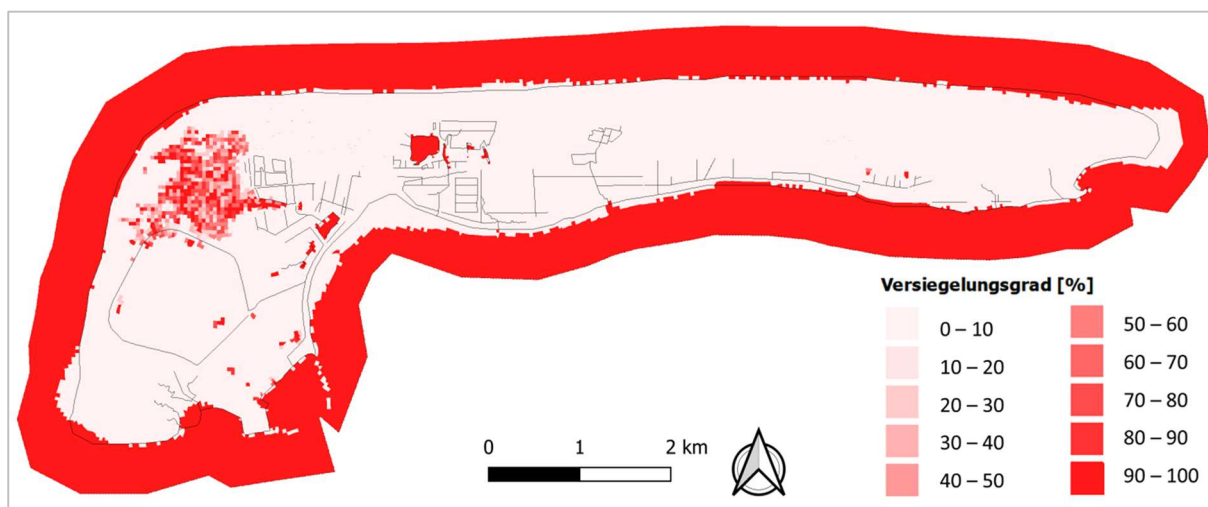


Abbildung 25: Im Modell zugewiesene Versiegelungsgrade in % [40]

d. Wetterdaten

Für die Ermittlung der instationären Grundwasserneubildungsraten mit RUBINFLUX werden für den gesamten Zeitraum 1961-2022 folgende Wetterdaten in Tageswerten benötigt:

- Niederschlag als Tagessumme in mm
- Verdunstungsparameter:
 - Tägliche mittlere Lufttemperatur in °C

- Täglicher mittlerer Dampfdruck in hPa
- Tägliche Sonnenscheindauer in Stunden
- Tägliche mittlere Windgeschwindigkeit 2 m über Gelände in m/s

Die Parameter wurden aus folgenden Klimastationen des DWD übernommen:

- Station 2861, Langeoog:
vorhandene Messgrößen: Niederschlag, Sonnenscheindauer, Temperatur, relative Luftfeuchte, Dampfdruck
- Station 3631, Norderney:
vorhandene Messgrößen: Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Temperatur, relative Luftfeuchte, Dampfdruck

Die Zeitreihen wurden aus den vorhandenen Daten der Station Langeoog erstellt. Messlücken wurden mit Daten der Station Norderney ergänzt oder mit Hilfe von Monatsmittelwerten gefüllt. Es entsteht eine Zeitreihe mit den Tageswerten für Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit (Abbildung 26), die für das gesamte Modellgebiet verwendet wird.

	A	B	C	D	E	F
1	Datum	P	T	S	ea	u2
2	01.01.1961	1,2	2,4	0	7,2	4,60258939
3	02.01.1961	6,6	2,6	0	6,5	4,60258939
4	03.01.1961	4,8	3,9	2	7,1	4,60258939
5	04.01.1961	4,6	3,4	0,1	6,7	4,60258939
6	05.01.1961	1	2,9	3,9	6,9	4,60258939
7	06.01.1961	5	2,8	0	6,9	4,60258939
8	07.01.1961	0,3	2	0	6,4	4,60258939
9	08.01.1961	3,1	3,4	0	7,3	4,60258939
10	09.01.1961	3,4	3	3	7,1	4,60258939
11	10.01.1961	9,1	2,3	0	6,7	4,60258939

Legende:

P – Niederschlag als Tagessumme [mm]

T – Tägliche mittlere Lufttemperatur [°C],

S – Tägliche Sonnenscheindauer [h],

ea – Täglicher mittlerer Dampfdruck [hPa],

u2 – Tägliche mittlere Windgeschwindigkeit 2 m über Gelände [m/s]

Abbildung 26: Exemplarische Zeitreihe der Wetterdaten für RUBINFLUX (Ausschnitt)

4.6.3 Ermittlung der instationären Grundwasserneubildung

Mit den beschriebenen Eingangsdaten wurde die Neubildungsberechnung durchgeführt. Die berechnete tägliche Neubildung geht dabei als Quellterm direkt in die instationäre Strömungsberechnung an

den Elementen der Modelloberfläche ein. Abbildung 27 zeigt die mit RUBINFLUX berechneten Jahressummen der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2020. Es wurde ein Zeitraum von 50 Jahren gewählt, um mit dem so ermittelten 50jährigen Mittel der Grundwasserneubildung das Modell stationär zu kalibrieren.

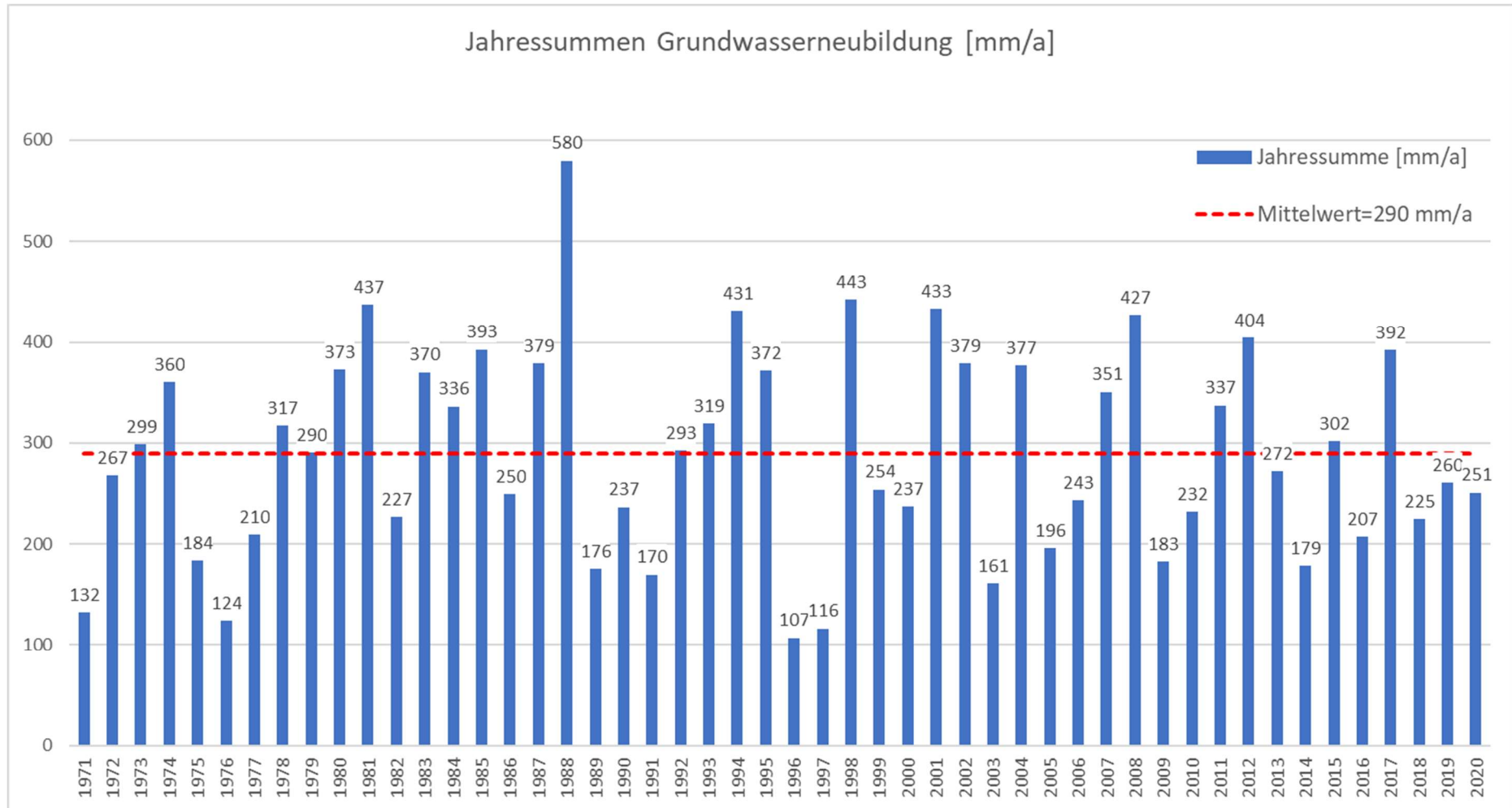


Abbildung 27: Berechnete Jahressummen der Grundwasserneubildung 1971-2020

Der Mittelwert der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2020 liegt bei 290 mm/a. Die berechneten Jahressummen liegen zwischen 107 und 580 mm, wobei die meisten Werte im Bereich 200 bis 400 mm liegen.

4.6.4 Vergleich der Verfahren zur Grundwasserneubildungsberechnung

Die Süßwasserlinse wird aus Niederschlag gespeist und von dem umgebenden Salzwasser gehalten. Entsprechend wird die Neubildung als einziger Quellterm besonders beachtet. Dabei wird auf RUBINFLUX [5] für die instationäre Neubildungsberechnung gesetzt, um den Prozess möglichst genau abbilden zu können. Der Vergleich zwischen der von RUBINFLUX ermittelten mittleren Jahressumme über 50 Jahre und den mit dem Verfahren mGROWA22 berechneten 30-Jahres-Mittelwerten der Grundwasserneubildung für die Insel Langeoog [37] ergibt geringe Abweichungen unter 8% (Tabelle 11).

Tabelle 11: Vergleich der mittleren Jahressummen der Grundwasserneubildung für die Verfahren mGROWA22 und RUBINFLUX

Zeitraum	Mittlere Jahressumme GWN-mGROWA22 [mm/a]	Mittlere Jahressumme GWN-RUBINFLUX [mm/a]	Prozentuale Abweichung [%]
1961-1990	281	297*	5,7
1971-2000	268	289	8,0
1981-2010	289	304	5,0
1991-2020	275	285	3,7
<i>Mittelwert</i>	<i>278</i>	<i>290**</i>	<i>4,3</i>

*Mittelwert der Jahre 1971-1990

**Mittelwert der Jahre 1971-2020

Bei der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung ähneln sich die Verfahren RUBINFLUX und mGROWA22 im südlichen Bereich. Im nördlichen Streifen ergeben sich durch unterschiedliche Annahmen zu den Eingangsparametern und unterschiedlichen methodischen Ansätzen Unterschiede (Abbildung 28).

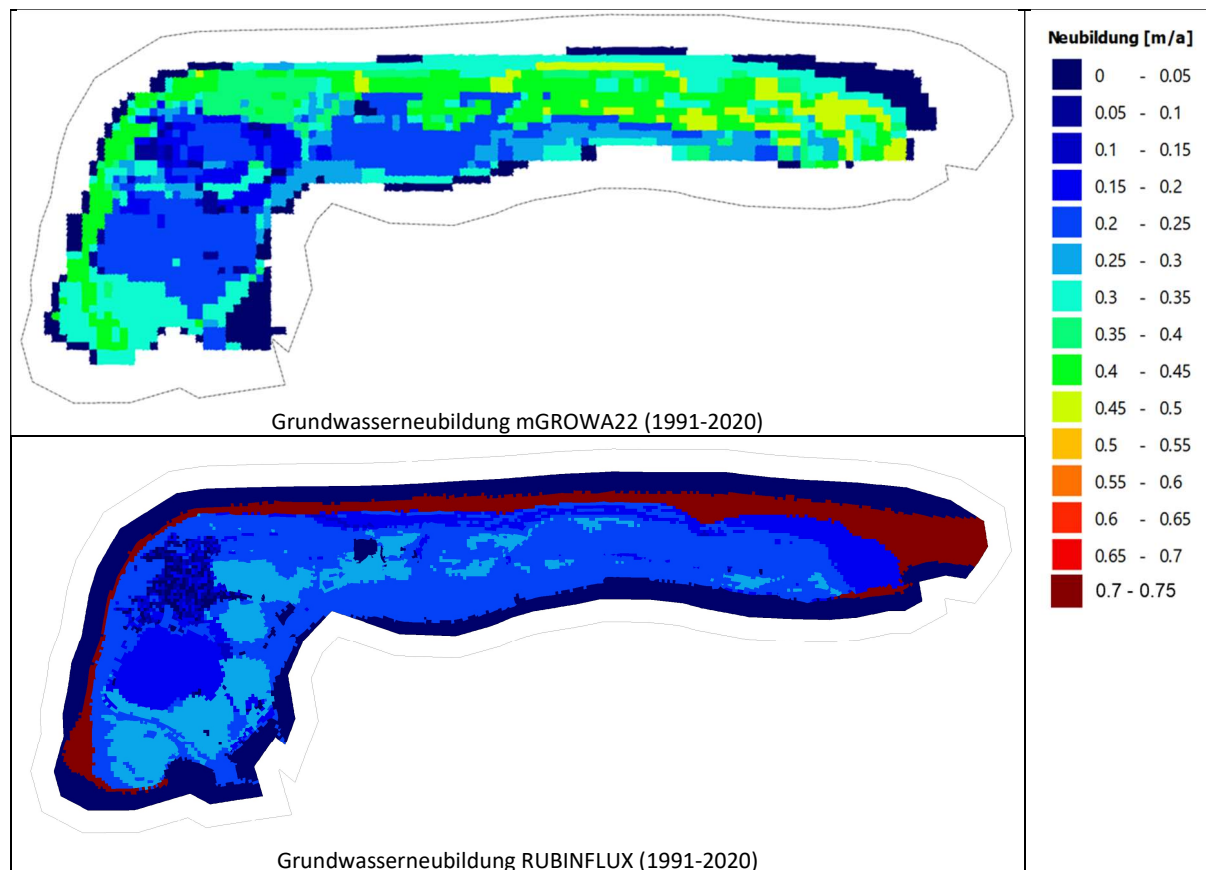


Abbildung 28: Berechnete flächendifferenzierte Grundwasserneubildung der Verfahren mGROWA22 (oben) und RUBINFLUX (unten)

Ermittelte Zeitreihen für die flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsraten können anhand von Grundwasserganglinien (siehe Kap. 7.2) sowie Gewässerabflusszeitreihen (Abflusspegel und/oder Ergebnisse von hydraulischen Berechnungen) geprüft werden.

Da für Langeoog keine gemessenen Abflusspegel zur Verfügung stehen, werden hier die Ergebnisse für ein exemplarisches Teileinzugsgebiet außerhalb von Langeoog gezeigt, um die Verfahren RUBINFLUX und mGROWA gegenüberzustellen [41]. In diesem exemplarischen Teileinzugsgebiet wurden dafür Grundwasserströmungsberechnungen mit instationären flächendifferenzierten Grundwasserneubildungsraten beider Verfahren in Monatsschritten durchgeführt. Aus den im Modell ermittelten Grundwasserzuflüssen in das Gewässer des Teileinzugsgebietes wurde über eine vollständige Gewässervernetzung am Unterlauf des Einzugsgebietes jeweils der Basisabfluss ermittelt und der gemessenen Pegelabflussganglinie an diesem Punkt gegenübergestellt (Abbildung 29). Die Basisabflussganglinie aus RUBINFLUX bildet die Dynamik der gemessenen Ganglinie besser ab als die Basisabflussganglinie aus mGROWA. Anschließend wurde das gleiche Einzugsgebiet mit der RUBINFLUX-Grundwasserneubildung in Tagesschritten und unter zusätzlicher Berücksichtigung der schnellen Abflusskomponenten (oberflächennahe Abflüsse) simuliert. Die resultierende Gesamtabflussganglinie ist in Abbildung 30 dargestellt. Sie zeigt, dass auch der berechnete Gesamtabfluss eine gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Pegel aufweist.

Die Ergebnisse zeigen, dass RUBINFLUX als Methode zur Grundwasserneubildungsberechnung sehr gut geeignet ist, da die berechneten Mittelwerte nur gering vom offiziell validierten Verfahren

mGROWA22 abweichen und die instationäre Grundwasserdynamik nur unter Ansatz einer zeitlich entsprechend hoch aufgelösten Grundwasserneubildung in Tagesschritten abgebildet werden kann.

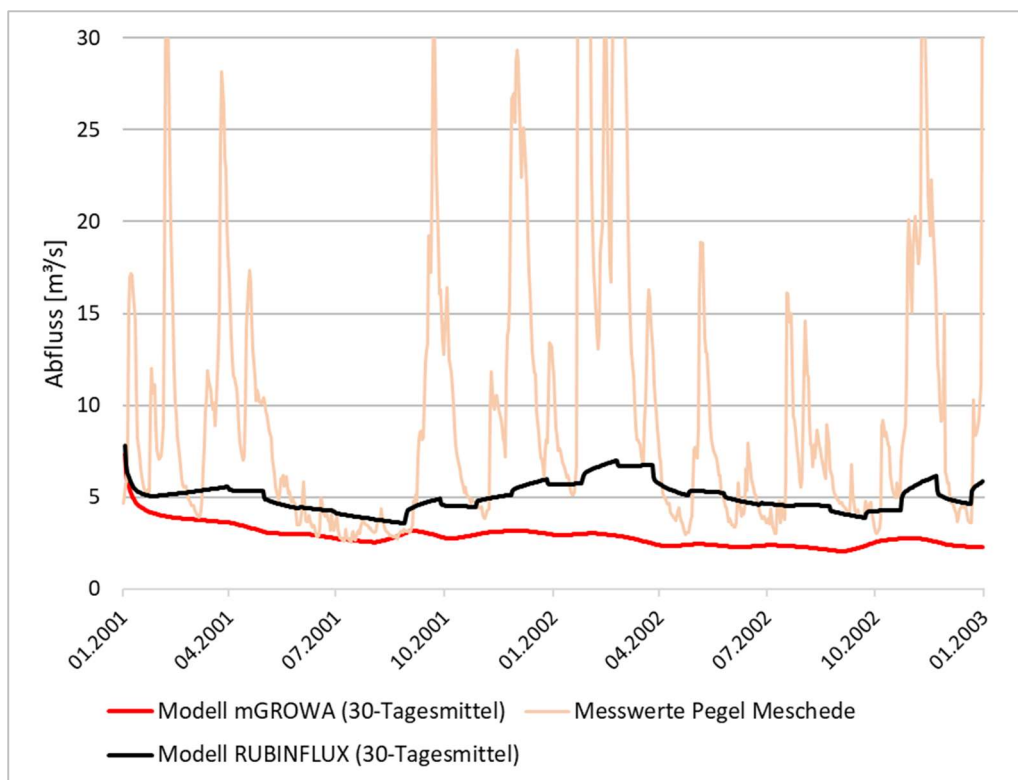


Abbildung 29: Gegenüberstellung berechneter Basisabflusszeitreihen auf der Basis der Neubildung (Monatswerte) aus mGROWA (rot) und RUBINFLEX (schwarz) mit der gemessenen Zeitreihe (orange) am Pegel in einem mittelgroßen Einzugsgebiet [41]

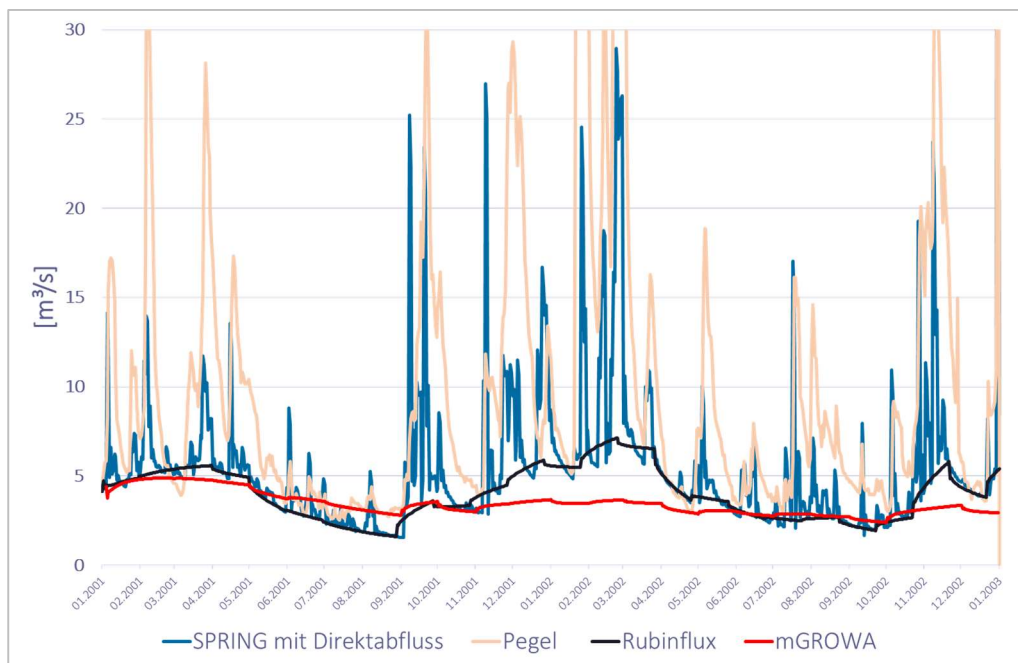


Abbildung 30: Gegenüberstellung berechneter Basisabflusszeitreihen auf der Basis der Neubildung (Monatswerte) aus mGROWA (rot) und RUBINFLEX (schwarz) sowie der von SPRING berechneten Abflussganglinie mit Direktabfluss (Neubildung in Tageswerten) (blau) mit der gemessenen Zeitreihe (orange) am Pegel in einem mittelgroßen Einzugsgebiet [41]

4.7 Hydraulische Randbedingungen

Die Neubildungsrate (Kap. 4.6) und die Entnahmen (Kap. 4.5) finden mathematisch durch Definition von Randbedingungen 2. Art (Neumann-Randbedingung) auf den entsprechenden Netzelementen bzw. Netzknoten Berücksichtigung. Die offenen, stehenden Wasserflächen (Kap. 4.2) werden realisiert als Nebenbedingung, die das zu berechnende Potential der zugehörigen Netzknoten gleichsetzt. Bei der beschriebenen Leakagebeziehung der Vorfluter in Kap. 5.3 handelt es sich um Randbedingungen 3. Art (Cauchy-Randbedingung). An der Geländeoberfläche exfiltrierendes Grundwasser wird über eine Sonderform der Randbedingung 1. Art (Dirichlet-Randbedingung) in die mathematische Formulierung implementiert. Für den Fall, dass die freie Grundwasseroberfläche die Geländeoberfläche erreicht oder übersteigt, wird das Potential auf die Höhe des Geländes festgeschrieben.

Am äußeren Rand wird über die gesamte Modelltiefe eine Potentialrandbedingung (Dirichlet) vorgegeben. In der obersten Schicht entspricht sie der Lagehöhe von 0 m. In den darunterliegenden Schichten wird sie abhängig von Dichte und Lagehöhe so umgerechnet, dass sie die Druckverteilung des Salzwassers im Meer widerspiegelt.

Wellengang und Tide sind gegenüber der Grundwasserneubildung vernachlässigbar in Bezug auf die Wasserbilanz und die Begrenzung der Süßwasserlinse. Sie wurden bei den hydraulischen Randbedingungen nicht berücksichtigt. Anhand der instationären Kalibrierung wird gezeigt, dass diese Annahme richtig ist (Kap. 7.2).

Die Unterfläche des Modells wird als undurchlässiger Rand mit einer Randbedingung 2. Art als $q=0$ (q – Fluss über den Rand) definiert.

4.8 Dichteparameter

Die Berechnung in SITRA, dem Berechnungsmodul für stationäre/instationäre Strömung, Stoff- und Wärmetransport ohne/mit Dichte in SPRING, sieht eine lineare Abhängigkeit der Dichte ρ von der Konzentration c vor. Die allgemeine Gleichung für eine konzentrationsabhängige Dichte $\rho(c)$ lautet:

$$\rho(c) = \rho_0 + \alpha(c - c_0) \quad (18)$$

Für die Insel Langeoog wurde mit den folgenden Parametern gerechnet: die Dichte der Referenzkonzentration $\rho_0 = 999,793 \text{ kg/m}^3$ für Süßwasser. Die Salzkonzentration in SPRING beträgt $c = 0,0342801 \text{ kg/kg}$. Die Dichtesteigung ergibt sich zu $\alpha = (1023,793 - 999,793) / 0,0342801 = 700,11 \text{ [(kg/m}^3\text{)]/(kg/kg)}$. Der Zusammenhang zwischen c und ρ ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Salzkonzentration des Meerwassers beträgt 35.000 mg/l , seine Dichte ist 1.024 kg/m^3 . Damit liegt das Dichteverhältnis bei $0,024$.

Die Randbedingung $c = 0,0342801 \text{ kg/kg}$ wird am gesamten äußeren, vertikalen sowie am unteren Rand definiert. An der Oberfläche mit Neubildung wird $c = 0$ gesetzt.

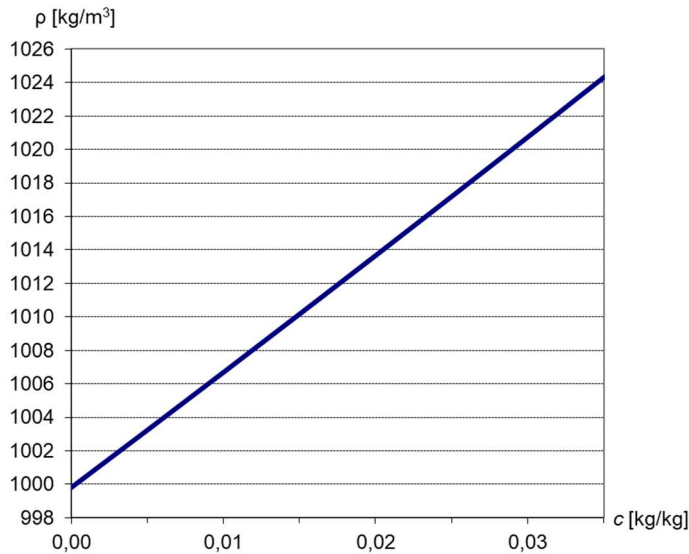


Abbildung 31: Zusammenhang zwischen der Konzentration c [kg/kg] in SPRING und der Dichte ρ [kg/m³]

4.9 Wärmeparameter

Abbildung 32 verdeutlicht die temperaturrelevanten Randbedingungen, die im Modell abgebildet sind.

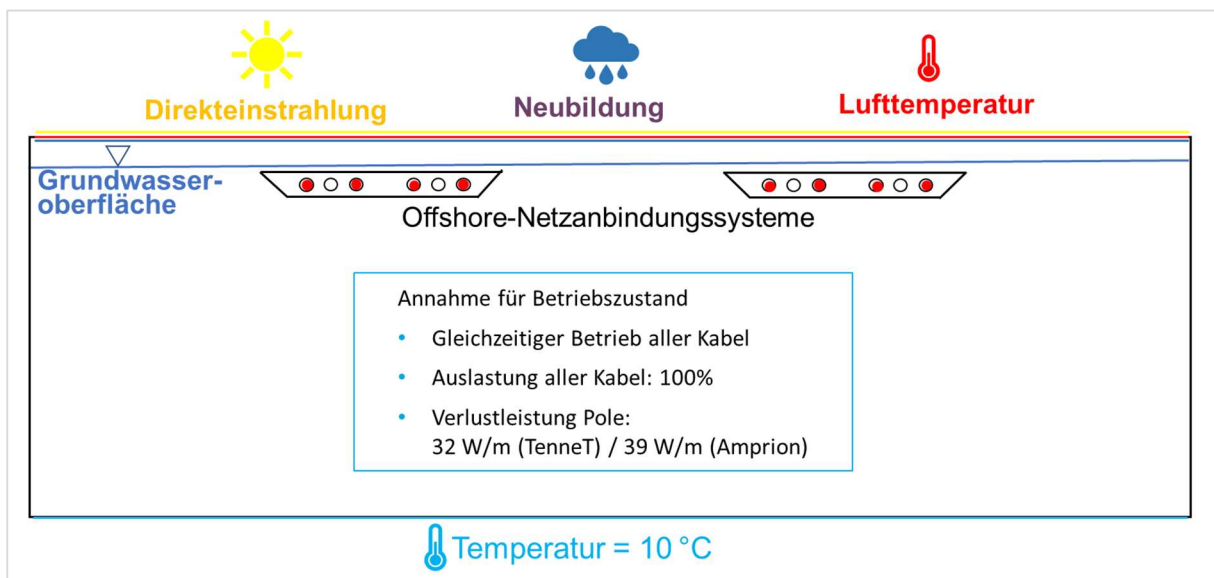


Abbildung 32: Modellkonzept der temperaturrelevanten Randbedingungen (schematisch)

Für die Wärmeberechnung sind thermische Randbedingungen zu berücksichtigen. Für das Grundwasser wird eine Temperatur von 10 °C angenommen und an der Modellunterkante vorgegeben.

Die hauptsächliche thermische Randbedingung an der Geländeoberkante ist die Lufttemperatur. Diese wird aus den historischen Wetterdaten der Klimastationen des DWD (siehe Kap. 4.6.2d) entnommen und entsprechend zugeordnet. Die Lufttemperatur ist als Tagesmittelwert instationär vorgegeben. Ein Wärmeübergangskoeffizient bewirkt eine Dämpfung der Randbedingung. Dieser numerische Koeffizient wurde anhand von Messwerten aus Feldversuchen kalibriert. Er erlaubt zusätzlich, dass sich die Geländeoberkante aufgrund der Kabelabwärme erwärmen kann.

Darüber hinaus ist dieser Koeffizient auch für eine weitere Randbedingung an der Geländeoberfläche notwendig. Bei direkter Sonneneinstrahlung kann die Temperatur des Oberbodens die der Luft übersteigen. Dafür wird die Globalstrahlung in ihre zwei Komponenten aufgeteilt: die Hintergrundstrahlung und die Direktstrahlung, die von den Sonnenstunden abhängt. Der Anteil der Hintergrundstrahlung wird dabei der Lufttemperatur zugeschlagen und nicht gesondert berücksichtigt. Die Direktstrahlung wird dagegen als Energierandbedingung an der Geländeoberkante zugewiesen. Diese hängt von der Anzahl Sonnenstunden pro Tag ab, welche für die verwendeten Klimastationen des DWD vorliegen.

Einen zusätzlichen Wasser- und auch Wärmeeintrag findet aufgrund des Niederschlags an der Geländeoberkante statt. Die aus der Neubildungsberechnung resultierende Menge wird als Mengenrandbedingung an der Modelloberkante angesetzt. Durch die gleichzeitige Temperaturrandbedingung erhält das eindringende Wasser die an diesem Rand vorgegebene Temperatur.

4.10 Kabeltrassen

Auf der Insel Langeoog sollen für die Modellierung insgesamt acht ONAS in das Modell integriert und eine Wärmemodellierung für den gleichzeitigen Betrieb dieser Systeme durchgeführt werden. Die ONAS werden dabei in 2 verschiedenen Trassenkorridoren in das Modell eingebracht, wobei drei ONAS im westlichen Trassenkorridor C6a und die übrigen fünf ONAS im östlichen Trassenkorridor C6b in das Modell integriert werden (Abbildung 33). Die in den Trassenkorridoren zur Ausführung kommenden ONAS werden als ± 525 kV-HGÜ-Systeme mit einer Übertragungsleistung von 2 GW geplant. Für ein ± 525 kV-HGÜ-System werden insgesamt vier Kabel benötigt: zwei Gleichstromkabel/HVDC Kabel (+/- Pole), ein Lichtwellenleiter (LWL) und ein metallischer Rückleiter. Für die Wärmemodellierung ist der Lichtwellenleiter nicht relevant, sodass im Modell nur die beiden HVDC-Kabel und der metallische Rückleiter abgebildet werden. Hinsichtlich der räumlichen Anordnung der beiden HVDC-Kabel (+/- Pole) und des metallischen Rückleiters berücksichtigt das Modell unterschiedliche Planungsansätze von TenneT und Amprion. Demnach wird für die TenneT Systeme eine Dreiecks-Anordnung gewählt, bei der die beiden HVDC-Kabel (+/- Pole) auf gleicher Tiefenlage im Modell platziert werden und der metallische Rückleiter mittig, etwa 5 m unterhalb der beiden Polkabel liegt. Für die Amprion-Systeme ergibt sich eine parallele Anordnung, bei der alle 3 Kabel parallel zueinander und auf gleicher Tiefenlage im Modell platziert werden. Maßgebend für die Tiefe der Kabel ist eine maximale Überdeckung von 38 m, bzw. 43 m bei den metallischen Rückleitern der TenneT. Diese gilt gemessen vom Eintritts-/Austrittspunkt.

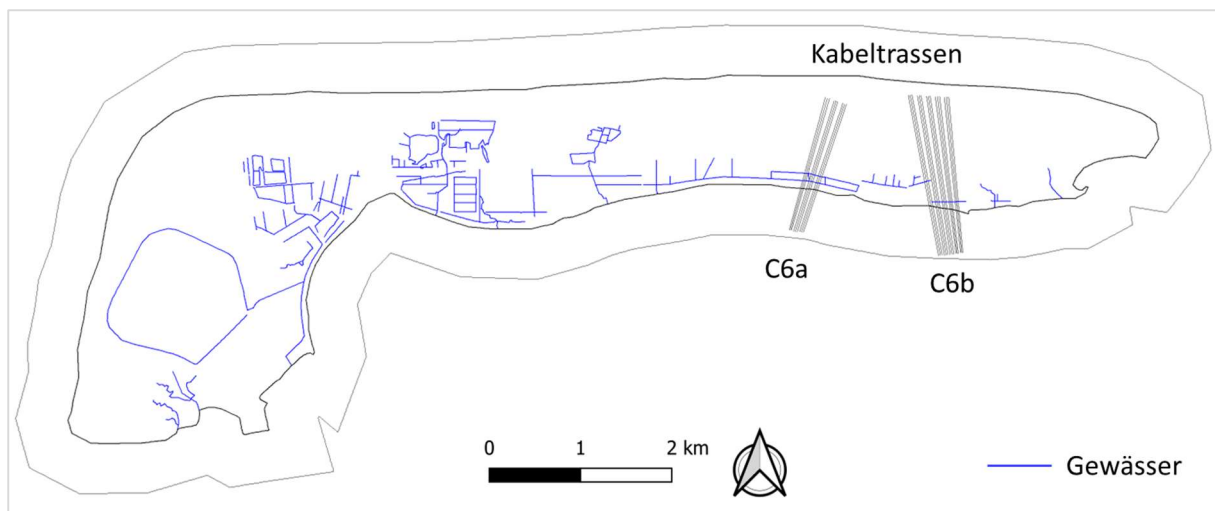


Abbildung 33: Lage der im Modell zu berücksichtigenden Kabeltrassen mit 3 ONAS im Trassenkorridor C6a und 5 ONAS im Trassenkorridor C6b

In der Modellierung wird der höchste Eintrittspunkt mit 5,28 mNHN als Referenz gewählt, sodass die Kabel aller Systeme auf eine Tiefe von -32,72 mNHN, bzw. -37,72 mNHN, abtauchen. Der Eintritts- und Austrittswinkel ist mit 15° vorgegeben. Von der Schräge zur Horizontalen wird ein glatter Übergang geschaffen, indem auf den letzten 10 Tiefenmetern der Winkel fortlaufend reduziert wird. Dieser Übergangsbereich erstreckt sich über eine horizontale Länge von 76 m. Pro horizontalem Meter wird der Winkel um $0,196^\circ$ reduziert (Abbildung 34).

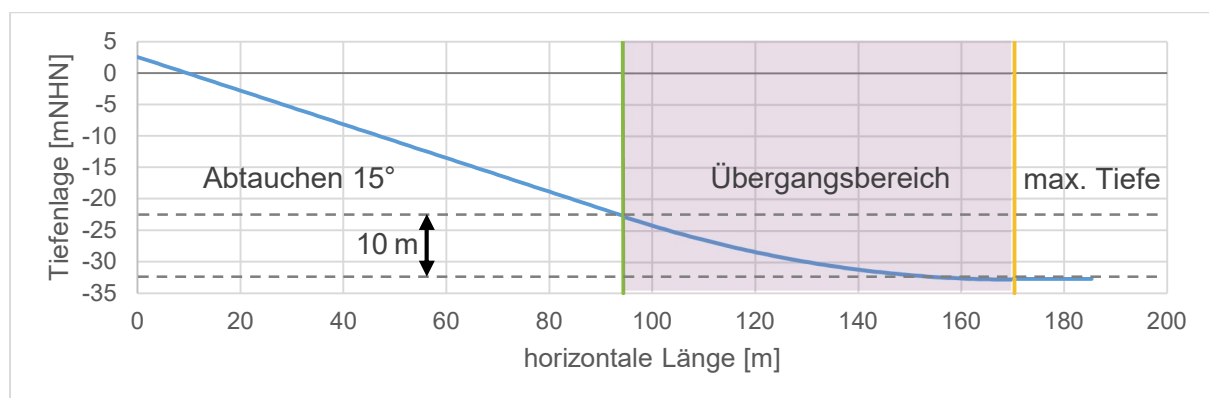


Abbildung 34: Beispielhafter Verlauf eines Erdkabels von der Oberfläche bis zur maximalen Tiefe mit Übergangsbereich

Alle Erdkabel werden entsprechend ihres Verlaufs in den beiden Korridoren in das Netz integriert. Aufgrund der genutzten Netzdiskretisierung werden die Kabel lediglich als Linie abgebildet. Für die Berechnung der Wärmeentwicklung stellt dies keine Einschränkung dar.

4.10.1 Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit eines wassergesättigten Bodens ergibt sich jeweils in Abhängigkeit von der effektiven Porosität der Bodenschicht aus den gewählten Parametern für die Gesteinsmatrix und das Grundwasser. Da die quartären Schichten auf Langeoog überwiegend aus Sanden bestehen, wurde vereinfacht ein Parametersatz für die Gesteinsmatrix bzw. den Boden verwendet. Tabelle 12 listet die verwendeten Parameter für die Gesteinsmatrix und das

Grundwasser auf, die für die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazitäten und der Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Bodenschichten verwendet wurden.

Tabelle 12: Parameter für die Berechnung des Wärmetransports

Modellparameter	Wert	Einheit
spezifische Wärmekapazität der Gesteinsmatrix c_s	840	[J/(kg °C)]
Wärmeleitfähigkeit der Gesteinsmatrix λ_s	3,5	[J/(s m °C)]
Korndichte der Gesteinsmatrix ρ_s	2650	[kg/m ³]
spezifische Wärmekapazität des Grundwassers c_w	4182	[J/(kg °C)]
Wärmeleitfähigkeit des Grundwassers λ_w	0,6	[J/(s m °C)]
Dichte des Grundwassers bei 20°C ρ_w	1000	[kg/m ³]

4.10.2 Wetterdaten: Lufttemperatur und Globalstrahlung

Die für die Berechnung des Wärmetransports notwendige Beschreibung der äußeren Randbedingungen an der Geländeoberfläche erfordert Messdaten zu Lufttemperatur und Globalstrahlung. Sie wurden den für die Ermittlung der Grundwasserneubildung beschafften Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen (siehe Kap. 4.6.2).

4.10.3 Auslastung der Kabel und die daraus resultierende Verlustleistung

Um den maximalen betriebsbedingten Einfluss der acht ONAS auf die Süßwasserlinse zu betrachten, wird für die Modellierung der Wärmeausbreitung ein Worst-Case-Ansatz gewählt, in dem der gleichzeitige Betrieb der ONAS unter Vollast (100% Auslastung) simuliert wird. In dem Szenario wird der Regelbetrieb betrachtet, d.h. der Strom wird nur über die HVDC-Kabel (+/- Pole) geführt. Über den metallischen Rückleiter wird kein Strom induziert, sodass für diesen keine Verlustleistung anzunehmen ist.

Die von den Übertragungsnetzbetreibern Amprion und TenneT eingesetzten Kabelsysteme weisen hinsichtlich der Spezifikationen Unterschiede auf. Dies führt zu unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich der Verlustleistungen der Kabel. Um dies im Modell zu berücksichtigen, wird für die TenneT-Systeme für die beiden Polkabel eine Verlustleistung von je 32 W/m angesetzt, für die Amprion Systeme wird eine Verlustleistung von 39 W/m je Kabel angenommen. Die Annahmen entsprechen jeweils der erwarteten Verlustleistung eines HVDC-Kabels mit einem Kabelquerschnitt von 2500 mm² bei einer Stromlast von 2100 A (Leitertemperatur 70 °C).

Im Modell wird die Verlustleistung pro Modellknoten angegeben. Dies erfordert eine Umrechnung der bekannten Verlustleistung mit der entsprechenden Kabellänge, die dem jeweiligen Knoten zugeordnet wird. Dabei geht nicht nur die horizontale Länge mit ein, sondern im Bereich der Schräge wird die tatsächliche Kabellänge in der Randbedingung berücksichtigt.

5 Erstellung eines hydrogeologischen Modells (HGM)

Als Vorbereitung für das numerische Strömungsmodell wird ein Hydrogeologisches Standortmodell entwickelt. Dieses Modell dient zur Entwicklung der hydrogeologischen Systemvorstellung für das Untersuchungsgebiet und stützt sich auf die Lage der geologischen Schichten. Es beinhaltet außerdem die Beschreibung der für die Aufgabenstellung relevanten, regionalisierten, standortspezifischen hydrogeologischen Randbedingungen und Kenngrößen. Somit umfasst der Aufbau des hydrogeologischen Modells im Wesentlichen folgende Arbeitsschritte:

- Abgrenzung des Modell- bzw. Bilanzraums
- Beschreibung der Zu- und Abflusskomponenten des Modell- bzw. Bilanzraums (flächendifferenzierte Grundwasserneubildung, Gewässer, Brunnen, ...)
- Beschreibung der Interaktion zwischen Gewässern und Grundwasser
- Grundwassersituation (gemessene Grundwasserpotenziale, Grundwassergleichenplan für mittlere Grundwasserstände)
- Zuordnung von Spannbreiten der hydrogeologischen Parameter für die hydrostratigraphischen Einheiten (k_f -Werte, Porositäten, ...)

5.1 Abgrenzung des Modell- bzw. Bilanzraums

Entsprechend des Leitfadens für hydrogeologische und bodenkundliche Fachgutachten bei Wasserrechtsverfahren in Niedersachsen [25] ist durch die Wahl der Größe des Modellraumes eine Beeinflussung der gewählten Modellränder auszuschließen oder zu minimieren. Zur Festlegung des Modellrandes wurden zunächst vereinfachte Konzeptmodelle erstellt, um den Einfluss des Abstands des Modellrandes zur Küstenlinie zu untersuchen. Bei dem in [2] erstellten Modell wurde ein Mindestabstand von 1 km gewählt. Dies diente als erste Orientierung. Ziel der Untersuchungen war es, den Randstreifen so zu optimieren also möglichst schmal zu wählen, dass das Modellergebnis nicht vom Modellrand beeinflusst wird, und gleichzeitig die Gesamtzahl der Modellknoten niedrig zu halten und damit Rechenzeiten zu verkürzen.

Es wurden drei Konzeptmodelle mit Randstreifenbreiten von 0, 180 und 570 m erstellt (Abbildung 35, Abbildung 36).

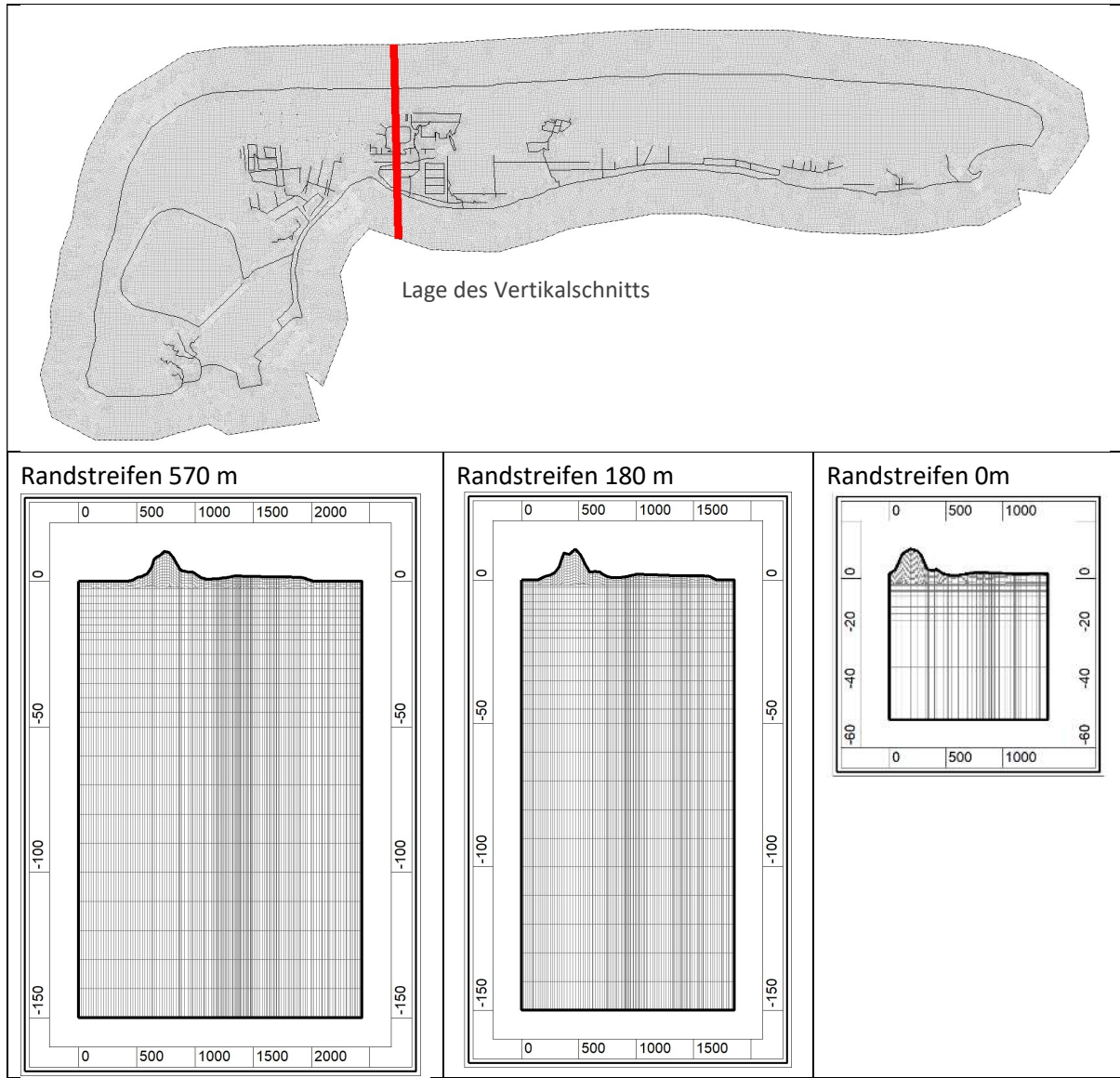


Abbildung 35: Konzeptmodell Modellrand, Vertikalschnitte der 3 Varianten

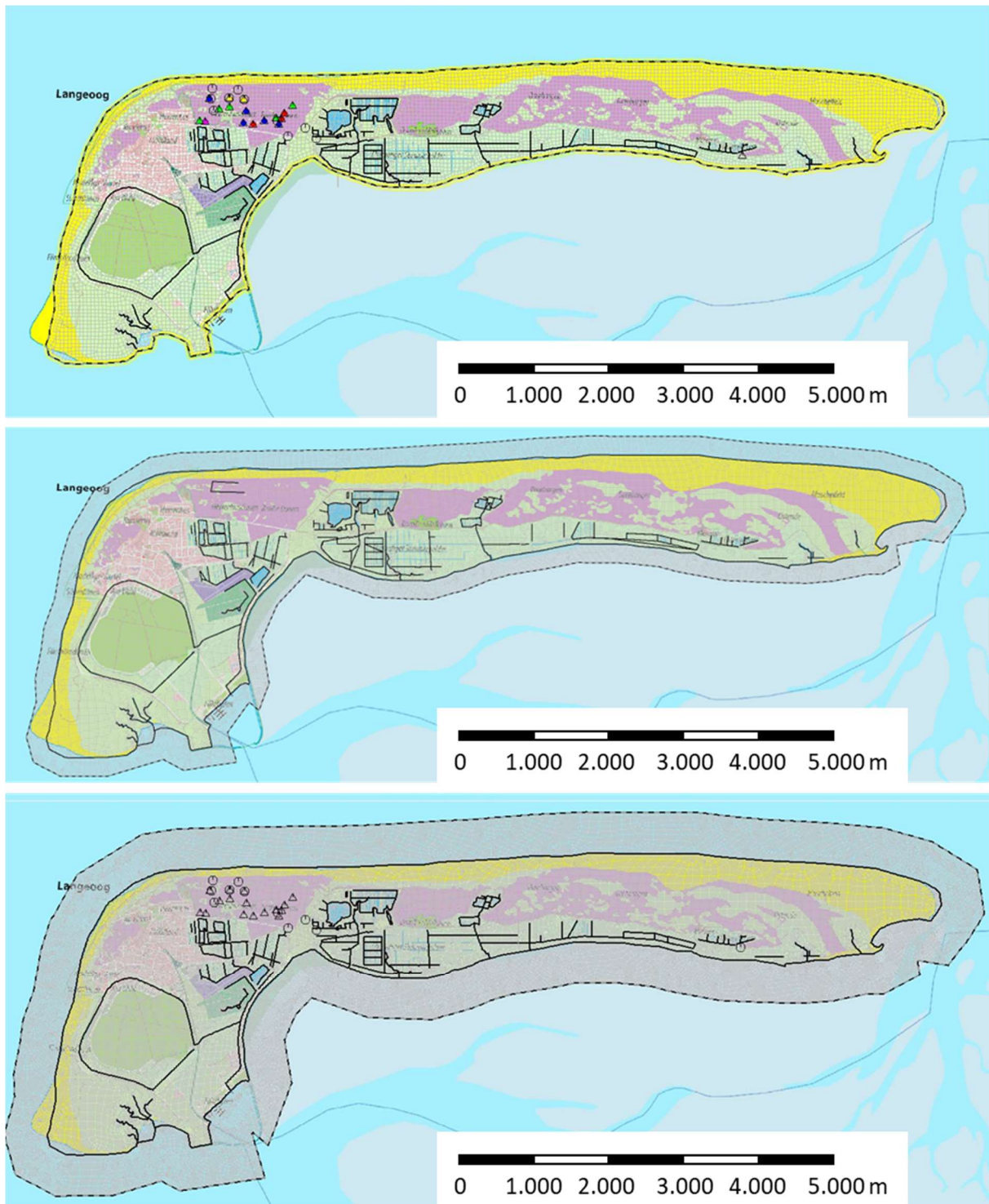


Abbildung 36: Konzeptmodell Modellrand in 3 Varianten: Randstreifenbreite von 0 m (oben), 180 m (mitte) und 570 m (unten)

Die Modellierung wurde mit einer Streifenbreite von 570 m fortgesetzt, da ab diesem Wert kein signifikanter Einfluss des Modellrandes auf die dichteabhängige Strömungsberechnung festgestellt wurde.

5.2 Zu- und Abflusskomponenten

Als Zuflusskomponente wird in dem Modell die Grundwasserneubildung an der Modelloberfläche vorgegeben (siehe Kap. 4.6.3). Vorgegebene Abflusskomponenten sind die Entnahmen im Brunnenfeld West (siehe Kap. 4.5), bei den Prognoserechnungen zusätzlich die geplanten Entnahmen im Brunnenfeld Ost.

5.3 Interaktion zwischen Gewässern und Grundwasser

Die Interaktion zwischen Gewässern und Grundwasser erfolgt mit der hierfür üblicherweise anzuwendenden Leakage-Randbedingung (Randbedingung 3. Art). Dabei werden jedem, einen Gewässerabschnitt beschreibenden Modellnetzknoden der Wasserstand des Gewässers und der hydraulische Widerstand der Sohle (Leakage-Koeffizient) an dieser Stelle zugewiesen. Der Leakage-Koeffizient repräsentiert dabei den Quotienten aus Durchlässigkeit und Mächtigkeit der Gewässersohle (Kolmattonsschicht). Die benetzte Fläche, über die der Wasseraustausch zwischen Gewässer und Grundwasser stattfindet, wird in Abhängigkeit der Modellnetzgeometrie automatisch eingerechnet.

Da im Modellgebiet zumindest zeitweise ein abschnittsweises Trockenfallen aufgrund saisonal bedingter geringer Grundwasserneubildung nicht ausgeschlossen werden kann, wird das Wasserdargebot entlang des Gewässersystems berücksichtigt. Dafür müssen die Gewässerabschnitte im Modellnetz miteinander vernetzt werden (Abbildung 37).

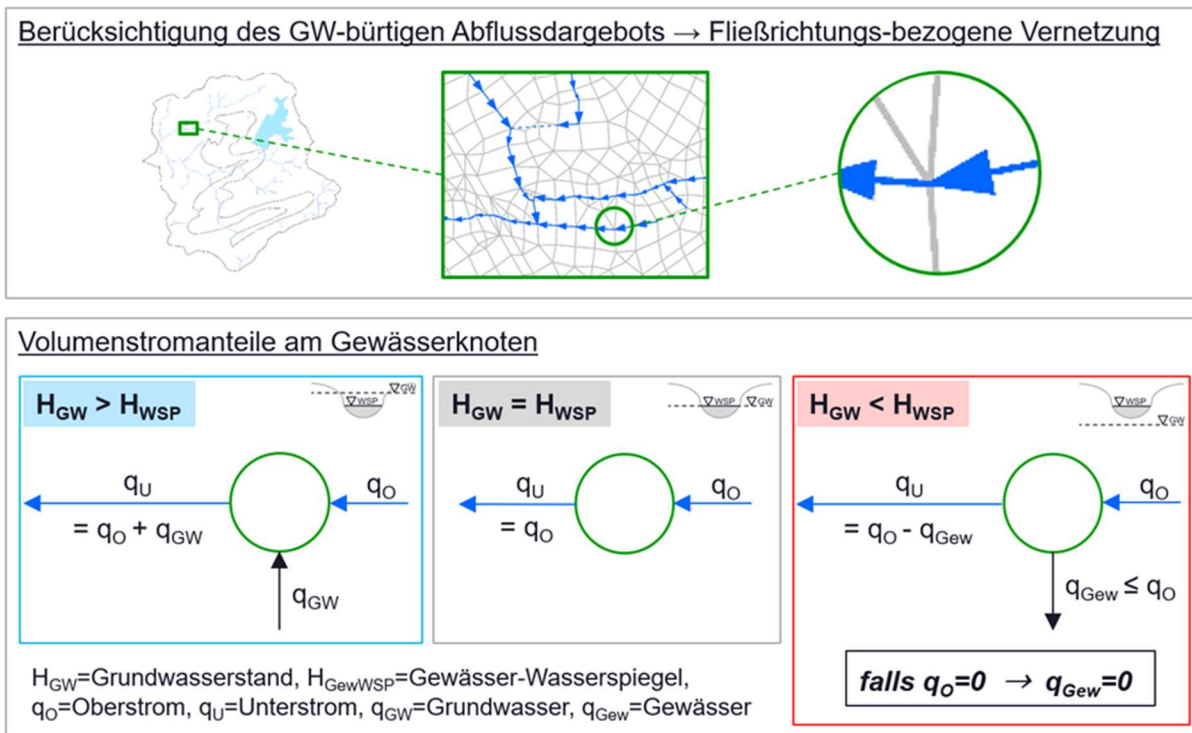


Abbildung 37: Interaktion Gewässer-Grundwasser bei Gewässervernetzung

Für den Fall, dass das Gewässer unterhalb des Grundwasserspiegels liegt ($H_{GW} > H_{WSP}$ in Abbildung 37) erfolgt ein Zufluss q_{GW} aus dem Grundwasser ins Gewässer. Sind die Wasserspiegel von Gewässer und Grundwasser gleich ($H_{GW} = H_{WSP}$ in Abbildung 37) erfolgt weder Zu- noch Abstrom. Bei über dem Grundwasser liegenden Gewässern ($H_{GW} < H_{WSP}$ in Abbildung 37) wird die Zusickerung ins Grundwasser q_{Gew} in Abhängigkeit des Dargebots q_O (stationär und instationär) quantifiziert und gegebenenfalls

limitiert. Über eine Prüfung der Richtigkeit der Fließrichtungen innerhalb des Gewässersystems erfolgt eine zusätzliche Kontrolle des Modells.

6 Numerisches Modell

6.1 3D-Modell

6.1.1 Ortsdiskretisierung -Elementnetz

Zur Erstellung eines numerischen Grundwassermodells ist der Modellraum zu diskretisieren. Das Modellsystem SPRING [1] basiert auf der Methode der Finiten Elemente (FE) und erlaubt eine Diskretisierung des Modellgebiets in Form von Dreiecks- und Viereckselementen. Die Eckpunkte der Elemente werden als Modellknoten bezeichnet.

6.1.1.1 Horizontale Diskretisierung

Um eine optimale Strömungsberechnung durchführen zu können, wurden bereits bei der Netzerstellung alle bekannten hydrogeologischen Gegebenheiten als netzbildende Zwangsgeometrien (Konturen) berücksichtigt:

- Linien- bzw. flächenförmige Zwangsgeometrien:
 - Vorfluter
 - Küstenstreifen
- Punktförmige Zwangsgeometrien
 - Entnahmebrunnen
 - Grundwassermessstellen

Durch das geschilderte Vorgehen wurde ein Modellnetz mit 171.000 Knoten und 178.000 Elementen generiert.

Die Diskretisierung des vorliegenden Modellnetzes erfolgte unter Berücksichtigung der Gewässer (Gewässerlinien liegen auf Elementkanten), des Modellrandes, der Grundwasserentnahmen und der offenen Wasserfläche. Zudem wurde bei der Diskretisierung in der Fläche eine mittlere Elementkantenlänge von maximal 30 m angestrebt.

In den Aussagegebieten der neuen Brunnen im Osten und in dem Bereich der Kabel wurden die Elemente bereichsweise verdichtet (Abbildung 38, Abbildung 39).

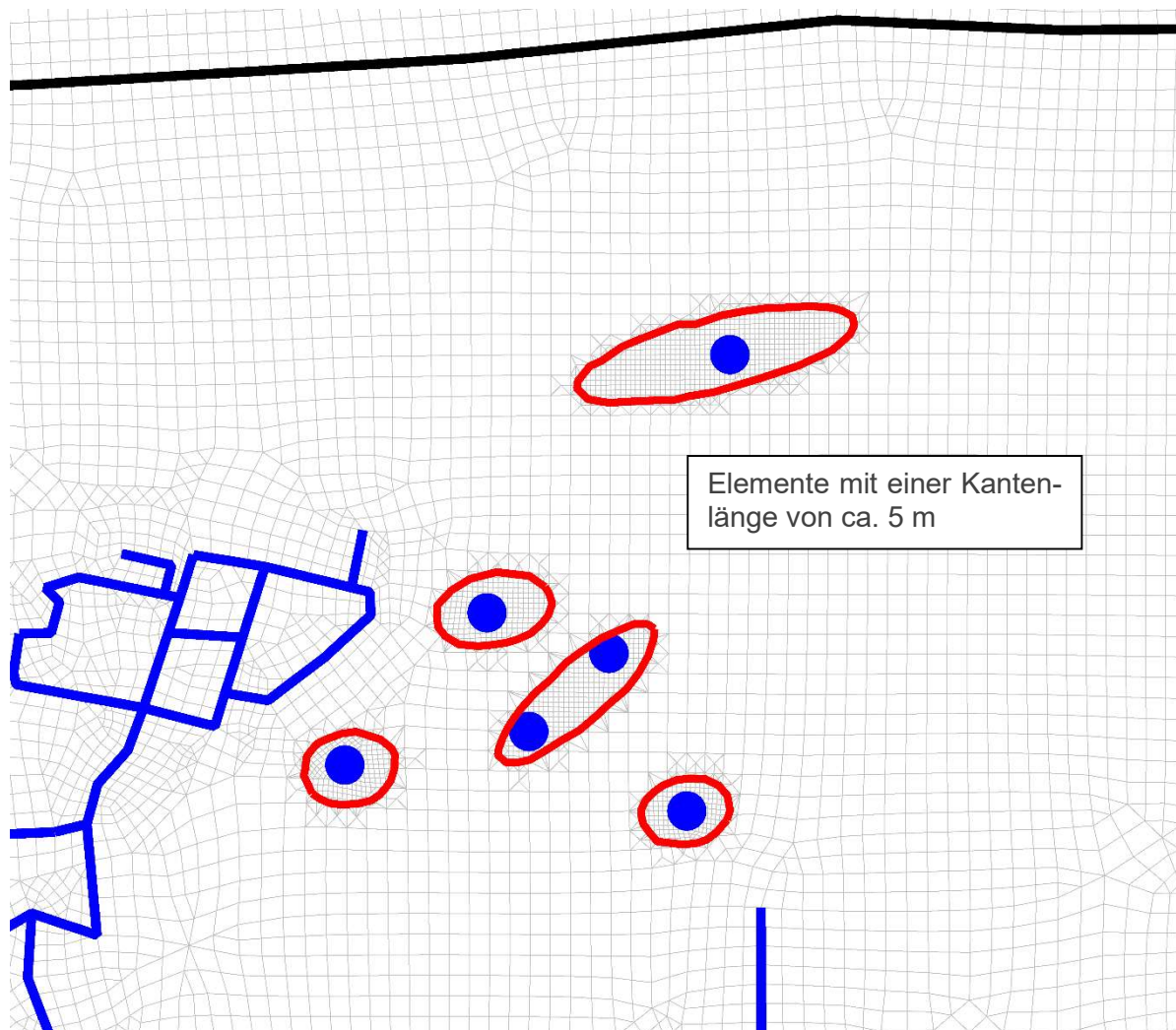


Abbildung 38: Lokale Verfeinerung des horizontalen Modellnetzes in der Umgebung von potentiellen Brunnenstandorten im Osten der Insel Langeoog

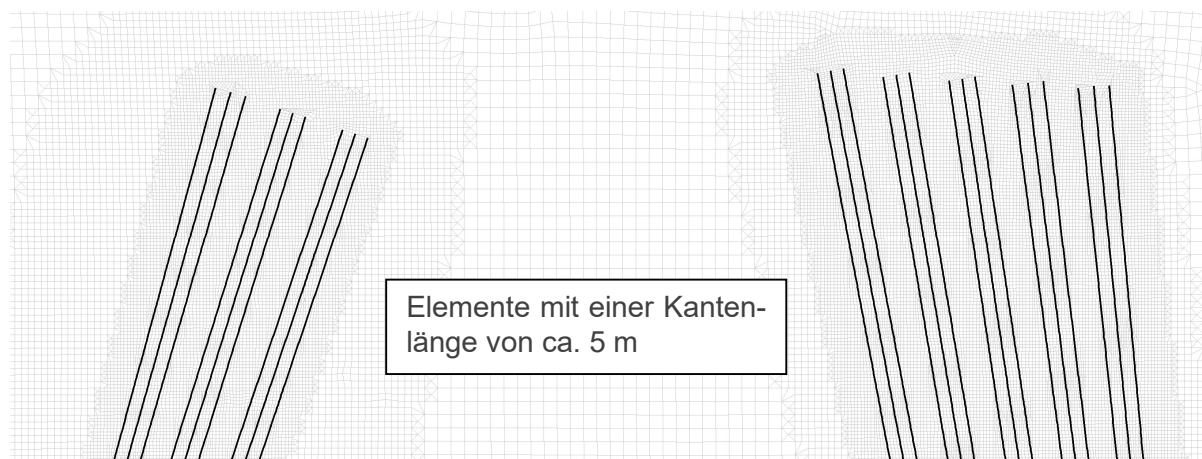


Abbildung 39: Lokale Verfeinerung des horizontalen Modellnetzes in der Umgebung der geplanten Kabeltrassen

Abbildung 40 gibt einen Überblick, wie die Elementlängen im Modell verteilt sind. Elemente der Längen 2-5 m, 20-30 m und 10-20 m treten zu fast gleichen Anteilen von ca. 27-28% auf. Elementlängen 5-10 m sind nur zu 15% vertreten und sehr kleine Elementlängen < 2m treten nur vereinzelt auf.

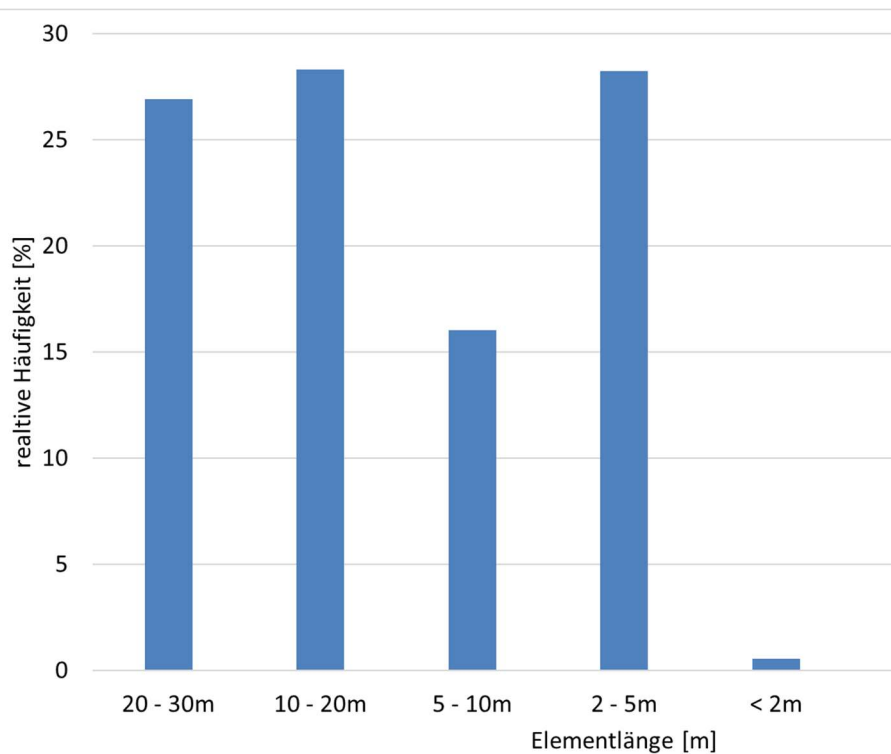


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Elementlängen im horizontalen Modellnetz.

6.1.1.2 Qualität des Elementnetzes

Die Qualität eines FE-Netzes und insbesondere der einzelnen Elemente hat entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse und die Güte der numerischen Berechnungen. Daher sollten die Elemente mit geringer Qualität nach der automatischen Netzgenerierung und vor dem Start der Berechnungen zunächst korrigiert werden.

Es gibt verschiedene Kriterien, die geometrische Qualität der Elemente zu analysieren. In SPRING werden zur Beurteilung der Netzqualität zwei Güteparameter – der Formfaktor und das Jacobi-Verhältnis – berechnet und miteinander kombiniert. Das Ergebnis gibt die Abweichung eines beliebigen Elements zu einem idealen an, d.h. einem gleichseitigen Dreieck oder einem Quadrat, und wird auf einen Wert zwischen 0 für geringe und 1 für vollständige Übereinstimmung skaliert. Durch die Berechnung für jedes Element können problematische Winkelverhältnisse bemerkt und verbessert werden.

Der Formfaktor wird aus dem Verhältnis Innenkreis zu Außenkreis für alle Dreieckselemente berechnet. Für viereckige Elemente wird analog das Verhältnis der kürzesten Seitenhalbierenden zur längsten Strecke zwischen einem Eckpunkt und dem Mittelpunkt angesetzt. Der Formfaktor hilft bei der Detektion von schmalen Elementen. Zusätzlich wird das Jacobi-Verhältnis (engl. *Jacobian* oder *Jacobian Ratio*) betrachtet. An den Gaußpunkten werden dazu die Jacobi-Matrizen (auch Ableitungsmatrizen genannt) bestimmt und anschließend deren Determinanten berechnet. Für jedes Element wird das Verhältnis der minimalen zur maximalen Determinante – das sogenannte Jacobi-Verhältnis – gebildet. Bei Vierecken beschreibt es den Grad der Verzerrung präziser als der Formfaktor. Für Dreiecke ist es hingegen immer 1, sodass sich eine Kombination beider Güteparameter anbietet.

Die Netzqualität wird über das Minimum des Formfaktors und des Jacobi-Verhältnisses ermittelt. Der Wert 1 ist ein ideales Element. 0,5 wird als Schwellenwert zwischen guten und schlechten Elementen angesehen, während Werte $< 0,02$ auf mögliche Probleme bei der Konvergenz des Gleichungslösers hinweisen.

Abbildung 41 zeigt die Häufigkeitsverteilung für das erstellte Elementnetz. Sie bestätigt ein für eine Strömungs- und Wärmetransportberechnung sehr gut geeignetes Netz. Der Mittelwert der Netzqualität liegt bei 0,85 und Werte $< 0,07$ treten nicht auf.

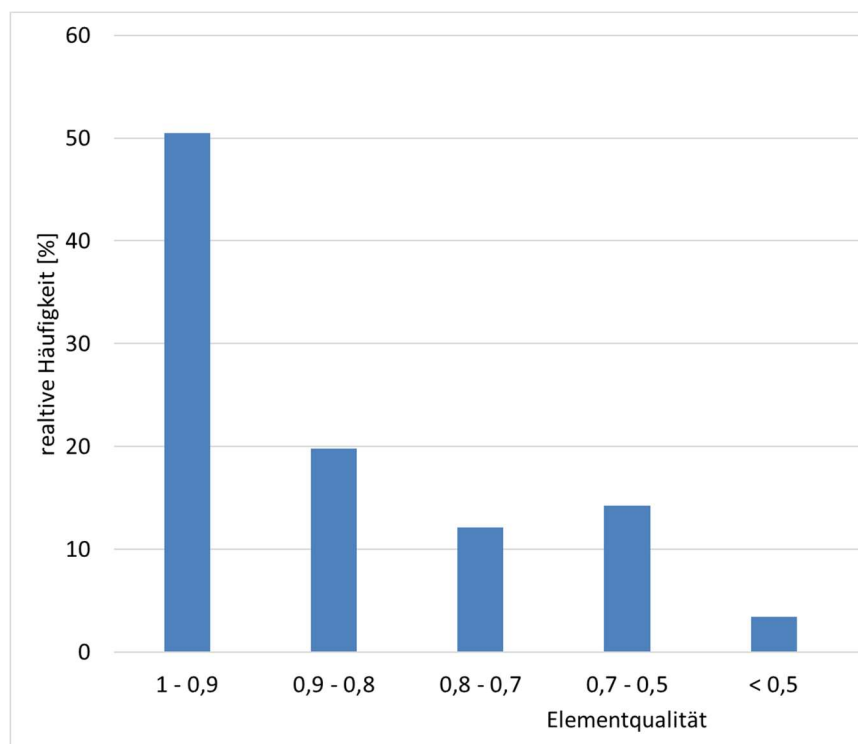


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Elementqualität.

6.1.1.3 Ausstreichende Schichten

Bedingt durch den wechselnden geologischen Aufbau ist es notwendig, dass die Elementschichten des Finiten Elementnetzes den geologischen Schichten folgen und somit ggf. austreichen.

Aufgrund des eingesetzten Softwarepakets SPRING kann die numerische Abbildung der hydrostratigraphischen Schichten auf ihre jeweilige Verbreitung beschränkt werden, da SPRING das „echte“ Ausstreichen und somit das bereichsweise Wegfallen von Modell-Schichten erlaubt. Dieses Leistungsmerkmal führt zu einer deutlichen Steigerung der numerischen Stabilität bei der iterativen Berechnung von Strömungs- und Transportprozessen. Zum anderen wird hierdurch die Anzahl der Modellnetzknotten und –elemente erheblich reduziert, was insbesondere die Rechenzeiten reduziert, aber auch zur weiteren Erhöhung der numerischen Stabilität des Systems führt.

6.1.1.4 Dreidimensionales Elementnetz

Für das dreidimensionale FE-Netz wird das horizontale Netz senkrecht nach unten projiziert. Die jeweiligen Z-Koordinaten ergeben sich aus den Ober- und Unterkanten der geologischen Schichten (Kap. 4.3). Aus der Geologie ergeben sich 14 Element- und 15 Knotenschichten für das dreidimensionale Netz.

Die vorliegende Problemstellung erfordert eine Verfeinerung der Modellnetzgeometrie zur hinreichend genauen Abbildung der Strömungsgradienten [25] und zur Gewährleistung der numerischen Stabilität. Hierzu wird im Hinblick auf die Beherrschbarkeit der Rechenzeiten angestrebt, die Diskretisierung zunächst so grob wie möglich zu halten und nur in numerisch hoch beanspruchten Bereichen eine entsprechend hohe Netz-Verfeinerung vorzunehmen. Die Netzgeometrie in den Übergangsbereichen wird harmonisiert. Die Diskretisierung wird so gewählt, dass ihr Einfluss auf die Ergebnisse im Rahmen der zu erzielenden Modellgenauigkeit möglichst minimiert wird.

Für die Berechnung wurden die vertikalen Elementschichten so geteilt, dass die maximale Schichtmächtigkeit von oben nach unten von 2,5 m auf 5 m und schließlich auf 10 m ansteigt (Abbildung 42). Nach dieser vertikalen Verfeinerung hat das Netz 108 Element- und 109 Knotenschichten.

Das auf diese Weise erstellte FE-Netz umfasst brutto 14,3 Mio. Knoten und 15,2 Mio. Elemente und netto -nach Wegfall der Knoten und Elemente durch ausstreichende Schichten- jeweils 4,0 Mio. Knoten und Elemente und ist in Abbildung 43 dargestellt. Die Modellparameter, die einer Modellrechnung zugrunde liegen, werden diesem FE-Netz zugewiesen. Dabei werden beispielsweise Durchlässigkeitsbeiwerte oder Neubildungsraten als Elementdaten gehalten, während vorgegebene Wasserstände (vor allem als Randbedingung) oder Wasserspiegel an Oberflächengewässern Beispiele für Knotendaten sind.

Das mit den Eingangsparametern (Kap. 4) und Randbedingungen (Kap. 4.7) belegte Modellnetz bildet die Grundlage für die numerische Modellierung der Grundwassersituation. Dabei wird für jeden Modellknoten ein Grundwasserstand berechnet.

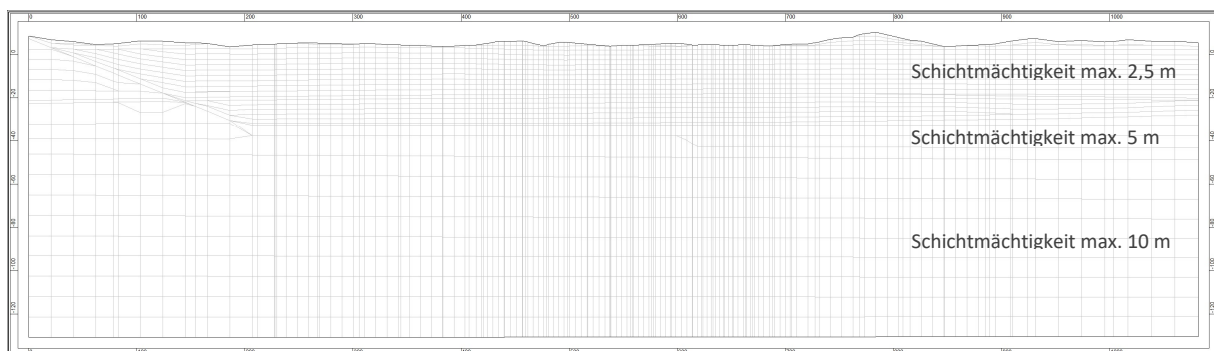


Abbildung 42: Vertikale Diskretisierung im Modellgebiet

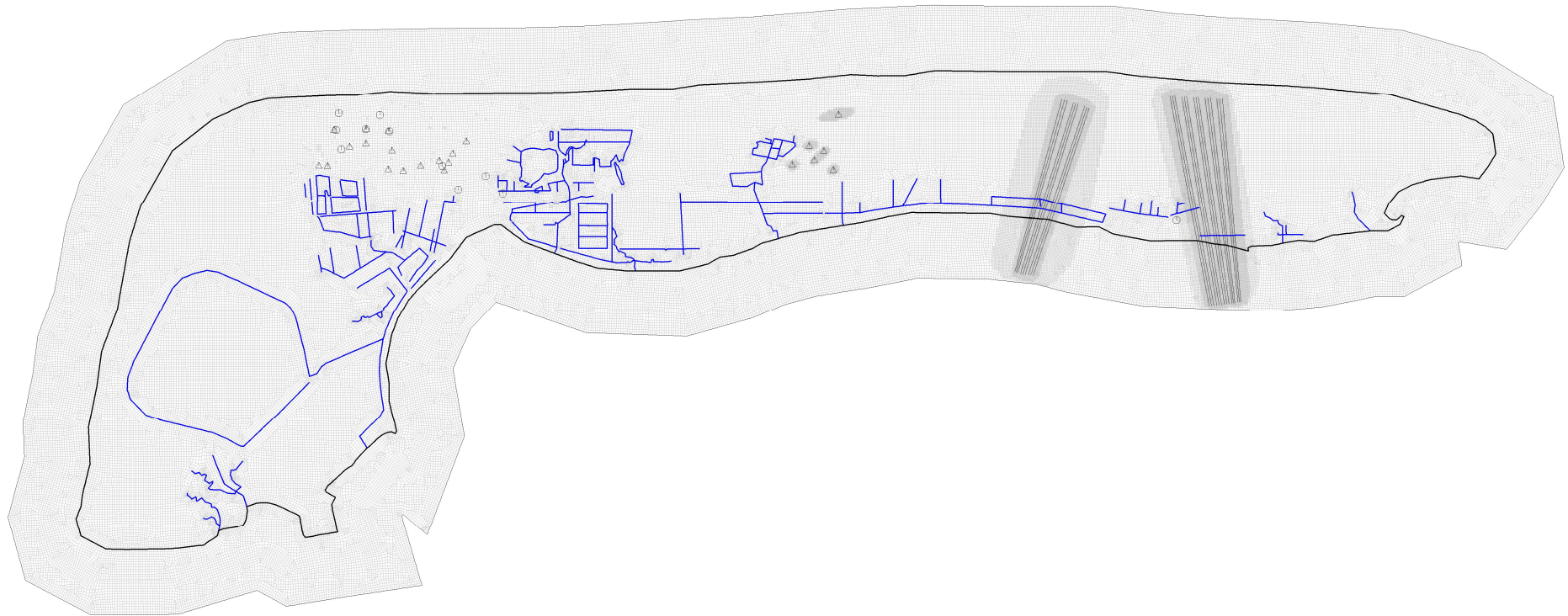


Abbildung 43: Finite-Elemente-Netz des Modells Insel Langeoog mit Gewässernetz (blaue Linien), bestehenden und potentiellen Brunnenstandorten sowie geplanten Kabeltrassen im Osten der Insel

6.1.2 Zeitdiskretisierung und Courant-Zahl

Die modelltechnische Abbildung der heutigen Grundwasserströmungssituation, die die Grundlage für die Prognoserechnungen darstellt, ist nur über instationäre Modellrechnungen möglich.

Der zeitlichen Diskretisierung kommt bei der Kalibrierung des 3D-Süßwasser-Salzwasser-Modells und den daran anschließenden Prognoserechnungen besondere Bedeutung zu. Analog zur räumlichen Diskretisierung sind die Kriterien bei der Festlegung der zeitlichen Diskretisierung die Beherrschbarkeit der Rechenzeiten sowie die numerische Stabilität.

Die zeitliche Diskretisierung wird so gewählt, dass ihr Einfluss auf die Ergebnisse im Rahmen der zu erzielenden Modellgenauigkeit möglichst minimiert wird.

Bei der numerischen Modellierung von instationären Strömungsprozessen kann mithilfe der Courant-Zahl der Einfluss der Zeitschrittweiten auf die numerische Stabilität des Systems überprüft werden. Hierzu ist theoretisch für jedes Element des Modellnetzes für jede Zeitschrittweite die Courant-Zahl zu berechnen und deren Einhaltung auf einen Grenzwert sicherzustellen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass insbesondere bei Modellen im regionalen Maßstab die Einhaltung des Grenzwerts häufig zu derart hohen zeitlichen Auflösungen führt, dass eine akzeptable Rechenzeit nicht mehr erzielt werden kann. Daher werden die Courant-Zahlen im Rahmen der hier durchzuführenden Modellierung vordergründig als Hilfsmittel zur Lokalisierung kritischer Prozessphasen und Modellbereiche verwendet.

6.1.3 Péclet-Zahl

Bei der numerischen Modellierung von Transportprozessen, wie der Verteilung von Salzkonzentrationen, kann mithilfe der Péclet-Zahl der Einfluss der Diskretisierung auf die numerische Stabilität des Systems überprüft werden. Hierzu ist theoretisch für jedes Element des Modellnetzes die Péclet-Zahl zu berechnen und deren Einhaltung auf einen Grenzwert sicherzustellen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass insbesondere bei Modellen im regionalen Maßstab die Einhaltung des Grenzwerts häufig zu derart hohen Knoten- bzw. Elementzahlen führt, dass eine akzeptable Rechenzeit nicht mehr erzielt werden kann. Daher werden die Péclet-Zahlen im Rahmen der hier durchzuführenden Modellierung vorrangig als Hilfsmittel zur Lokalisierung kritischer Modellbereiche verwendet.

6.1.4 Numerische Dispersion

Das Modell Langeoog ist in seinem Umfang zum heutigen Stand der Technik sehr ambitioniert. Zum einen sind die abgebildeten physikalischen Prozesse in einem System mit heterogenen Durchlässigkeiten zwischen ca. 10^{-4} bis 10^{-9} m/s (Tabelle 13) sehr komplex. Zum anderen mussten die Dichteabhängigkeit und die ungesättigte Zone berücksichtigt werden und über einen Zeitraum von 4 Jahren instationär kalibriert werden. Auch mit ca. 4 Mio. Freiheitsgraden ist das Modell rechentechnisch sehr aufwändig und schwierig handhabbar. Die großen Durchlässigkeitsunterschiede in dem System führen unweigerlich zu großen numerischen Instabilitäten (Oszillationen), die durch ein Upwind-Verfahren in den Griff zu bekommen sind.

Stark vereinfachend können Upwind-Verfahren wie folgt beschrieben werden: Bei der Approximation der Konzentrationsverteilung werden unsymmetrische Wichtungsfunktionen verwendet, die den

Effekt haben, innerhalb der advektiven Anteile der Stofftransportgleichung die stromaufwärts liegenden Knoten stärker zu wichten. Es wird eine künstliche Dispersion in Fließrichtung erzeugt, in deren Folge die Oszillationen unterdrückt und unter bestimmten Bedingungen sogar genauere Ergebnisse erzeugt werden. Bei mehrdimensionalen Modellen mit sehr verzerrten Elementen kann es durch die Verwendung von Upwind-Verfahren jedoch zu einem Verschmieren der Konzentrationsfront kommen.

6.2 Vertikalmodelle

Mit Hilfe eines Vertikalmodells wird untersucht, ob das 3D-Modell plausible Ergebnisse liefert.

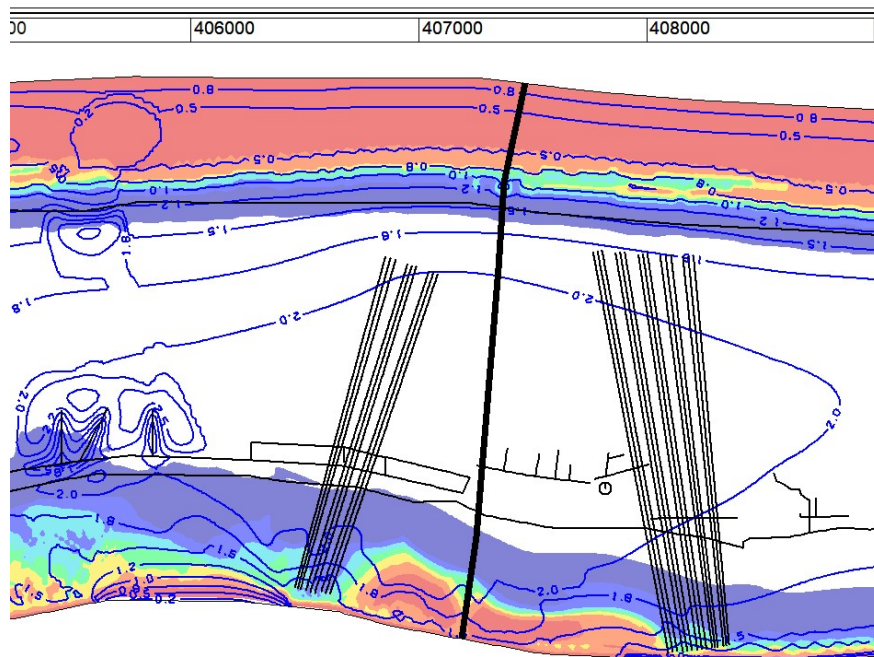


Abbildung 44: Schnitt zur Erstellung des Vertikalmodells.

Nach [22] ist eine Reduktion auf zwei Dimensionen bei Problemstellungen im Grundwasser möglich, sofern die Strömung in der dritten Dimension vernachlässigt werden kann. Bei 2D-vertikalen Modellen wird im Gebiet entlang einer Stromlinie ein vertikaler Schnitt geführt und innerhalb dieses zweidimensionalen Schnittes modelliert (Abbildung 45). Das Modellgebiet wird also wie ein ebenes Berechnungsgebiet ohne horizontale Ausdehnung behandelt. Dabei weist die eine Koordinate in Hauptströmungsrichtung und die andere Koordinate in z-Richtung.

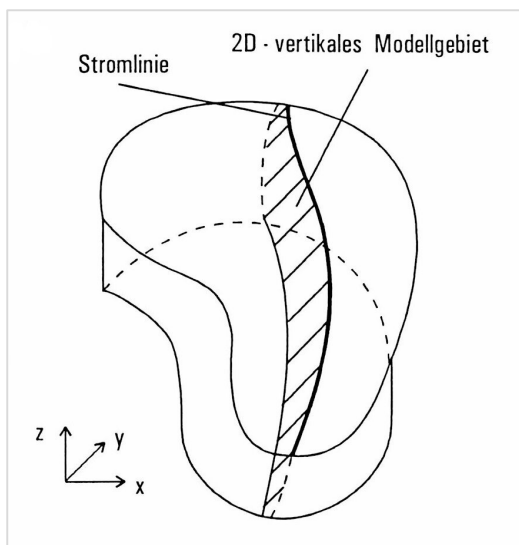


Abbildung 45: Generierung eines 2D-Vertikalmodells entlang einer Stromlinie aus [22]

Für die Erstellung des Vertikalmodells wurde ein Schnitt (Abbildung 44) entlang von Stromlinien in der östlichen Süßwasserlinse zwischen den geplanten Kabeltrassen gelegt. Zum Vergleich der Ergebnisse aus dem 3D-Modell und dem Vertikalmodell im Schnitt (Abbildung 46) werden die Potentiallinien und die Salzkonzentrationen $> 0,25 \text{ kg/m}^3$ dargestellt. Beide Modelle ermitteln die gleiche vertikale Ausdehnung der Süßwasserlinse und auch die Potentiallinien sind ähnlich.

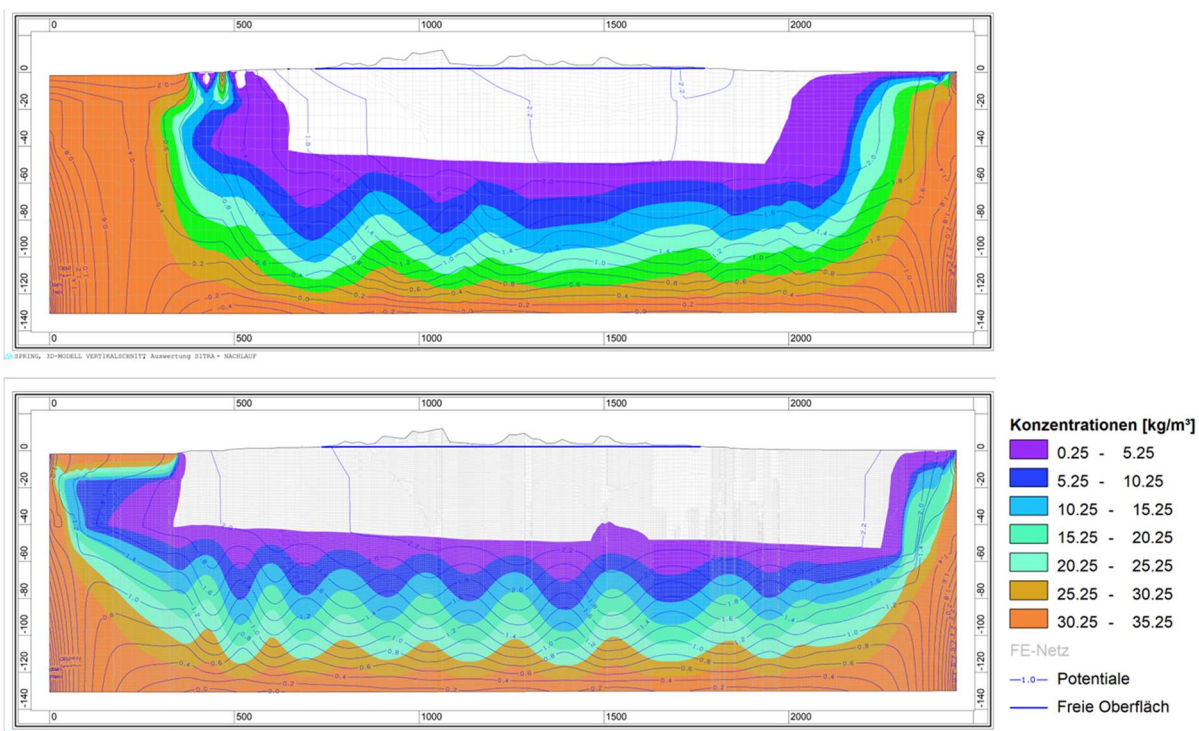


Abbildung 46: Vergleich der Ergebnisse aus dem 3D-Modell (oben) und dem 2D-Vertikalmodell in Schnitt 2 (unten)

7 Modellkalibrierung

Das Ziel der Modellkalibrierung ist die Abbildung eines beobachteten bzw. gemessenen, repräsentativen Zustands für den Untersuchungsraum, sodass ein prognosefähiges Modell als Grundlage für Szenario-Betrachtungen zur Verfügung steht. Aufgrund der Dichte-beeinflussten Strömungssituation liegt ein zentraler Schwerpunkt der Kalibrierung neben der Beschreibung der Grundwasserfließverhältnisse im Erreichen einer hinreichend stabilen Abbildung der heutigen, quasi-stationären 3D-Süßwasser-Salzwasser-Verteilung.

Anhand eines vorhandenen Grundwassergleichenplans oder anhand eines punktuell gemessenen Mittelwasserzustandes wird das Grundwassermodell zunächst stationär kalibriert, so dass ein prognosefähiges Modell entsteht. Die Anpassung erfolgt durch iterative Veränderung der K-Werte in den jeweils zulässigen Variationsbreiten. Dabei hängen die Genauigkeit und Zuverlässigkeit eines Modells von der Verfügbarkeit der Eingabeparameter ab. Da diese Parameter nur punktuell erfasst werden können (z.B. an Bohrungen und Grundwassermessstellen) und im Verlauf der Kalibrierung immer Abweichungen gegenüber den Eingangsparametern auftreten, wird eine sorgsame Plausibilitätsprüfung der Kalibrierung und ggf. eine Variation der Eingangsparameter durchgeführt. Das Ziel der Kalibrierung ist ein Erreichen eines Minimums der Differenz zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen.

Die stationäre Kalibrierung bildet die Grundlage der instationären Modellkalibrierung, welche anschließend anhand der zur Verfügung stehenden Messreihen an Grundwassermessstellen erfolgt. Da mit dem Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell instationäre Prognoserechnungen durchgeführt werden sollen, wurde eine instationäre Modellkalibrierung durchgeführt. Hier wird insbesondere die Porosität in plausiblen Spannbreiten kalibriert. Die Interaktion der Süßwasserlinse mit dem Salzwasser des Meeres wird anhand der berechneten Salzsättigung mit Hubschrauberelektromagnetik-Daten (HEM-Daten: HEM128Langeoog © BGR, Hannover, 2015, [32]) kalibriert.

Entsprechend der stationären Modellkalibrierung werden die gemessenen den berechneten Grundwasserständen gegenübergestellt und eine Modellbilanzierung durchgeführt.

Die Ergebnisse der Kalibrierung repräsentieren auch gleichzeitig den Ausgangszustand für die Prognoserechnungen.

7.1 Stationäre Kalibrierung

Für die stationäre Kalibrierung wurde aus den vorhandenen Messdaten (Mittelwasser) ein Grundwassergleichenplan konstruiert (Abbildung 47).

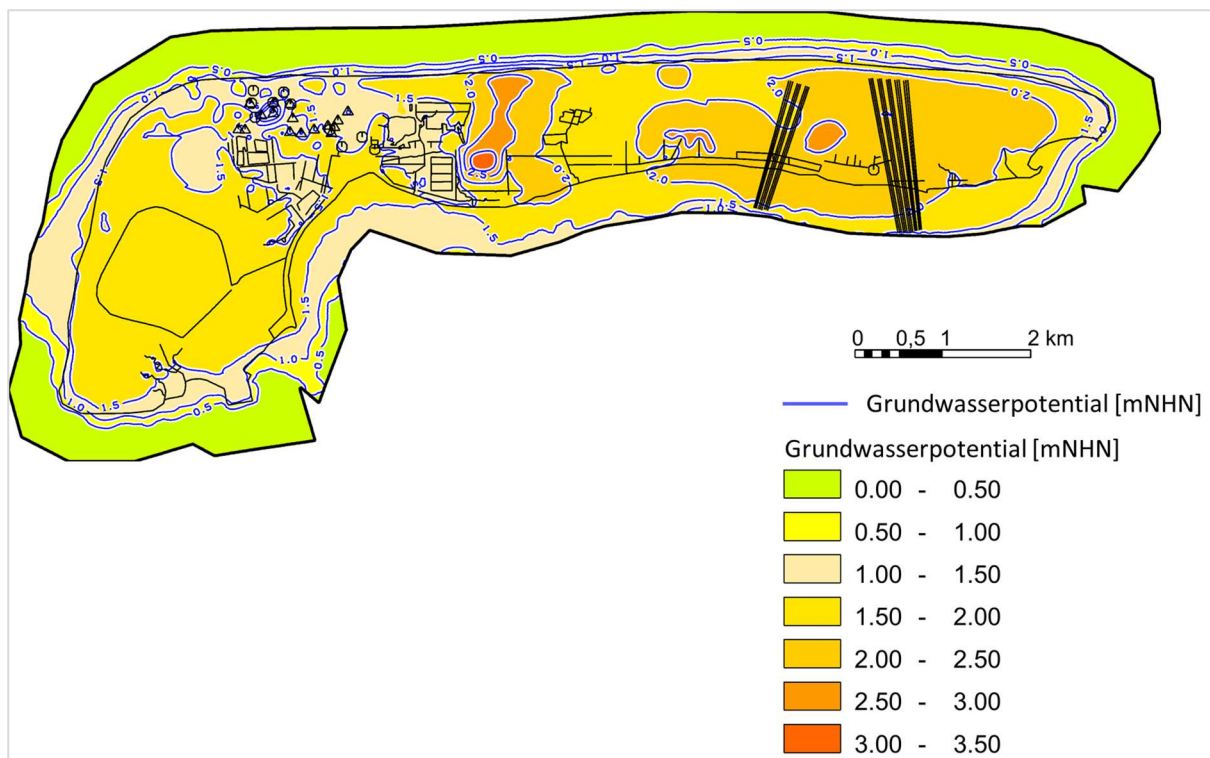


Abbildung 47: Konstruierter Grundwassergleichenplan, Markierungen für Gewässer, Kabeltrassen, Brunnen (Dreiecke) und Grundwassermessstellen (Kreise)

Abbildung 48 zeigt einen Ausschnitt mit Entnahmebrunnen (Dreiecksignatur) und Grundwassermessstellen (blaue Kreise) sowie den zugehörigen Grundwassergleichen. An den Grundwassermessstellen sind die bei der stationären Kalibrierung erzielten Differenzen zwischen den gemessenen Mittelwasserständen und den berechneten Werten dargestellt. Die Abweichungen sind überwiegend kleiner als 0,1 m, was einer sehr guten Übereinstimmung entspricht.

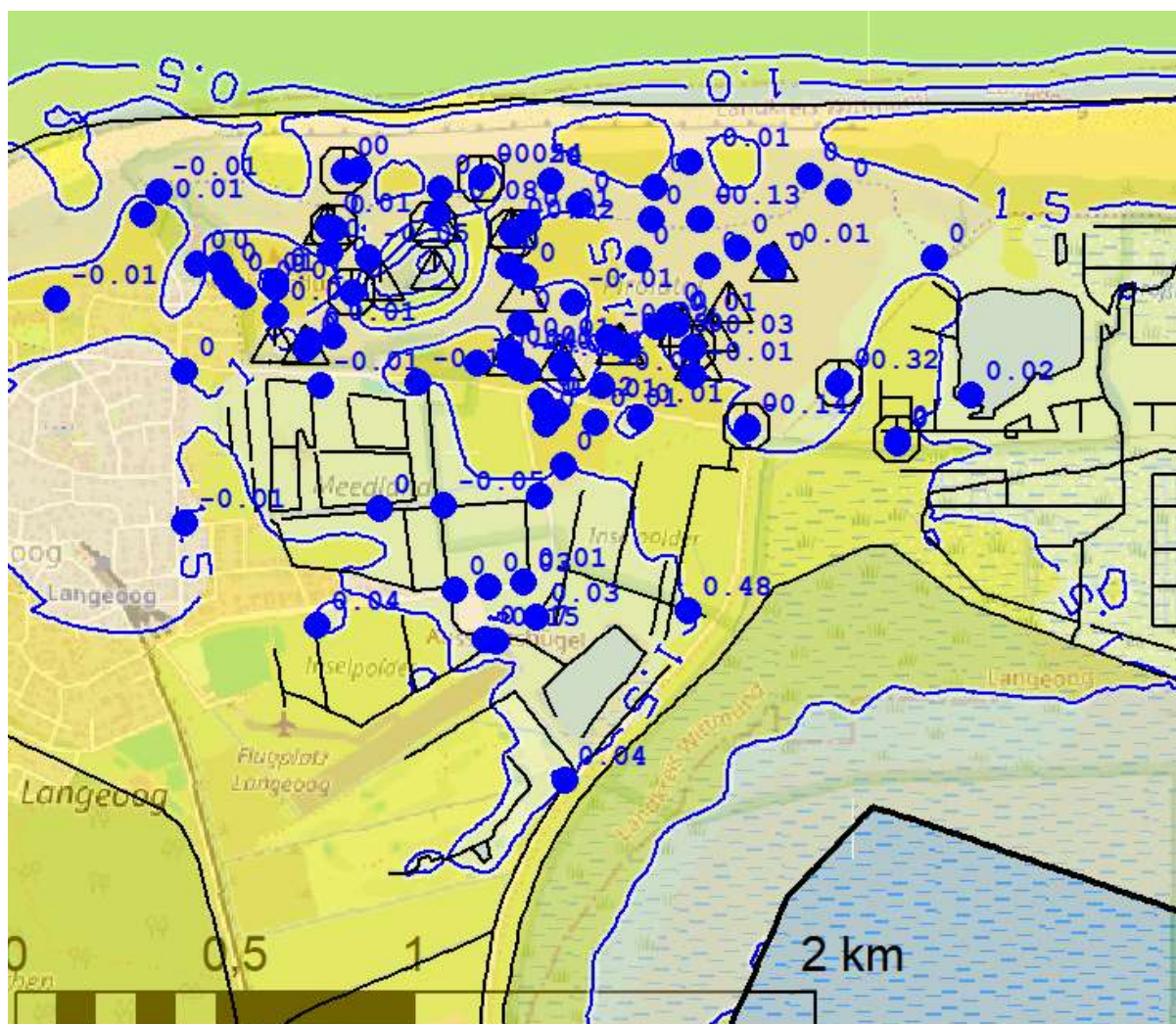


Abbildung 48: Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserständen (stationär) an den Grundwassermessstellen (blaue ausgefüllte Kreise) im Bereich Brunnenfeld West, im Hintergrund: Brunnenfeld West (Dreiecke)

Eine weitere Methode der Darstellung der Abweichungen zwischen gemessenen und gerechneten Werten sind Scatter- oder Crossplots. Abbildung 49 zeigt den Scatterplot für die Ergebnisse der stationären Kalibrierung. Im Idealfall der vollständigen Übereinstimmung liegen alle Punkte auf der Diagonale. Bei Punkten, die nicht auf der Diagonale liegen gibt der Abstand an, wie groß die Abweichungen sind. Für das kalibrierte Modell der Insel Langeoog liegen die meisten Punkte auf oder dicht an der Diagonalen. Drei Messpunkte haben einen größeren Abstand von der Diagonale. Hier betragen die Abweichungen 0,3 bis 0,5 m. Das stationäre Modell bildet den aus langjährigen Messreihen erzeugten stationären Mittelwasserzustand sehr gut ab und bildet eine gute Grundlage für die weiteren Modellrechnungen.

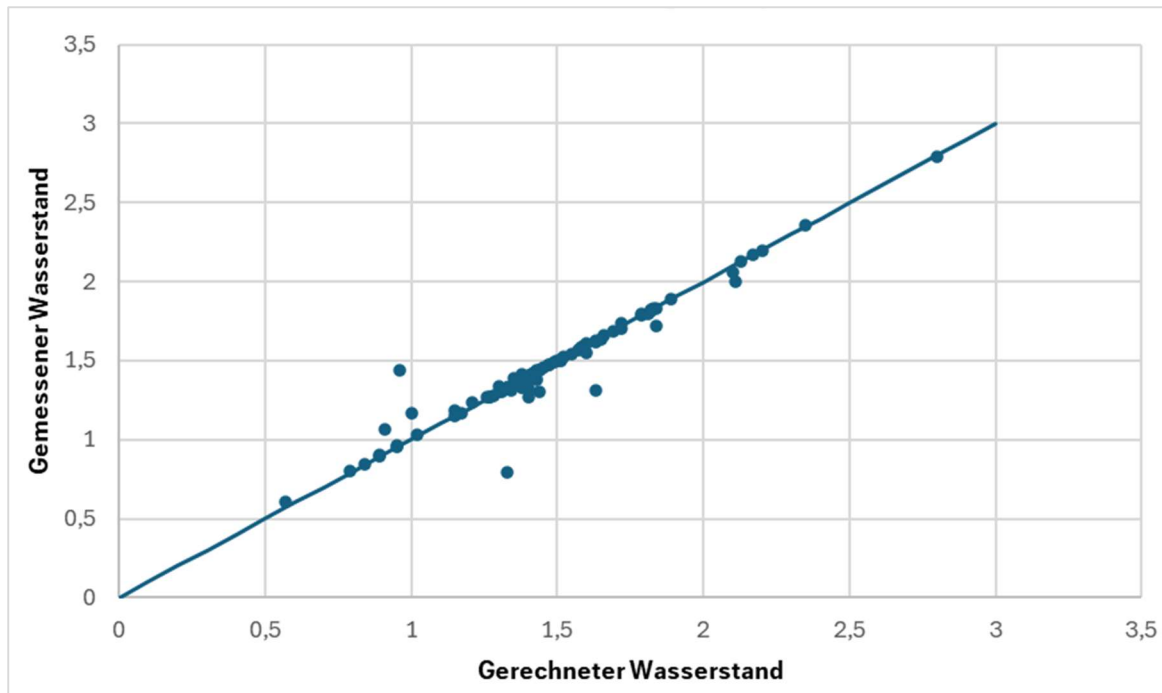


Abbildung 49: Scatterplot der gemessenen und berechneten Grundwasserstände (stationär) [mNHN]

7.2 Instationäre Kalibrierung

Die instationäre Kalibrierung wurde über einen Zeitraum von vier Jahren vom 01.01.2019 bis 31.12.2022 anhand gemessener Grundwasserganglinien in der westlichen Süßwasserlinse durchgeführt. Im Zuge der instationären Kalibrierung wurde der Parameter Porosität angepasst.

Abbildung 50 bis Abbildung 54 zeigen die berechneten Grundwasserganglinien (blau) im Vergleich mit den gemessenen Werten (rot) in Überblicksdarstellungen und ausgewählten Einzelganglinien. Gemessene und berechnete Werte stimmen an den meisten Messstellen gut überein. Die zeitliche Dynamik wird gut wiedergegeben, d. h. die zeitliche Position von Minima und Maxima stimmt überein. Die gemessenen Bereiche der Grundwasserstände werden ebenfalls gut wiedergegeben, d. h. die Werte der Minima und Maxima stimmen ebenfalls gut überein. Mit dieser guten Abbildung der gemessenen Grundwasserganglinien wird gleichzeitig gezeigt, dass die wichtige Eingangsgröße der Grundwasserneubildung richtig berechnet wurde, da sie -neben den Entnahmen- maßgebend für die jahreszeitliche Dynamik der Grundwassergänge ist.

3

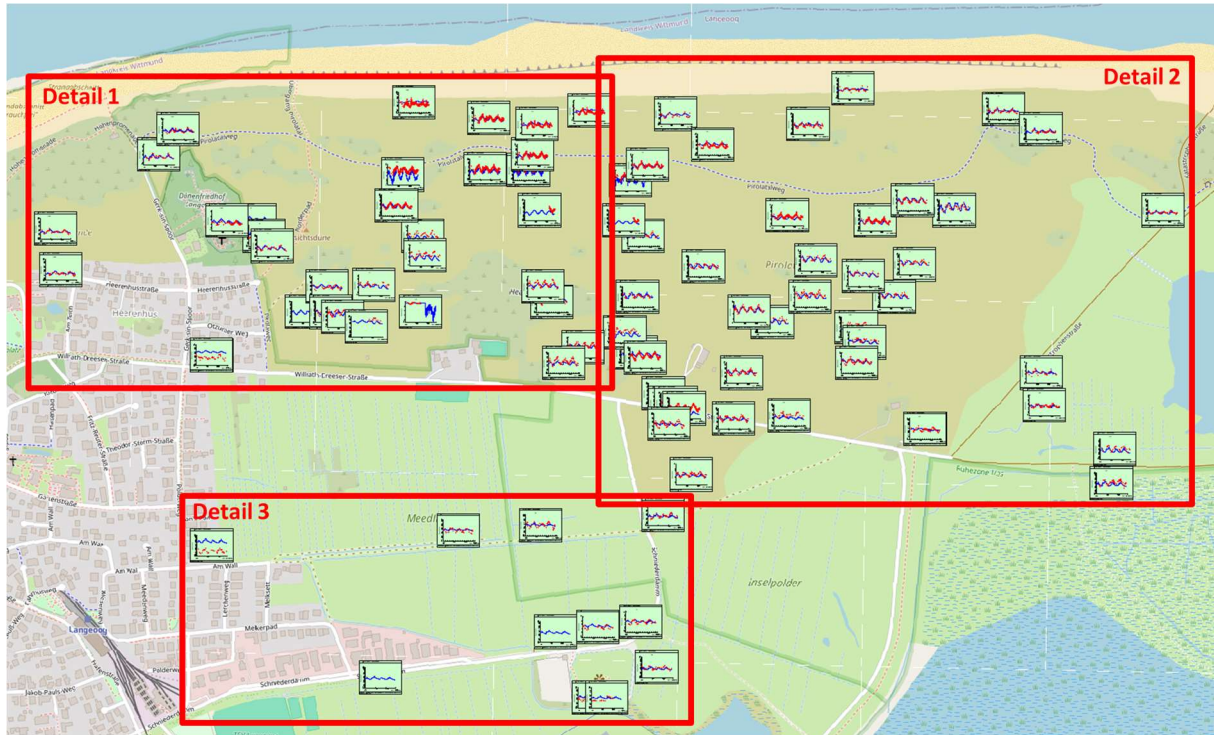


Abbildung 50: Instationäre Kalibrierung: Überblick der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien, Umrandung von Teilgebieten für Detaildarstellungen.

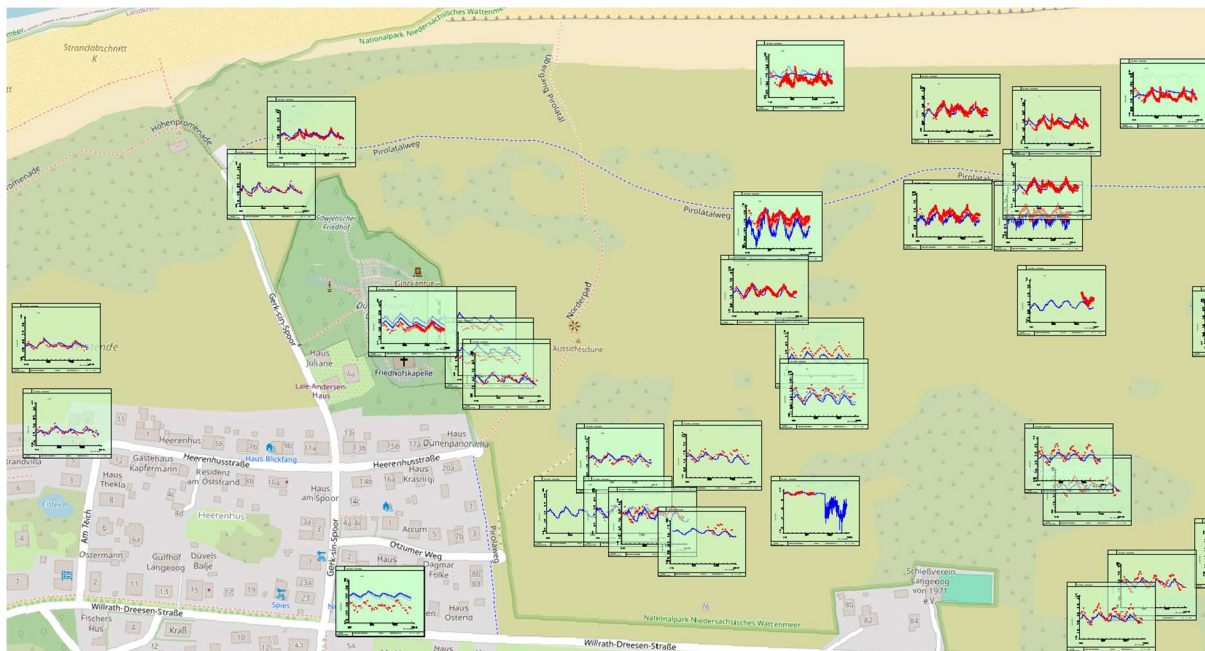


Abbildung 51: Instationäre Kalibrierung: Detail 1 der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien

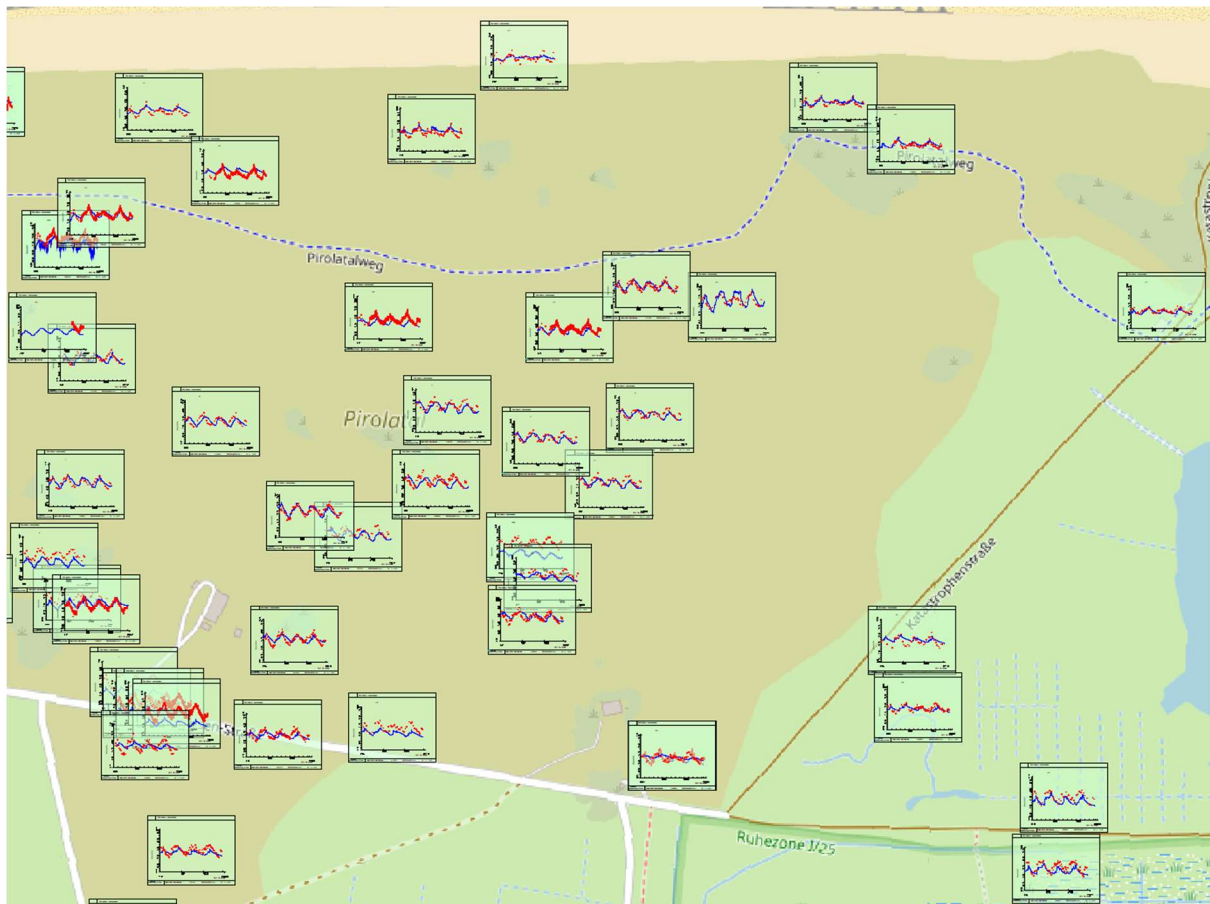


Abbildung 52: Instationäre Kalibrierung: Detail 2 der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien

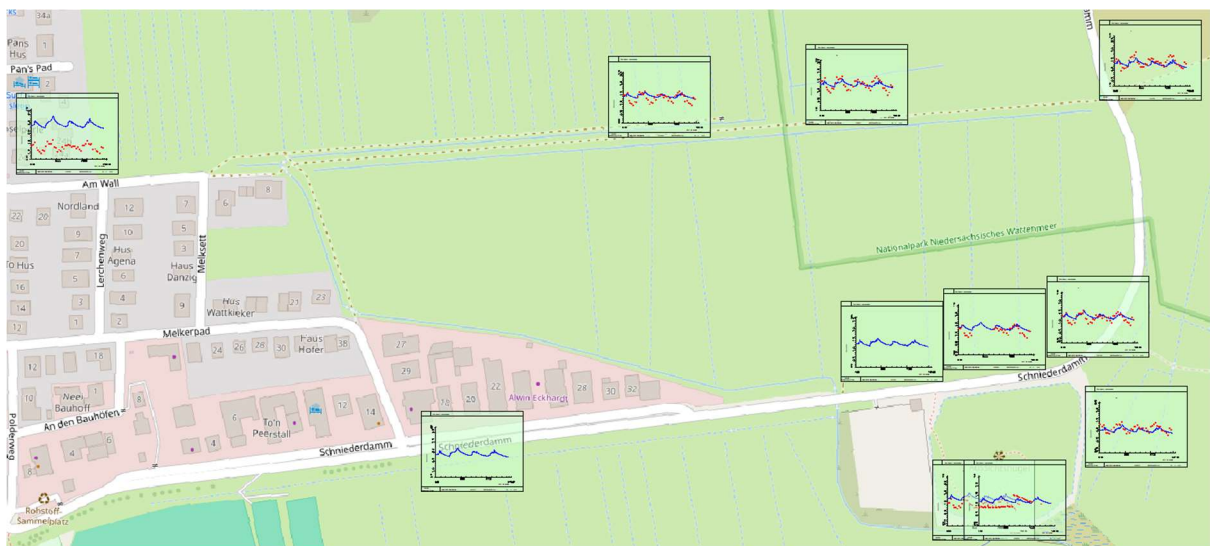


Abbildung 53: Instationäre Kalibrierung: Detail 3 der berechneten (blau) und gemessenen (rot) Ganglinien

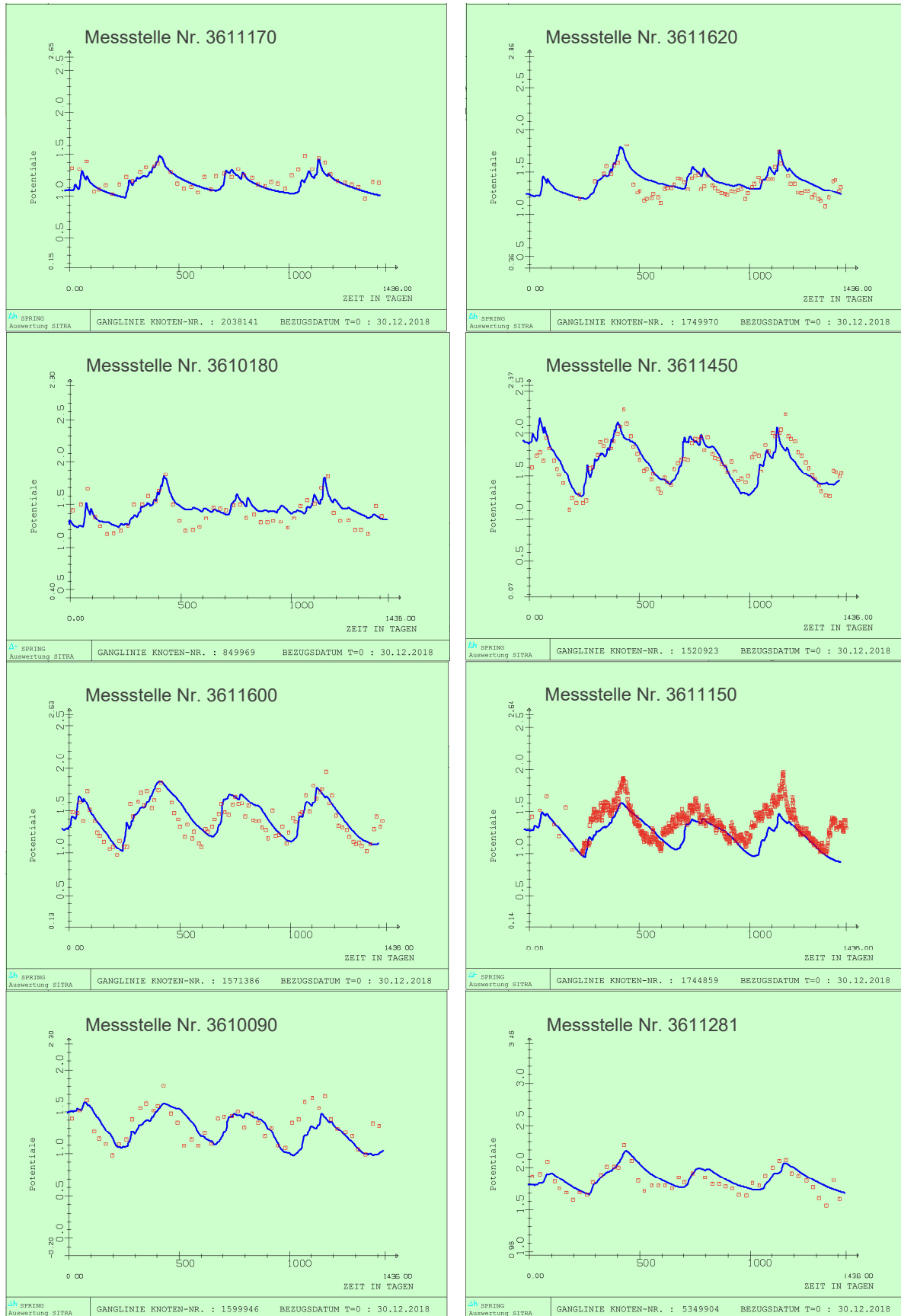


Abbildung 54: Instationäre Kalibrierung: Berechnete (blau) und gemessene (rot) Ganglinie an ausgewählten Messstellen

Die sich aus der Kalibrierung ergebenden Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten für die einzelnen geologischen Schichten sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Kalibrierte Durchlässigkeitsbeiwerte und Porositäten der geologischen Schichten im Modell

Element- schicht Im Modell	Kurz- bez.	Geologische Schicht	Durchlässigkeit [m/s]		Porosität [-] kalibriert
			kalibriert	Startwert (Untergrenze, Obergrenze)	
1	qhfls	Flugsand (Holozän)	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	18%
2	qhKs1	Küstenholozän (klastisch)	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	18%
3	qhKt1	Küstenholozän (tonig)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$	10%
4	qhKs2	Küstenholozän (klastisch)	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	10%
5	qhhn1	Niedermoortorf	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$	10%
6	qwf	Fluviatile Ablagerung (Weichsel)	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$	15%
7	qee	Interglaziale Ablagerungen (Eem)	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$	10%
8	qdgf	Schmelzwassersande (Drenthe, Saale-Eiszeit)	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	18%
9	qL_lio	Linsen des Lauenburger Tons	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$	10%
10	qdgf	Schmelzwassersande (Drenthe, Saale-Eiszeit)	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3}$	18%
11	qLt	Lauenburger Ton	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$	10%
12	qegf1	Schmelzwassersande (Elster)	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$	15%
13	qp	Altpleistozän	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$	10%
14		Tertiär, Kreide, Perm	$4,0 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-5}$	10%

Im Ergebnis der instationären Kalibrierung mit einer guten Abbildung der instationären Grundwasserdynamik ergibt sich ein berechneter valider Ausgangszustand, der für die folgenden Prognoserechnungen die Grundlage bildet. Im Vertikalschnitt (Abbildung 55), der S-förmig durch das Brunnenfeld West verläuft, ist die überwiegend horizontale Anströmung der Brunnen, die im klastischen Küstenholozän verfiltert sind, sichtbar. Die horizontale Strömungskomponente ist auch in den weiteren quartären Schichten dominant. Erst unterhalb der Quartärbasis wechseln die Grundwassergleichen in einen horizontalen Verlauf und entsprechend vertikal dominierte Strömung. In den Horizontalschnitten (Abbildung 56) entlang von ausgewählten Schichtgrenzen im Modell sind die Konzentrationen ab 0,25 g/l dargestellt, um die Lage der Süßwasserlinse und ihre veränderliche Ausdehnung über die Höhe zu zeigen. Die Süßwasserlinse ist in den Schnitten a und b als weiße Fläche zu sehen. In Schnitt b wird auch die Teilung in eine westliche und eine östliche Linse sichtbar. Die Süßwasserlinse ist unten (b) etwas schmaler als oben (a). Die Schnitte c, d und e verlaufen durch Salzwasser. Deutlich zu sehen sind die dichteinduzierten Konvektionszellen anhand der wechselnden „gestreiften“ Konzentrationen. Die Horizontalschnitte in unterschiedlicher Tiefenlage zeigen eine Zweiteilung Ost – West der Süßwasserlinse in Form einer Einschnürung, die bei alleiniger Betrachtung der Begrenzung der Linse in der Kartendarstellung auf Inselhöhe nicht sichtbar wird. Dieser Umstand muss bei der Festlegung der Brunnenstandorte berücksichtigt werden.

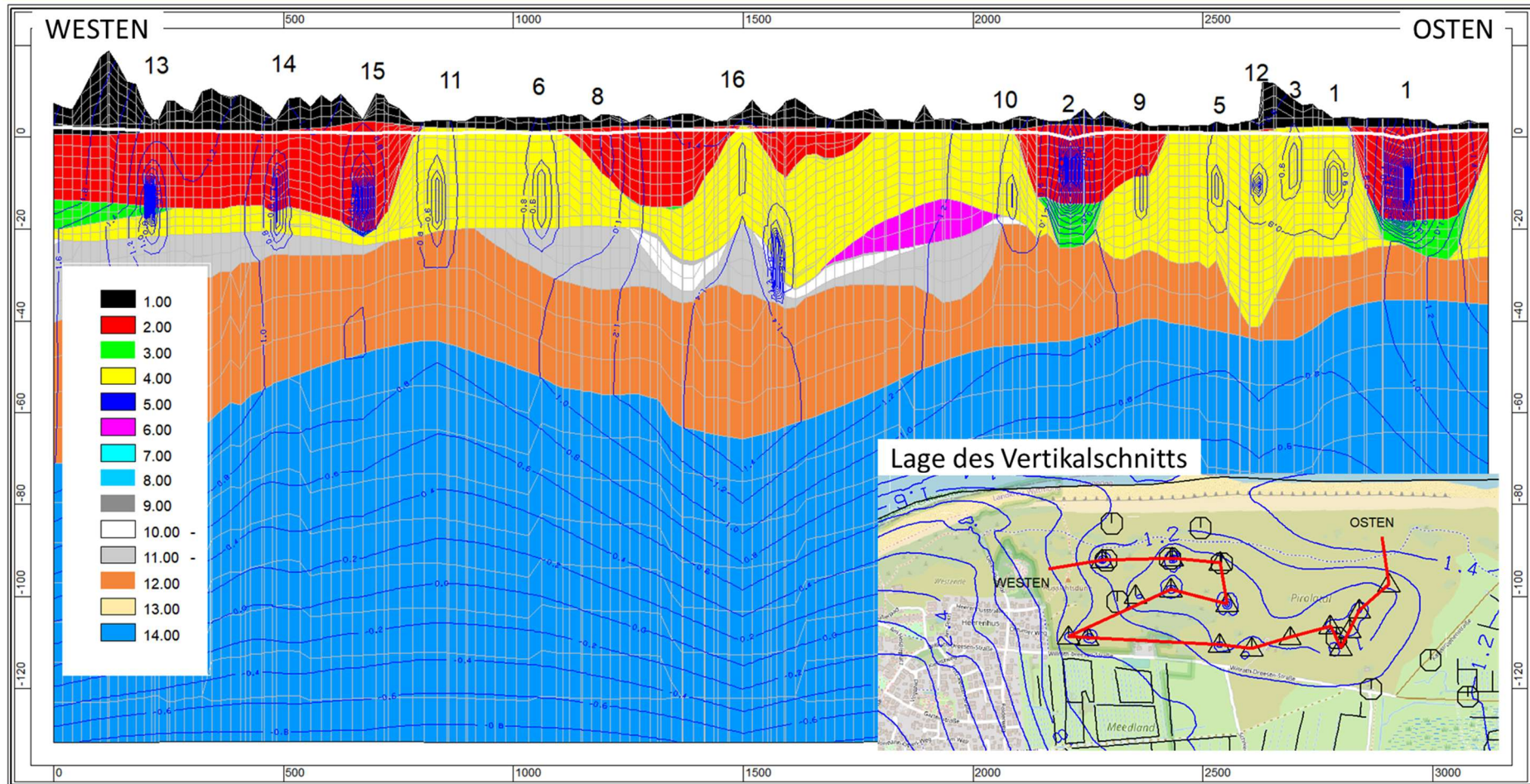


Abbildung 55: Ausgangszustand: Vertikalschnitt durch das Brunnenfeld West mit geologischen Schichten (Nummerierung gemäß Tabelle 13) und Grundwassergleichen (blaue Linien)

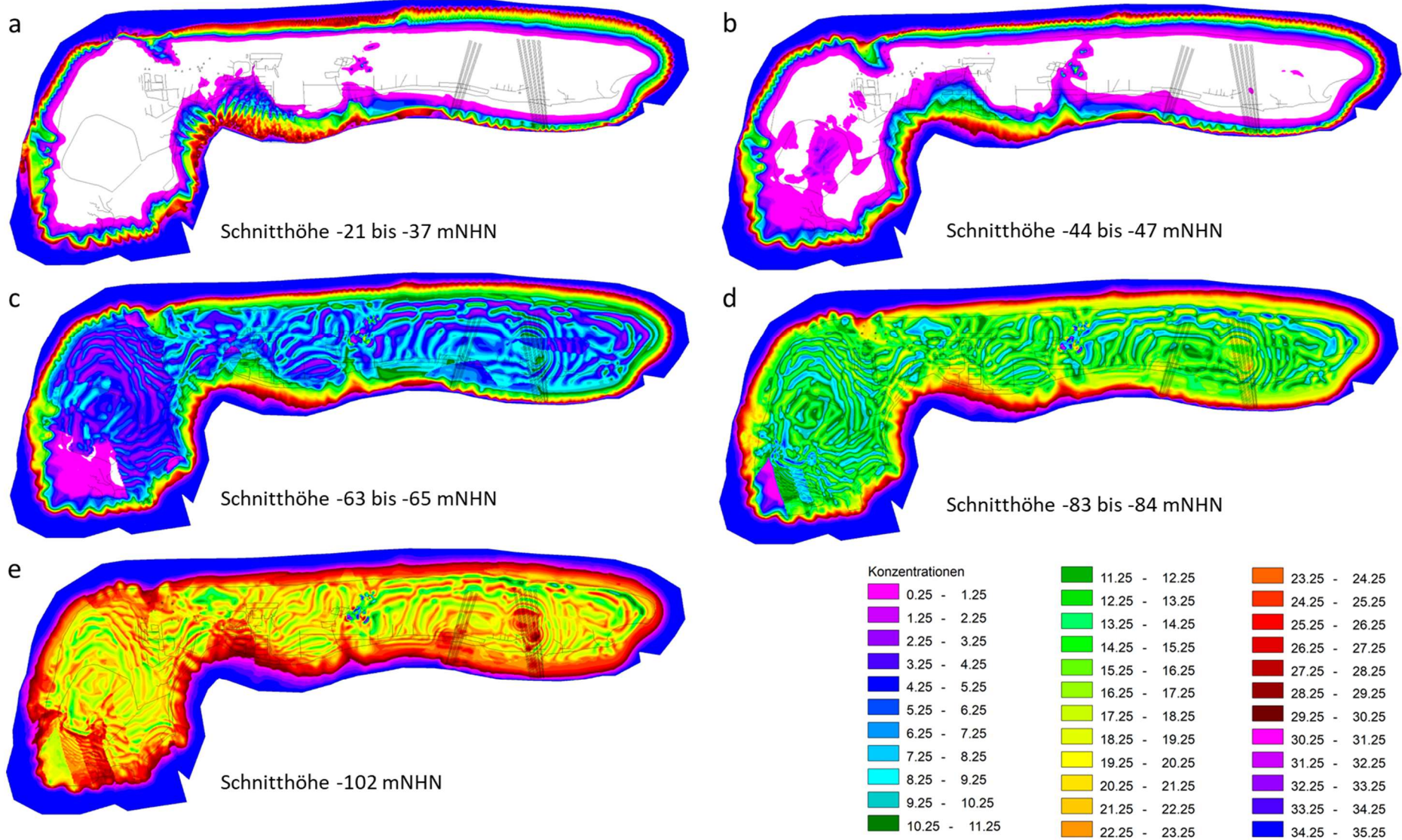


Abbildung 56: Ausgangszustand Süß- und Salzwasser: Horizontalschnitte mit Konzentrationen größer als 0,25 g/l

7.3 Zusätzliche Plausibilisierung des Modells

Eine überschlägige Methode zur Ermittlung der maximalen Mächtigkeit der Süßwasserlinse in der Mitte einer Insel ist in [23] beschrieben. Die Mächtigkeit ohne Entnahme ist von der Breite der Insel, dem Dichteverhältnis, der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung sowie der mittleren horizontalen gesättigten Durchlässigkeit des Aquifers abhängig:

$$H_u[m] = \frac{W}{2} \left[\left(1 + \alpha \right) \frac{R}{2K_0} \right]^{1/2} \quad \text{mit} \quad \alpha[-] = \frac{(\rho_s - \rho_0)}{\rho_0} \quad (19)$$

- H_u = maximale Mächtigkeit der Süßwasserlinse in der Mitte einer Insel [m]
 W = Breite der Insel [m]
 ρ_0 = Dichte Süßwasser [kg/m³]
 ρ_s = Dichte Salzwasser [kg/m³]
 R = mittlere jährliche Grundwasserneubildung [m/a]
 K_0 = mittlere horizontale gesättigte Durchlässigkeit des Aquifers [m/a]

Tabelle 14 zeigt die Berechnungsergebnisse. Die Breite der Insel Langeoog liegt zwischen 1400 m im Osten und 2500 m im Westen. Entsprechend variiert die maximale Mächtigkeit der Süßwasserlinse ohne Förderung nach der überschlägigen Rechnung zwischen 33,1 und 59,1 m. Das numerische Modell liefert vergleichbare Werte. Für die Breite 2500 m ist die Mächtigkeit der Süßwasserlinse in einem Vertikalschnitt gezeigt (Abbildung 57).

Tabelle 14: Vergleich der Mächtigkeiten der Süßwasserlinse nach verschiedenen Methoden

	H_u (überschlägig)	Numerisches Modell
Breite $W = 1400$ m	33,1 m	~33 m
Breite $W = 2500$ m	59,1 m	~60 m (Abbildung 57)

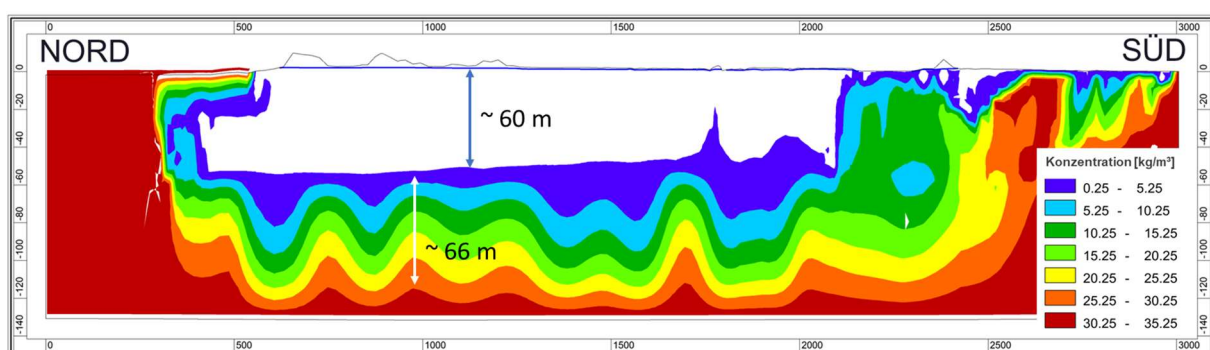


Abbildung 57: Mächtigkeit der Süßwasserlinse und der Übergangszone zum Salzwasser im Modell bei einer Breite von 2500 m

Im Erläuterungsbericht zum Geologischen 3D-Untergrundmodell des Wasserwerks Langeoog [4] wird das Süßwasservolumen der Insel mit 0,06 km³ angegeben. Das im Modell berechnete Süßwasservolumen ergibt sich unter Annahme einer longitudinalen Dispersionslänge von 60 m zu 0,06434 km³. Damit wird die Parameterwahl für die Dispersionslänge bestätigt.

Es ergibt sich ein Dispersionskoeffizient D von $0,16 \text{ m}^2/\text{a}$. Die Mächtigkeit der Übergangszone zwischen Süß- und Salzwasser ermittelt sich nach der Formel [23]

$$\delta_u = H_u \cdot \frac{K_0}{R} \left(\frac{D}{\alpha W K_0} \right)^{1/2} \quad \text{mit} \quad \alpha[-] = \frac{(\rho_s - \rho_0)}{\rho_0} \quad (20)$$

- δ_u = Mächtigkeit der Übergangszone zwischen Süß- und Salzwasser [m]
 H_u = maximale Mächtigkeit der Süßwasserlinse in der Mitte einer Insel [m]
 K_0 = mittlere horizontale gesättigte Durchlässigkeit des Aquifers [m/a]
 R = mittlere jährliche Grundwasserneubildung [m/a]
 D = Dispersionskoeffizient [m^2/a]
 W = Breite der Insel [m]
 ρ_0 = Dichte Süßwasser [kg/m^3]
 ρ_s = Dichte Salzwasser [kg/m^3]

zu ca. 66 m. Auch hier zeigt das numerische Modell gute Übereinstimmung (Abbildung 57).

Mit einer konstanten Entnahme Q [m^3/a] reduziert sich die maximale Mächtigkeit der Süßwasserlinse abhängig vom Verhältnis der Entnahmemenge bezogen auf die Fläche der Insel und der Grundwasserneubildungsrate:

$$H_p[m] = (1 - q)^{1/2} H_u = \frac{(1-q)^{1/2} W}{2} \left[(1 + \alpha) \frac{R}{2K_0} \right]^{1/2} \quad \text{mit} \quad q = (Q / A) / R \quad (21)$$

- H_p = maximale Mächtigkeit der Süßwasserlinse in der Mitte einer Insel bei Süßwasserentnahme [m]
 Q = Entnahmemenge [m^3/a]
 A = Landfläche der Insel [m^2]
 R = mittlere jährliche Grundwasserneubildung [m/a]
 H_u = maximale Mächtigkeit der Süßwasserlinse in der Mitte einer Insel [m]
 W = Breite der Insel [m]
 α = $\frac{(\rho_s - \rho_0)}{\rho_0}$
 ρ_0 = Dichte Süßwasser [kg/m^3]
 ρ_s = Dichte Salzwasser [kg/m^3]
 K_0 = mittlere horizontale gesättigte Durchlässigkeit des Aquifers [m/a]

Die überschlägige Berechnung wurde für zwei verschiedene Fördermengen, die aktuelle durchschnittliche Fördermenge und eine mögliche, zukünftige Gesamtfördermenge, durchgeführt (Tabelle 15), um die Fördermengen und ihren Einfluss auf die Süßwasserlinse qualitativ einzuordnen. Nach dieser überschlägigen Berechnung ist die zusätzliche Förderung umsetzbar.

Tabelle 15: Mächtigkeiten der Süßwasserlinse mit verschiedenen Fördermengen

	H_p für $Q = 301.000 \text{ m}^3/\text{a}$	H_p für $Q = 450.000 \text{ m}^3/\text{a}$
Breite $W = 1400 \text{ m}$	32,2 m	31,7 m
Breite $W = 2500 \text{ m}$	57,5 m	56,7 m

8 Prognoserechnungen

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden verschiedene Prognoserechnungen zum Betrieb von insgesamt acht ONAS und zur Ausweitung der Trinkwassergewinnung auf die östliche Süßwasserlinse durchgeführt.

8.1 Betrieb der geplanten Kabelsysteme: Prognose der Temperaturverteilung und der Dichteänderung

Für die Berechnungen der Temperaturverteilung wurde, wie bereits in Kap. 4.10 erläutert, der Betrieb von acht ONAS betrachtet, von denen drei ONAS im westlichen Korridor und fünf ONAS im östlichen Korridor liegen. Dabei wurde der maximale Lastfall mit der gleichzeitigen Nutzung beider Korridore und aller ONAS bei einem Auslastungsgrad von 100% betrachtet (siehe Kap. 4.10.3).

Die betriebsbedingte Erwärmung wurde mit einer stationären Prognoserechnung unter Ansatz der Verlustleistung im Regelbetrieb ermittelt. Die resultierende stationäre Temperaturverteilung ist von Abbildung 58 bis Abbildung 63 in Horizontal- und Vertikalschnitten dargestellt.

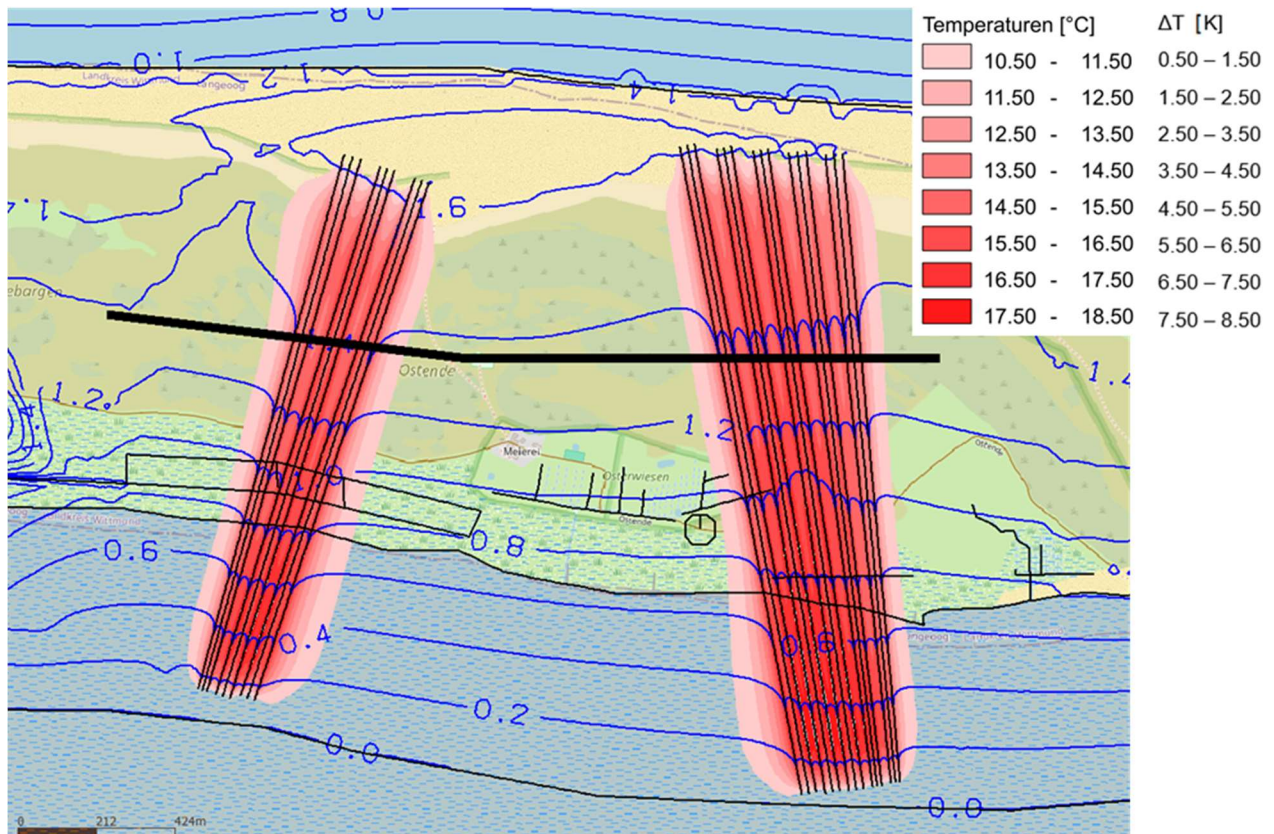


Abbildung 58: Stationäre Temperaturverteilung auf der Höhe von -32,72 mNHN, Lage des Vertikalschnitts West-Ost

Die Ausgangstemperatur des Grundwassers beträgt 10 °C. Der Betrieb der Kabeltrassen bewirkt eine Erwärmung im Nahbereich der Kabeltrassen in alle Richtungen, horizontal bis zu einer Entfernung von 140 m vom außenliegenden Kabelstrang (Abbildung 58), vertikal bis zu einer Entfernung von 85 m nach unten und bis zu einer Entfernung von 30 m nach oben (Abbildung 59). In den Abbildungen ist jeweils der Bereich der Erwärmung um mindestens 0,5 K dargestellt. Außerhalb des farbigen Bereiches

liegt die prognostizierte Erwärmung unter 0,5 K. Die maximale Erwärmung wird mit 10 K direkt an den Kabelsträngen prognostiziert (Abbildung 59).

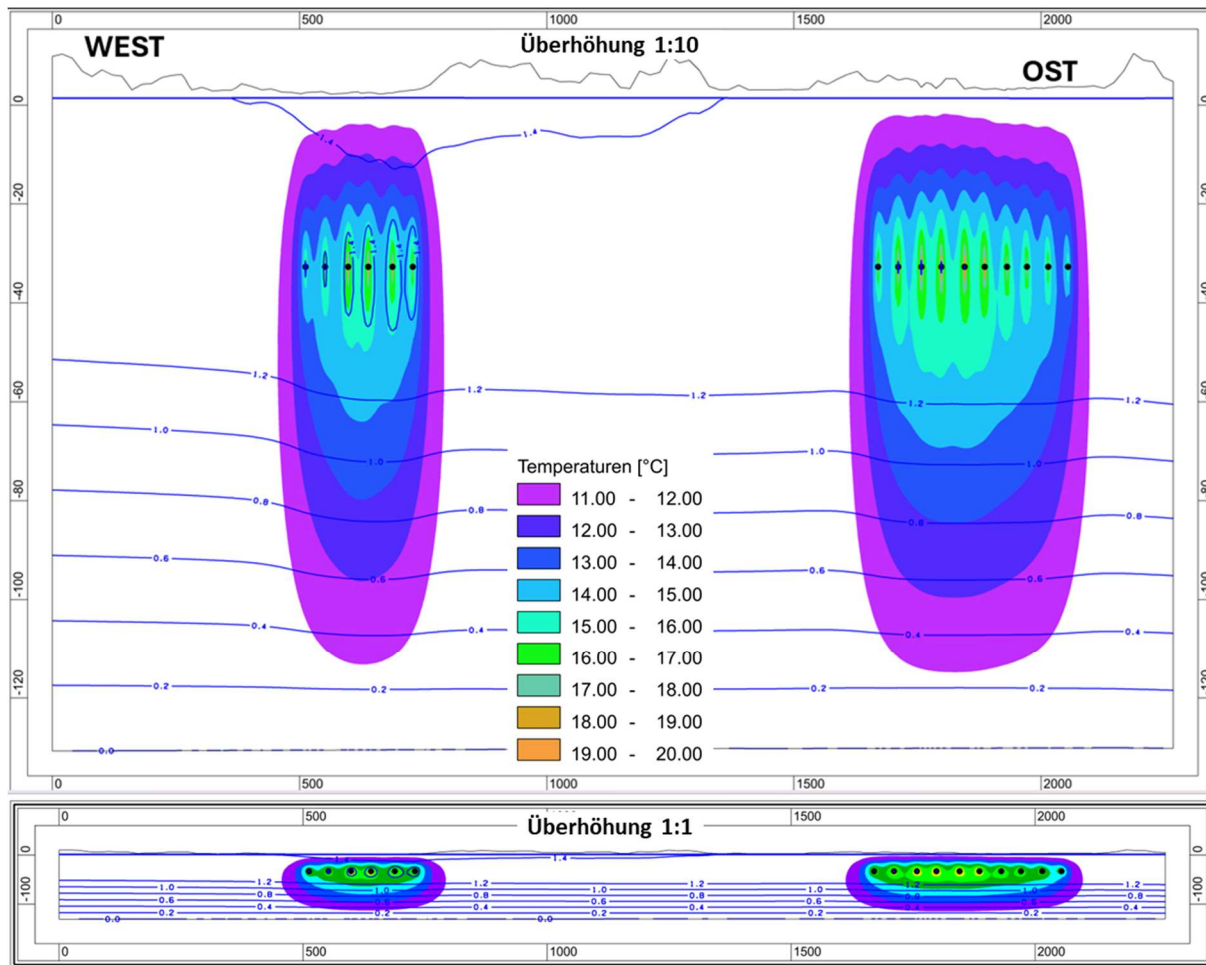


Abbildung 59: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt West – Ost (Überhöhung 1:10, 1:1) mit GW-Potentiallinien

Anhand der Vertikalschnitte durch verschiedene Kabelstränge (Abbildung 60 bis Abbildung 63) wird gezeigt, dass die größte Erwärmung von bis zu 10 K an den Kabelsträngen in der Mitte des breiteren östlichen Korridors im horizontal verlaufenden tiefliegenden Abschnitt prognostiziert wird (Abbildung 62). Bei höher gelegenen Abschnitten und Kabelsträngen am Rand eines Korridors ist die Erwärmung durch Kühlungseffekte reduziert. Am Rückleiter wird eine geringere Erwärmung von maximal 6 K durch die benachbarten Plus- und Minuspole erzeugt (Abbildung 61).

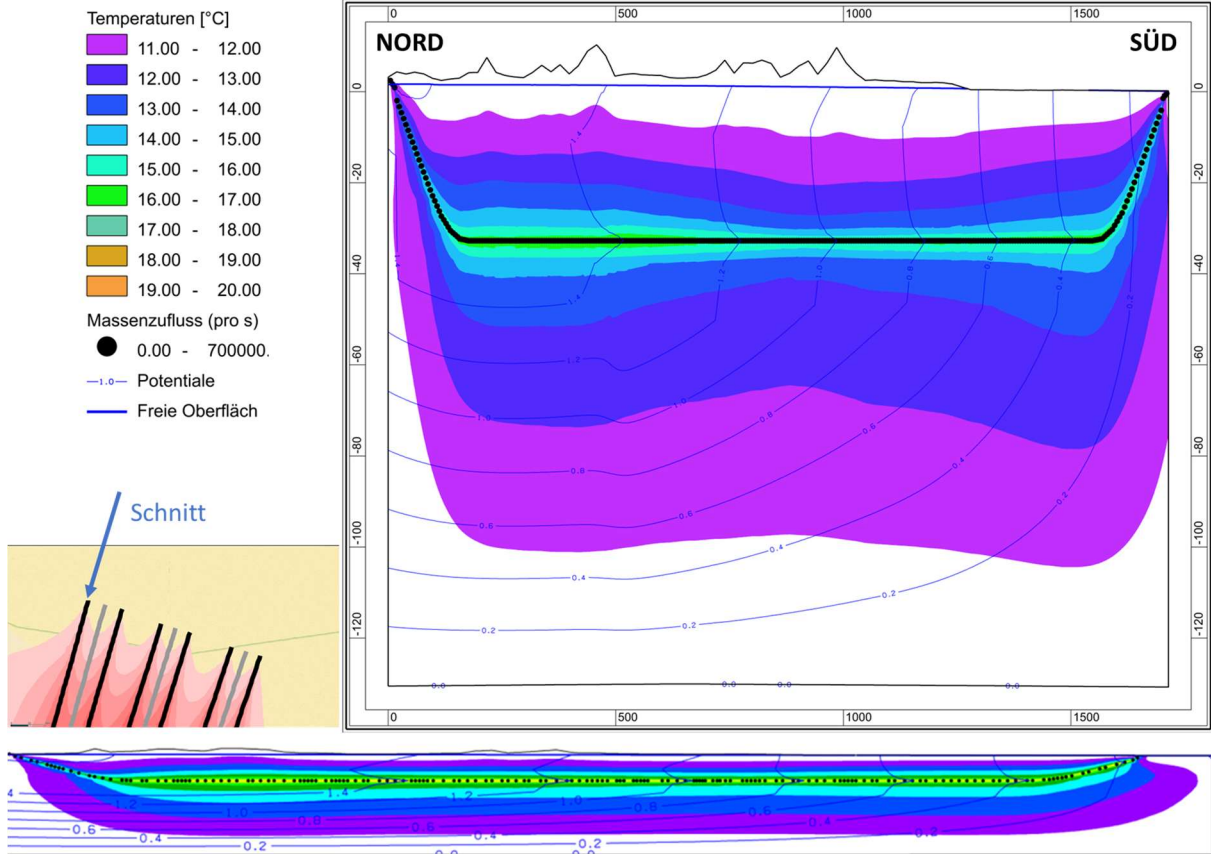


Abbildung 60: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd entlang des Kabels West, NOR-14-1 IBN 2032 Blockland/neu, Überhöhung 1:10 (oben), Überhöhung 1:1 (unten)

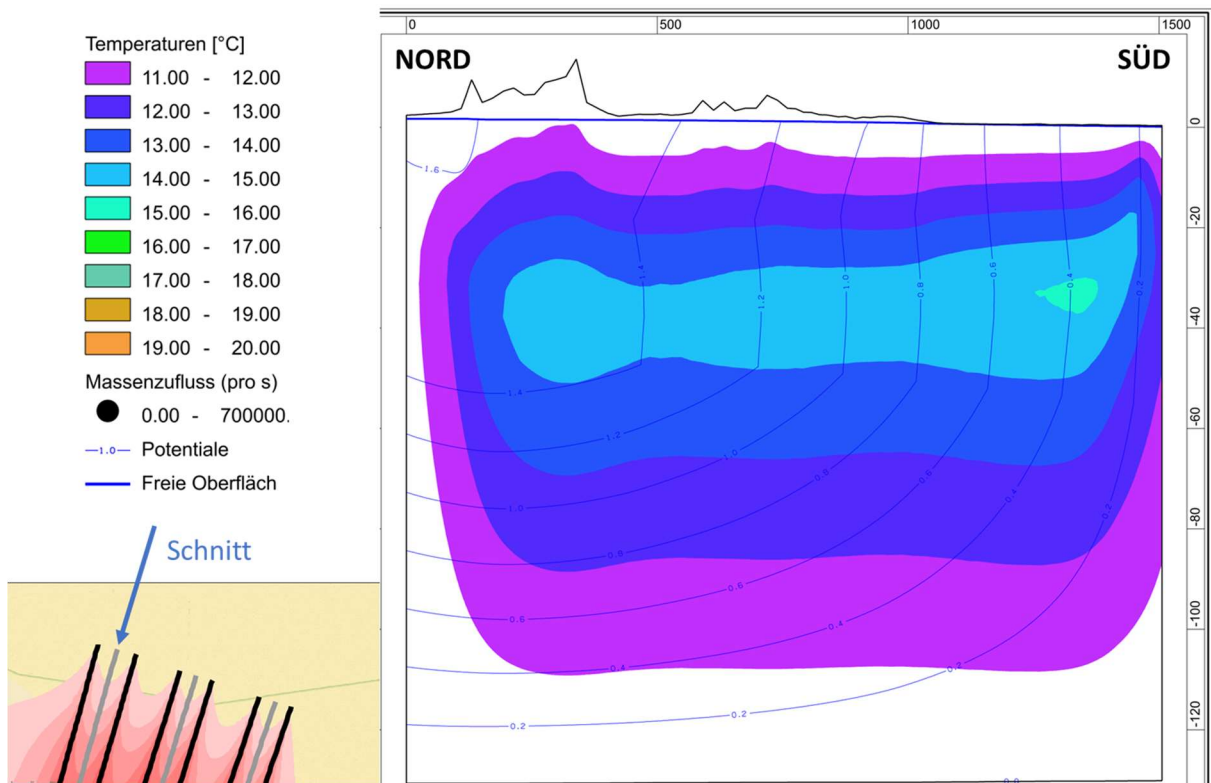


Abbildung 61: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd (Überhöhung 1:10) entlang des metallischen Rückleiters, NOR-14-1 IBN 2032 Blockland/neu

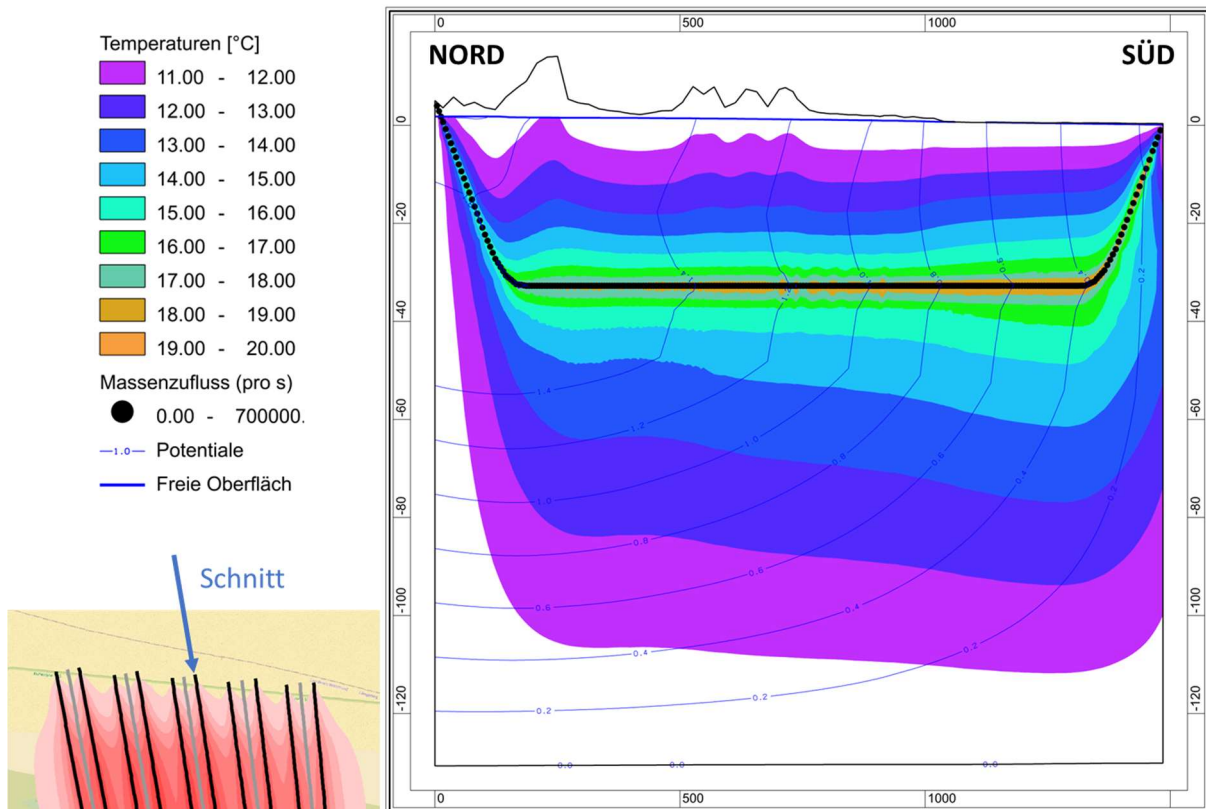


Abbildung 62: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd (Überhöhung 1:10) entlang des HVDC-Kabels Ost, NOR-19-2 IBN 2037 SR Ried

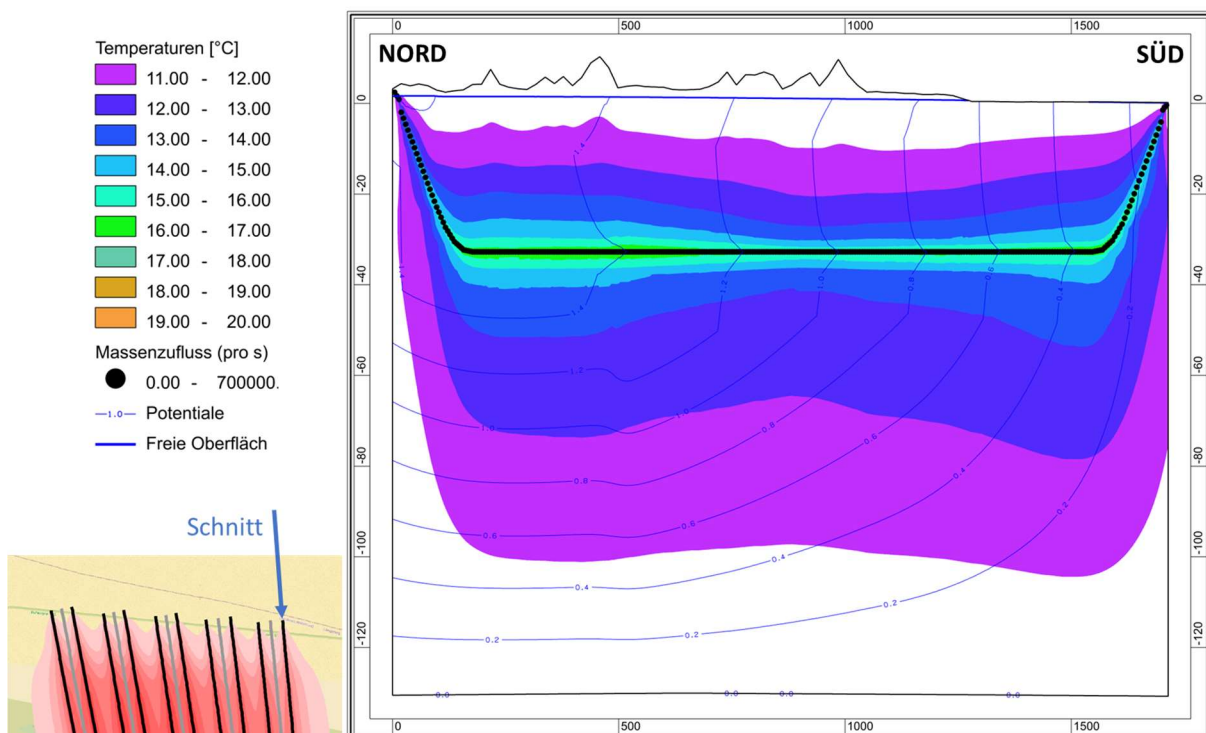


Abbildung 63: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt Nord-Süd (Überhöhung 1:10) entlang des HVDC-Kabels Ost, NOR-20-1 IBN 2039 SR Rastede

Die Erwärmung und die damit einhergehende Reduktion der Dichte führt zur Ausbildung von Konvektionszellen im Umfeld der Kabelstränge (Abbildung 64; Abbildung 65).

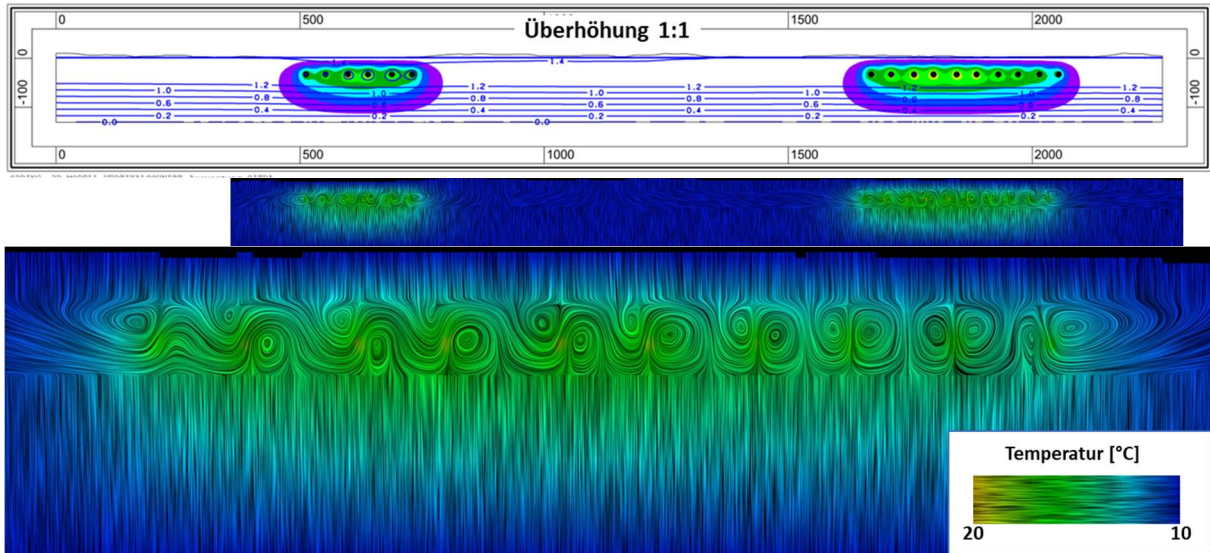


Abbildung 64: Stationäre Temperaturverteilung im Vertikalschnitt West – Ost (Überhöhung 1:1) mit GW-Potentiallinien, Strömungsfeld mit Temperaturverteilung (Überhöhung 1:1, Zoom Kabelbündel im östlichen Korridor C6b)

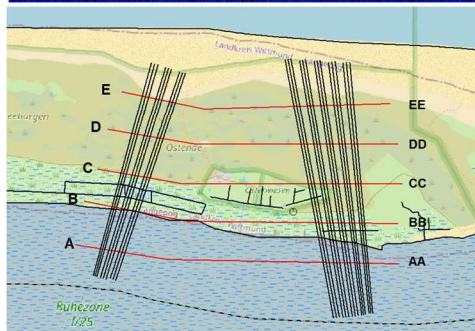
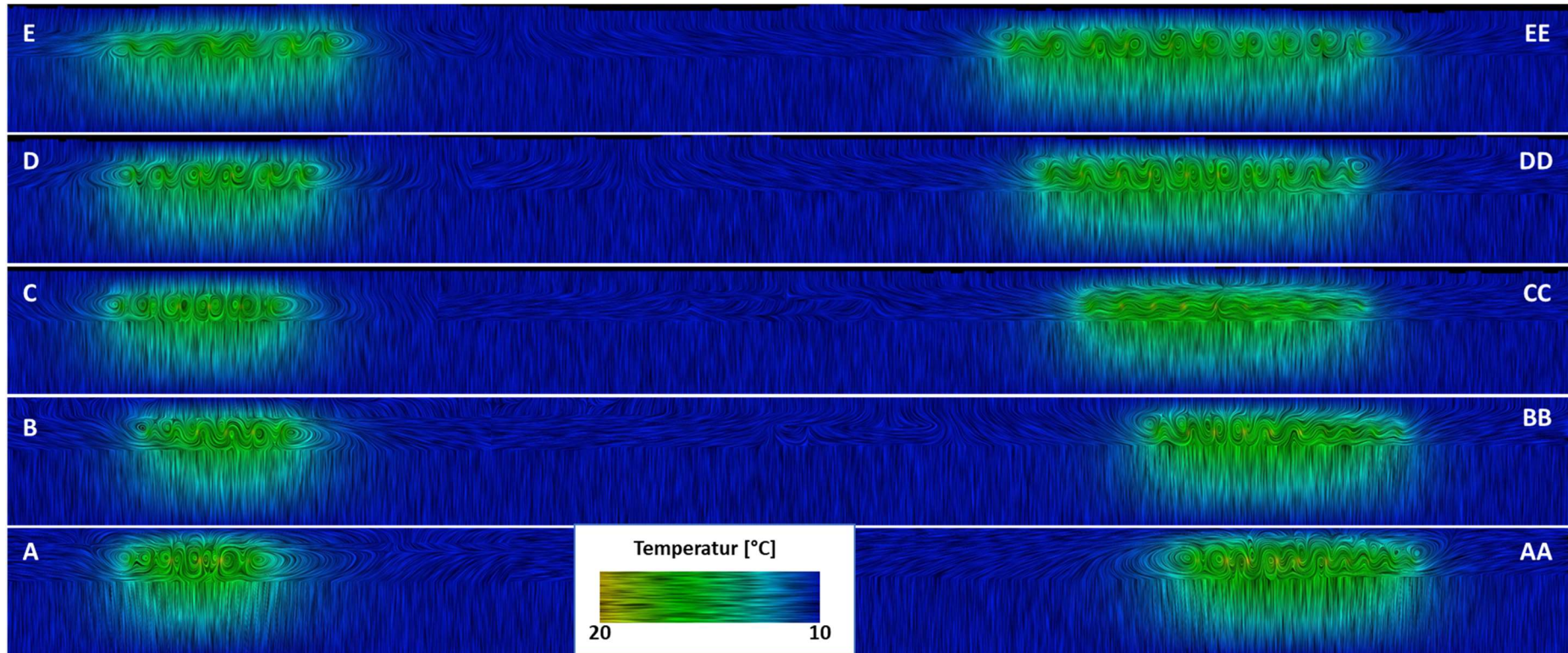


Abbildung 65: Stationäres Strömungsfeld mit Temperaturverteilung in 5 Vertikalschnitten (Überhöhung 1:1), Lage der Schnitte

Die Erwärmung in der Umgebung der Kabelstränge führt zu einer Reduktion der Dichte in diesem Bereich (Abbildung 66). Die Dichtereduktion ist direkt an den Kabelsträngen mit $3,8 \text{ kg/m}^3$ am höchsten und geht gegen 0 am Rand des Bereichs, der erwärmt wird.

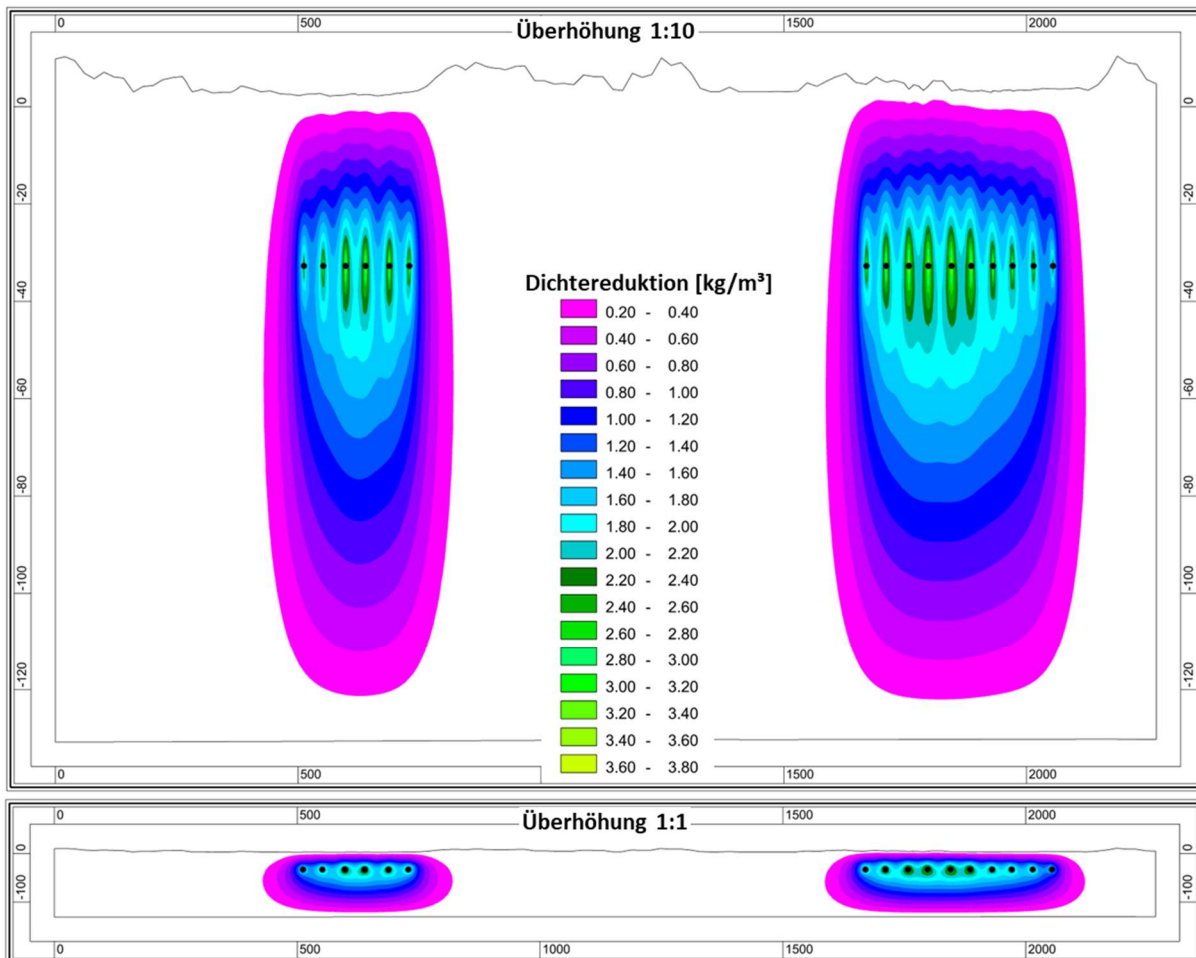


Abbildung 66: Stationäre Reduktion der Dichte aufgrund der Wärmeausbreitung im Vertikalschnitt West – Ost

Die Dichtereduktion bewirkt, dass die Süß-Salzwassergrenze sich geringfügig nach oben bewegt. Die Differenz ist von der Größenordnung her so gering, dass sie in den Ergebnissen der Modellierung kaum sichtbar und daher vernachlässigbar ist.

8.2 Ausweitung der Trinkwassergewinnung in die östliche Süßwasserlinse

Derzeit erfolgt die Trinkwassergewinnung für die Insel Langeoog durch den Betrieb von 18 Förderbrunnen im Westen der Insel (westliche Süßwasserlinse). Zur nachhaltigen Sicherstellung der autonomen Trinkwasserversorgung aus der Süßwasserlinse auf Langeoog, werden langfristig auch Optionen für eine Ausweitung der Trinkwassergewinnung in die östliche Süßwasserlinse geprüft. Für das Modell sollten daher mögliche Varianten zur Anordnung und Kapazität eines neuen Brunnenfeldes im Osten der Insel berücksichtigt und ausgewertet werden. Grundlage der Modellbetrachtungen ist ein hypothetischer Worst-Case-Ansatz, bei dem es zum Ausfall von sechs Förderbrunnen im Westen der Insel kommt und diese durch alternative Förderbrunnen im Osten der Insel zu ersetzen sind.

Nach Informationen des lokalen Wasserversorgers OOWV kann nach geltendem Wasserrecht auf Langeoog derzeit eine Grundwassermenge von etwa $450.000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$ über die 18 Förderbrunnen

gefördert werden. Bei einem Ausfall von 6 Förderbrunnen wäre damit eine Fördermenge von etwa 150.000 m³/Jahr über neue Förderbrunnen im östlichen Bereich der Süßwasserlinse zu ersetzen. Für die möglichen Förderbrunnen wurden Standorte gewählt, welche nach erster Abschätzung durch den Wasserversorger zum jetzigen Zeitpunkt als vorzugswürdig einzustufen sind (vgl. Abbildung 67).

Zusammenfassend wurden folgende Kriterien bei den Überlegungen zu einem neuen Brunnenfeld im Osten berücksichtigt:

- Einhaltung eines Sicherheitsabstands zu den geplanten Kabeltrassen
- Anlage von unvollkommenen Brunnen mit Verfilterung möglichst im oberen Bereich des Küstenholozäns zwischen ca. -1 bis -10 m NHN
- Anlage der Brunnen möglichst im Nahbereich der Flächen, die vom OOWV aufgrund von Naturschutzbelangen vorausgewählt wurden (Abbildung 67)
- Einhaltung eines Mindestabstands zwischen den Brunnen von möglichst 150 m
- Vermeidung von Upconing
- Anlage der Brunnen im Nahbereich der Wasserscheide

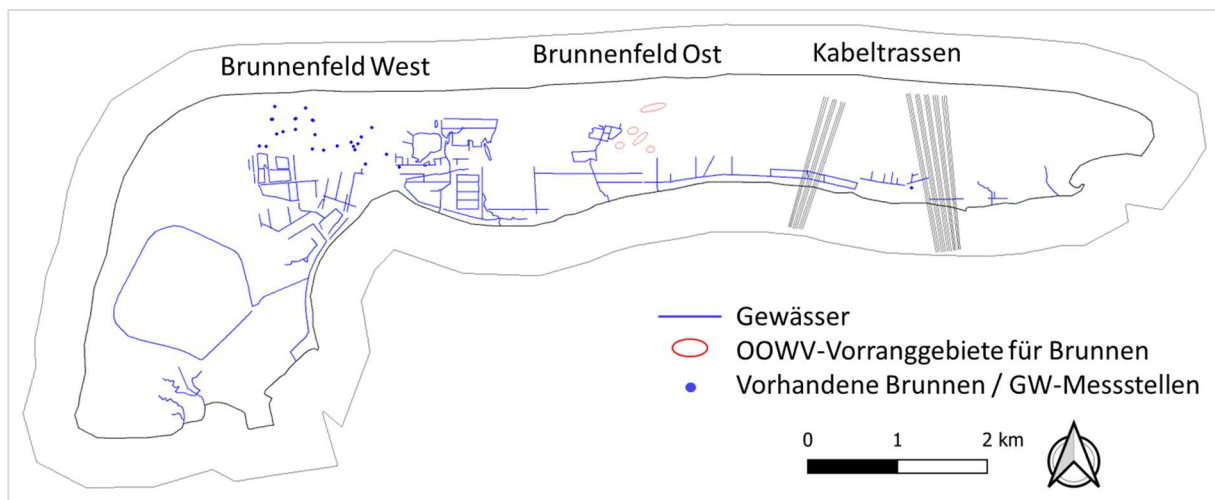
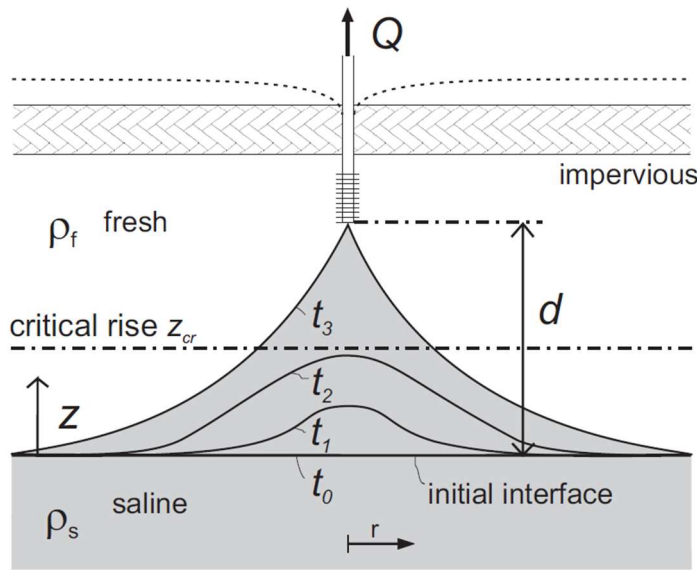


Abbildung 67: Brunnenfeld Ost: Lage der vom OOWV vorausgewählten Flächen für Brunnen

Das Phänomen des Upconing bzw. des Aufsteigens der Süß-Salzwasser-Grenzfläche unterhalb eines Brunnens tritt auf, wenn sich unter süßem Grundwasser, das gefördert werden soll, salziges Grundwasser befindet. Durch das Absenken der freien Grundwasseroberfläche kann sich die Süß-Salzwasser-Grenzfläche unterhalb des Brunnens nach oben verschieben [27] (Abbildung 68). Abhängig vom ursprünglichen Abstand des Brunnenfilters zur Grenzfläche, der horizontalen Durchlässigkeit und dem relativen Dichteunterschied ergibt sich eine maximal mögliche Entnahmemenge. Ist sie dauerhaft überschritten, wird sich die Grenzfläche über lange Zeiträume bis zum Brunnen verschieben und schließlich das geförderte Wasser versalzen.



- Q – Entnahmemenge [m³/s]
- ρ_f – Dichte Süßwasser [kg/m³]
- ρ_s – Dichte Salzwasser [kg/m³]
- z – Lagehöhe der Süß-Salzwassergrenze [mNHN]
- z_{cr} – kritische Lagehöhe der Süß-Salzwassergrenze [mNHN]
- d – Abstand zwischen der Filterunterkante des Brunnens und der Süß-Salzwassergrenze zu Beginn der Entnahme [m]
- t_0 – Startzeitpunkt: Beginn der Entnahme
- t_1, t_2, t_3 – verschiedene Zeitpunkte nach Beginn der Entnahme
- r – horizontaler Abstand von der Mitte des Brunnens

Abbildung 68: Upconing (übernommen aus [27])

Die maximal mögliche Entnahmemenge lässt sich nach [27] überschlägig mit

$$Q_{max} \leq 2\pi\alpha k_x \theta d^2 \tag{22}$$

ermitteln, wobei

Q_{max} [m ³ /s]	Grenzentnahmerate
$\alpha[-] = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}$	Relativer Dichteunterschied
k_x [m/s]	Horizontaler Durchlässigkeitsbeiwert
Θ [-]	Faktor für kritischen Anstieg der Süß-Salzwassergrenzfläche, Literaturwerte 0,25 – 0,6
d [m]	Abstand zwischen Filterstrecke und Süß-Salzwassergrenzfläche vor der Entnahme

Mit den Annahmen

- $k_x = 2 \cdot 10^{-6}$ m/s
- $\Theta = 0,6$
- d = 40 m

ergibt sich eine maximal mögliche Entnahmemenge von 9.500 m³/a für einen Einzelbrunnen. Eine detailliertere Bewertung ist mit Hilfe des erstellten Grundwassermodells möglich, da weitere Faktoren das Upconing beeinflussen.

Die folgenden Randbedingungen und ihre Kombination beeinflussen das Upconing:

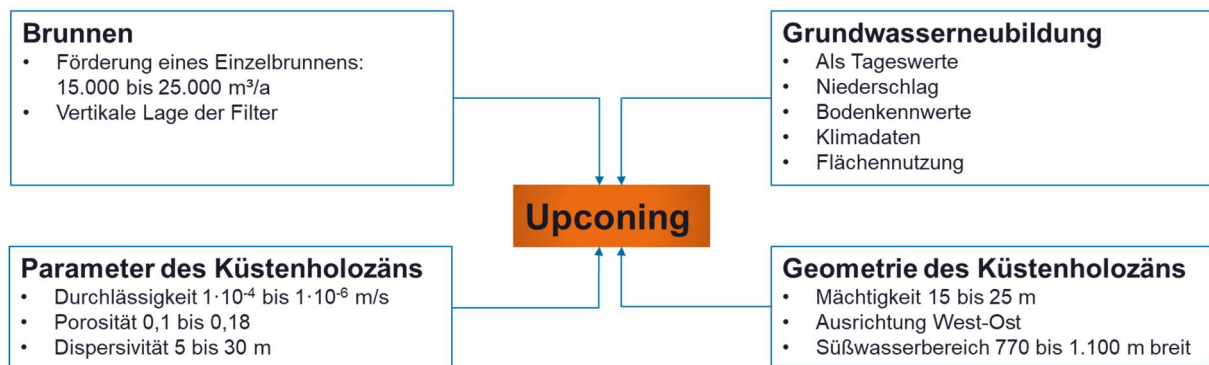


Abbildung 69: Einflussparameter Upconing

Um den Prozess des Upconings zu verdeutlichen, wurde das bestehende Brunnenfeld in der westlichen Süßwasserlinse daraufhin analysiert. Dafür wurden Berechnungen ohne Trinkwassergewinnung durchgeführt und mit den Ergebnissen mit Trinkwassergewinnung verglichen. Abbildung 70 zeigt die Lage der Grundwasseroberfläche und die entsprechenden Flurabstände im Vergleich, Abbildung 71 die zwischen den beiden Zuständen ermittelte Differenz der Grundwasseroberflächen. Hier wird deutlich, wie groß der Einfluss der Entnahmen ist. Das Ausmaß des resultierenden Upconings in der westlichen Süßwasserlinse verdeutlicht ein Nord-Süd-Schnitt in Abbildung 72.

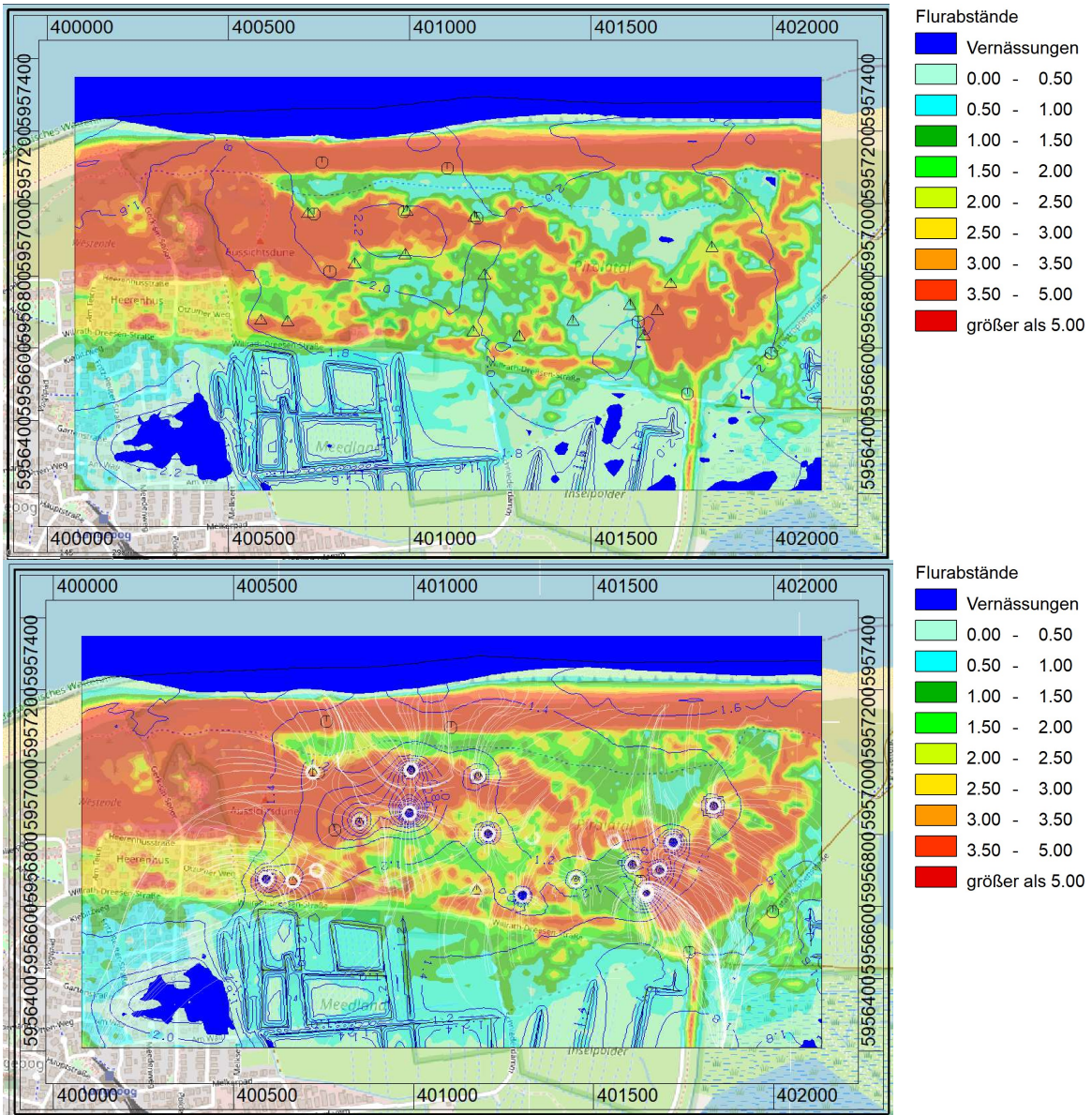


Abbildung 70: Grundwasseroberfläche und Flurabstände in der westlichen Süßwasserlinse ohne Trinkwasserförderung (oben) und mit Trinkwasserförderung (unten)

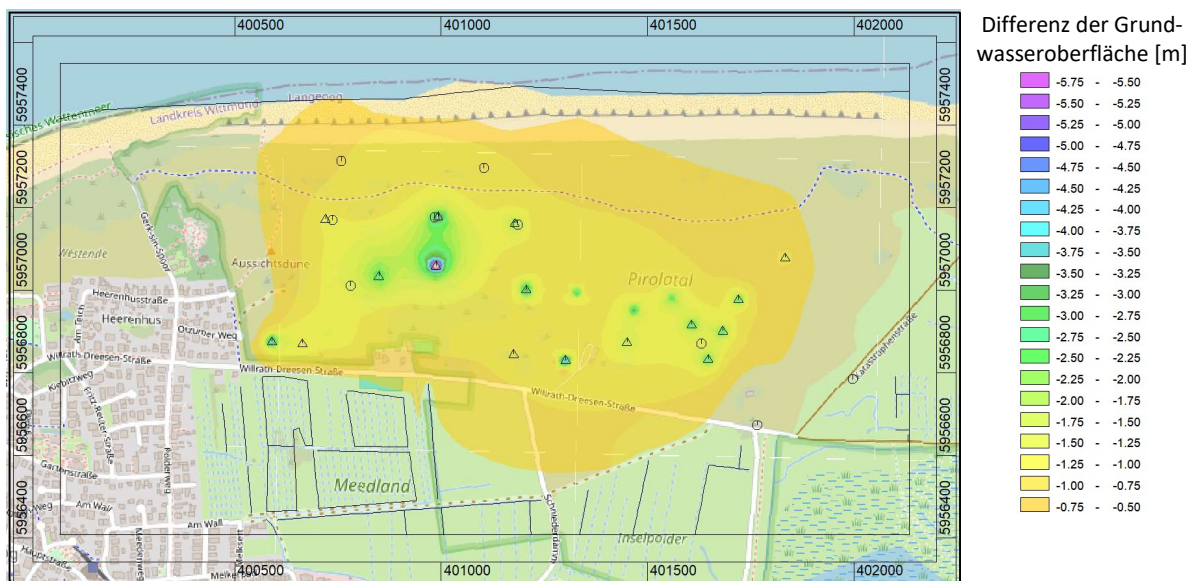


Abbildung 71: Differenz der Grundwasseroberfläche in der westlichen Süßwasserlinse zwischen den Zuständen ohne und mit Trinkwasserförderung bei einer Dispersivität von 60 m

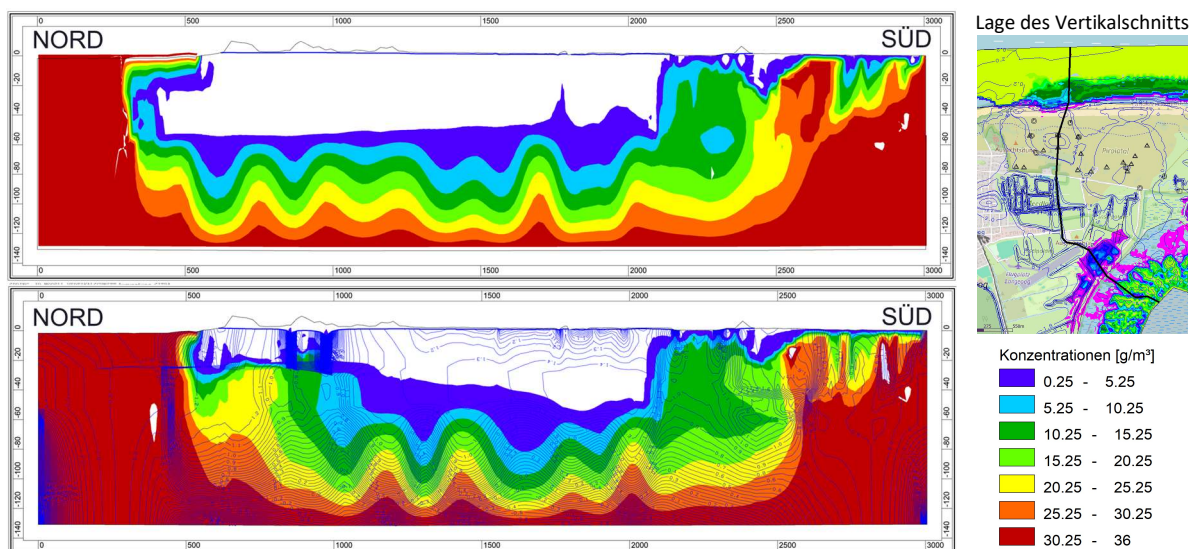


Abbildung 72: Salzkonzentrationen in einem Nord-Süd-Vertikalschnitt durch das westliche Brunnenfeld für den Zustand ohne Trinkwasserförderung (oben) und mit Trinkwasserförderung (unten)

Die folgenden Varianten für zusätzliche Brunnenfelder im Osten wurden im Detail betrachtet:

- Nullvariante: Ohne Förderung im Osten (3D-Modell, dichteabhängige stationäre Rechnung)
- Variante mit 6 Vertikalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 100.000 m³/a (3D-Modell, dichteabhängige stationäre Rechnung)
- Variante mit 6 Vertikalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a (3D-Modell, dichteabhängige stationäre Rechnung)
- Variante mit 6 Vertikalbrunnen (3D-Modell, stationäre Rechnung ohne Dichte)
- Variante mit 6 Horizontalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 100.000 m³/a (3D-Modell, dichteabhängige stationäre Rechnung)

- Variante mit 6 Horizontalbrunnen mit einer maximalen Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a (3D-Modell, dichteabhängige stationäre Rechnung)

8.2.1 Nullvariante ohne Förderung

Für die Nullvariante ohne Förderung in einem östlichen Brunnenfeld wurde eine stationäre dichteabhängige Rechnung mit dem 3D-Modell durchgeführt. Abbildung 73 zeigt die sich ausbildenden Flurabstände. Die Ergebnisse der Nullvariante werden in den weiteren Kapiteln jeweils zum Vergleich herangezogen.

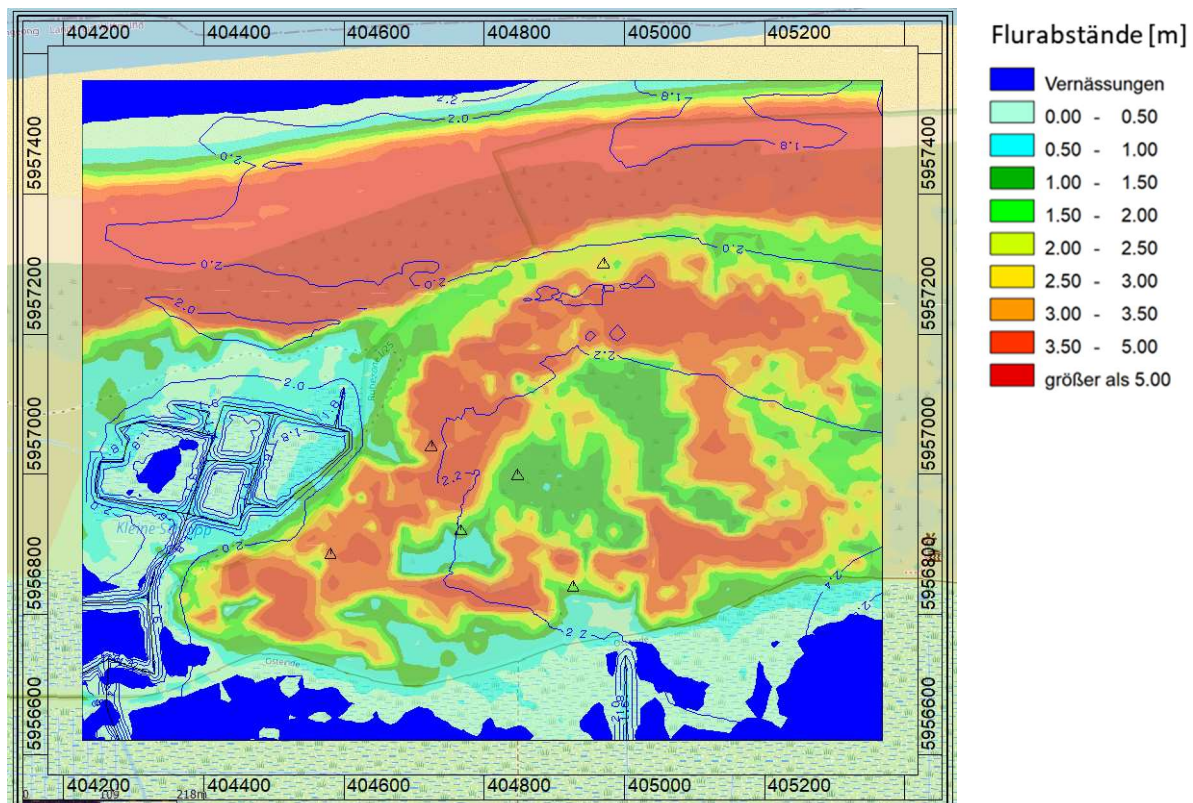


Abbildung 73: Brunnenfeld im Osten: Nullvariante ohne Förderung, Flurabstände

8.2.2 Vertikalbrunnen

Die Varianten mit Vertikalbrunnen wurden in Hinblick auf die vom OOWV vorgeschlagene Gesamtförderleistung von maximal 150.000 m³/a entwickelt. Die Brunnen liegen innerhalb der ausgewiesenen Gebiete und sind als Vertikalbrunnen angelegt (Abbildung 74). Es gibt sechs Brunnen und jeder Brunnen fördert 16.667 m³/a bei einer Gesamtförderleistung von 100.000 m³/a bzw. 25.000 m³/a bei einer Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a. Die maximale Absenkung im Brunnen beträgt ca. 12 m bei einer Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a.

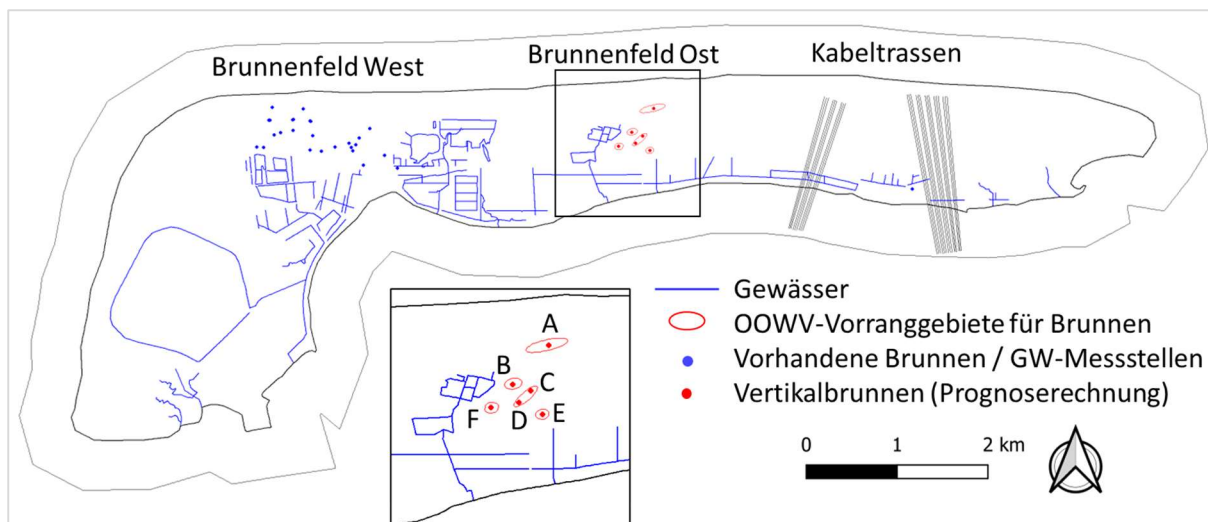


Abbildung 74: Brunnenfeld im Osten: Lage der Vertikalbrunnen für die Prognoserechnung

Abbildung 75 zeigt die prognostizierten Auswirkungen auf die Süßwasserlinse und Upconing-Effekte in einem Vertikalschnitt im Vergleich für die verschiedenen Förderraten. Für die Visualisierung des Upconing-Effekts wird die Minimalkonzentration für Süßwasser von $0,25 \text{ kg/m}^3$ bzw. g/l verwendet. Die Süßwasserlinse entspricht dem Bereich, in dem die Salzkonzentration unterhalb von $0,25 \text{ g/l}$ liegt. Dieser Bereich bleibt weiß. In der ersten Abbildung ohne Förderung verläuft die freie Oberfläche horizontal. Die Mächtigkeit der Süßwasserlinse schwankt stark zwischen ca. 40 m bis hin zu sehr geringen Mächtigkeiten zwischen B und C. In den Abbildungen mit Förderung sind die Absenkungstrichter an den Punkten A-E deutlich sichtbar. An den Absenkungstrichtern tritt jeweils Upconing auf, erkennbar daran, dass die Grenze $0,25 \text{ g/l}$ bis an die freie Oberfläche aufsteigt und das geförderte Wasser somit versalzen wäre. Eine Trinkwassergewinnung mit Vertikalbrunnen in dieser Konfiguration ist nicht möglich.

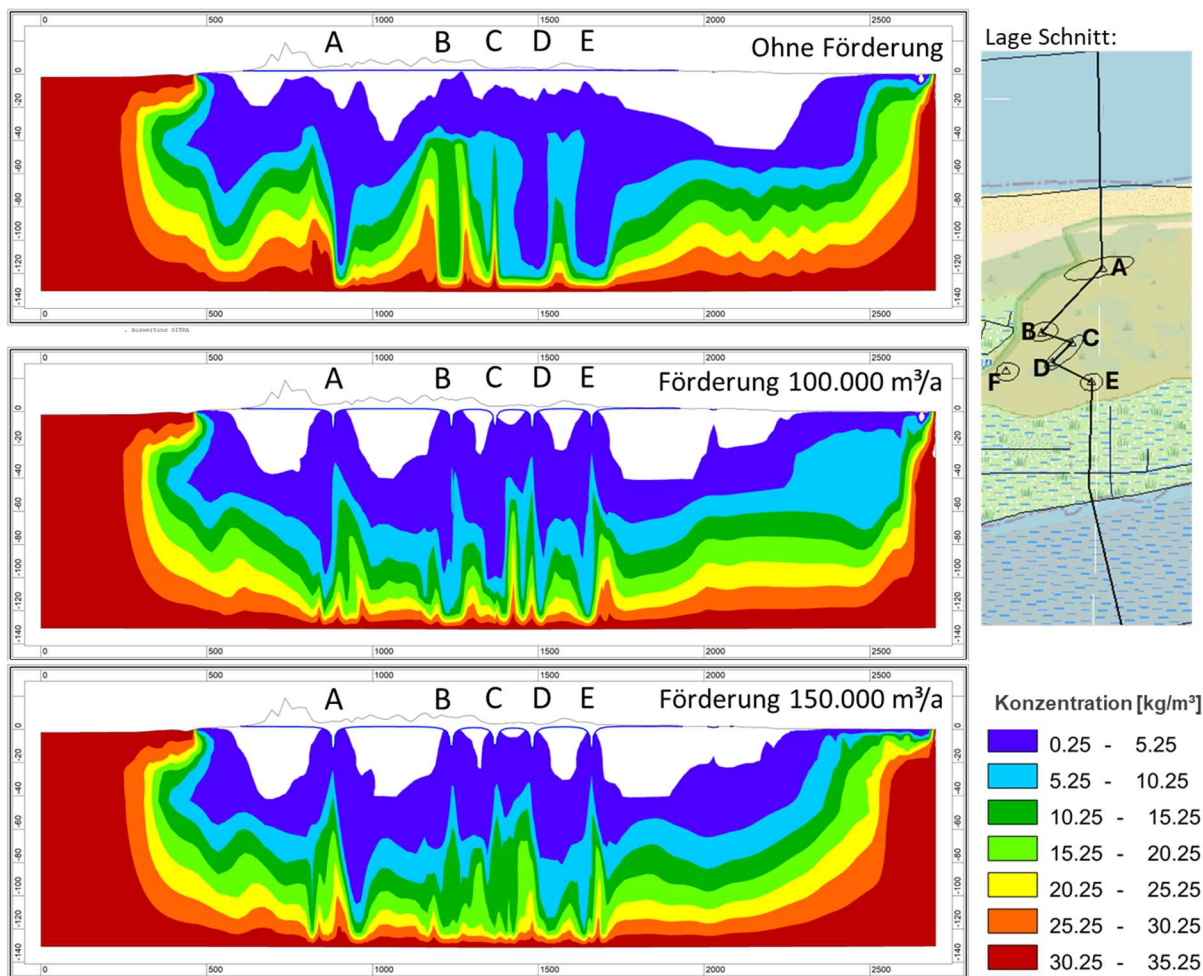
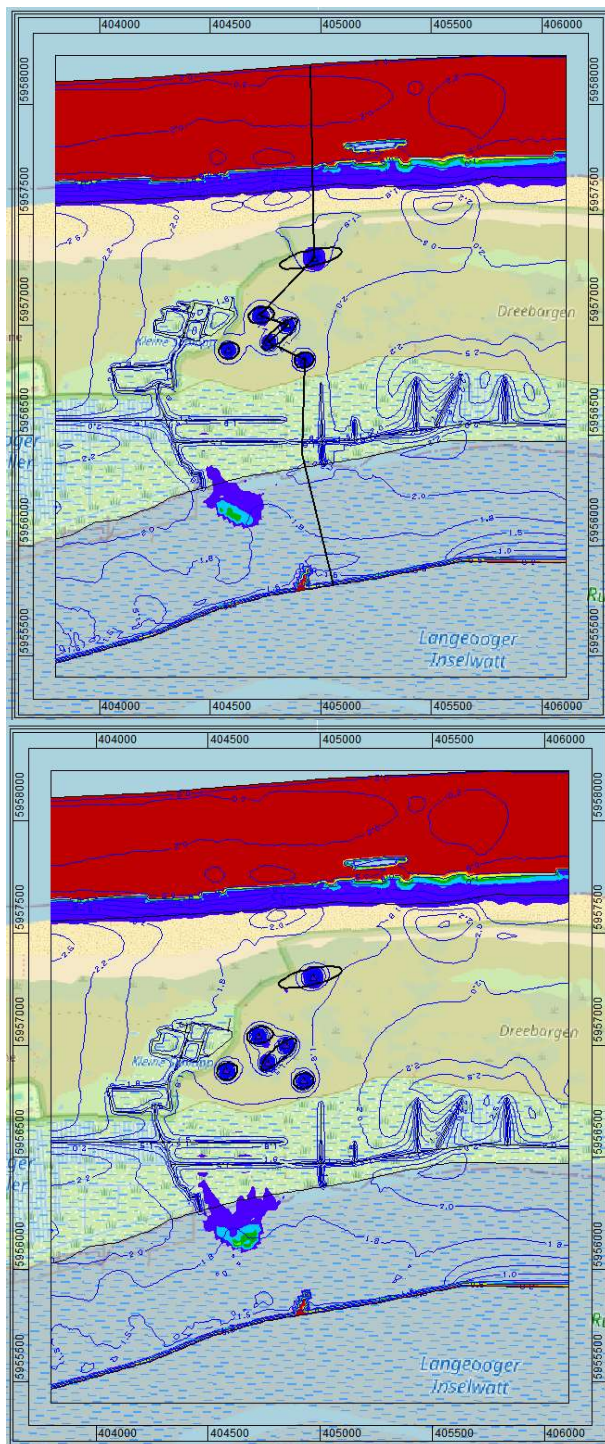
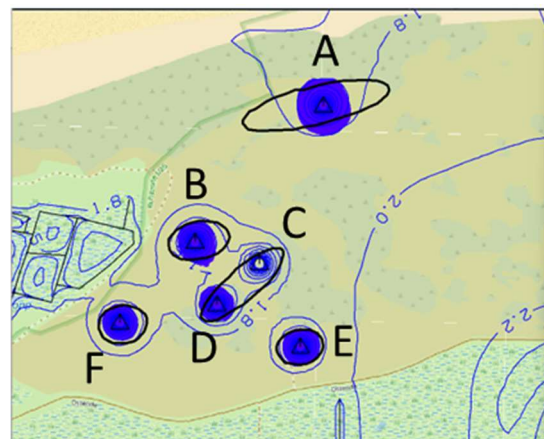


Abbildung 75: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Vergleich der Konzentrationen im Vertikalschnitt A-E für die Zustände (i) ohne Förderung, (ii) Gesamtförderung 100.000 m³/a, (iii) Gesamtförderung 150.000 m³/a

Abbildung 76 enthält die Grundwasseroberfläche und die Konzentration an der freien Oberfläche im Vergleich für beide Förderraten. Erreicht eine Konzentration oberhalb von 0,25 g/l den Brunnen, färbt er sich blau und ist versalzen. Bei der geringeren Gesamtförderleistung von 100.000 m³/a im oberen Bild wären die Brunnen A, B, D, E und F versalzen. Nur der Brunnen C bleibt süß trotz Upconing. Bei der erhöhten Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a sind alle Brunnen versalzen.



Detail:



Detail:

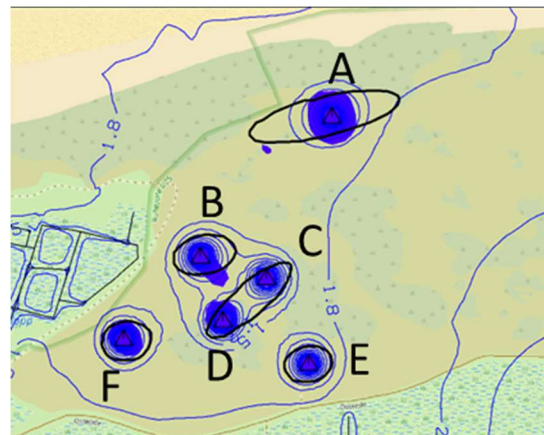


Abbildung 76: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Grundwasseroberfläche und Konzentrationen > 0,25 g/l an der freien Oberfläche bei einer Gesamtfördermenge von 100.000 m³/a (oben) bzw. 150.000 m³/a (unten)

Es wurde eine Vergleichsrechnung ohne Dichteabhängigkeit durchgeführt. Abbildung 77 zeigt im gleichen Vertikalschnitt wie in Abbildung 75 das Strömungsfeld zusammen mit der Konzentration für die Rechnung mit und ohne Dichteabhängigkeit. Bei der Rechnung ohne Dichteabhängigkeit wird der Prozess des Upconings hinsichtlich der Lage der Süß-Salzwassergrenze unterschätzt, da die Dichteströmung nicht berücksichtigt wird. Bei der Rechnung mit Dichteabhängigkeit wird die Süß-Salzwassergrenze an den Brunnen weiter nach oben gezogen.

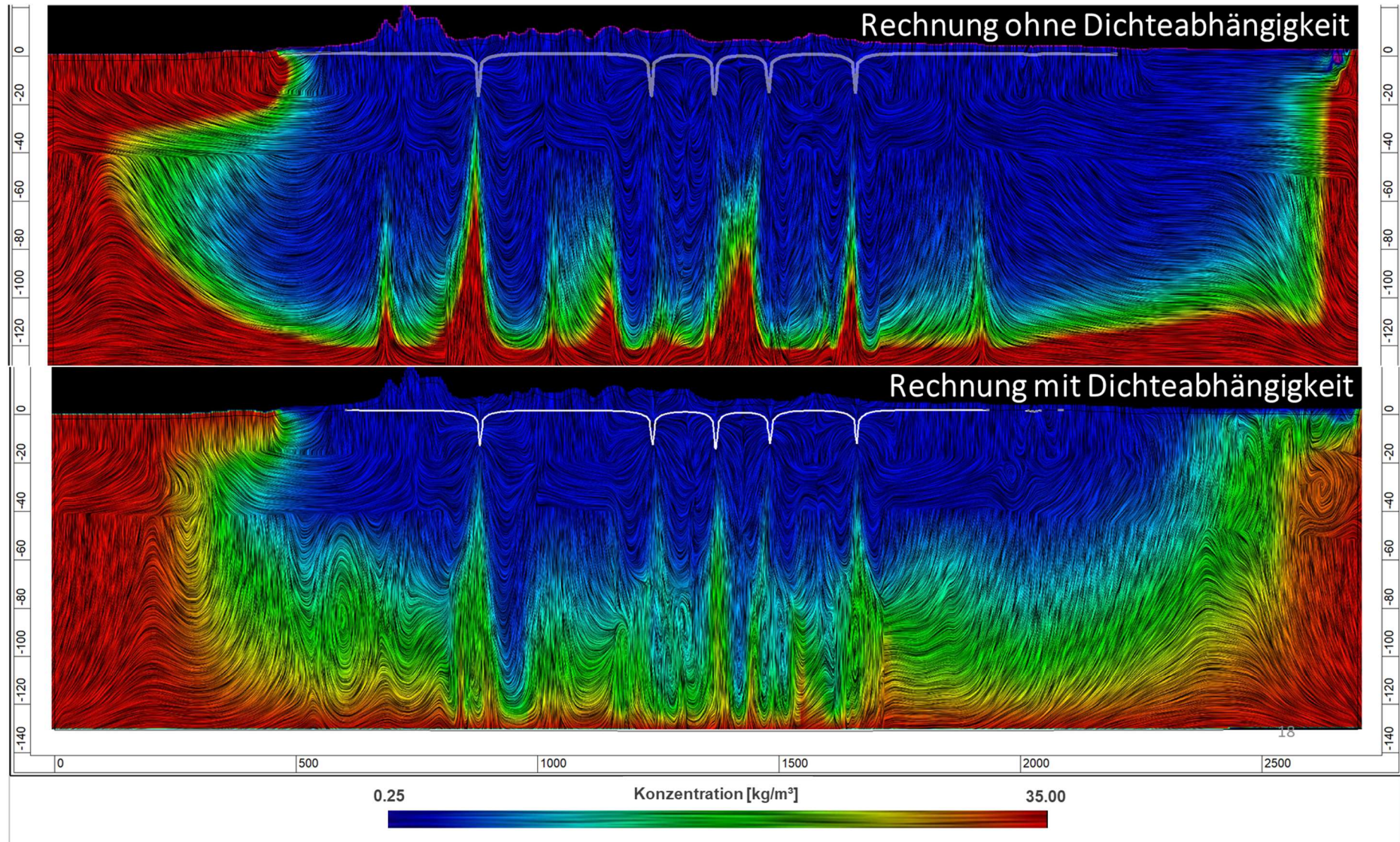


Abbildung 77: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Strömungsfeld und Konzentrationen, Vergleich zwischen Rechnung ohne und mit Dichteabhängigkeit

Abbildung 78 zeigt zusätzlich zur Grundwasseroberfläche die Flurabstände. Im Einflussbereich der Förderung würden sich Flurabstände von 3,5 m und mehr ausbilden.

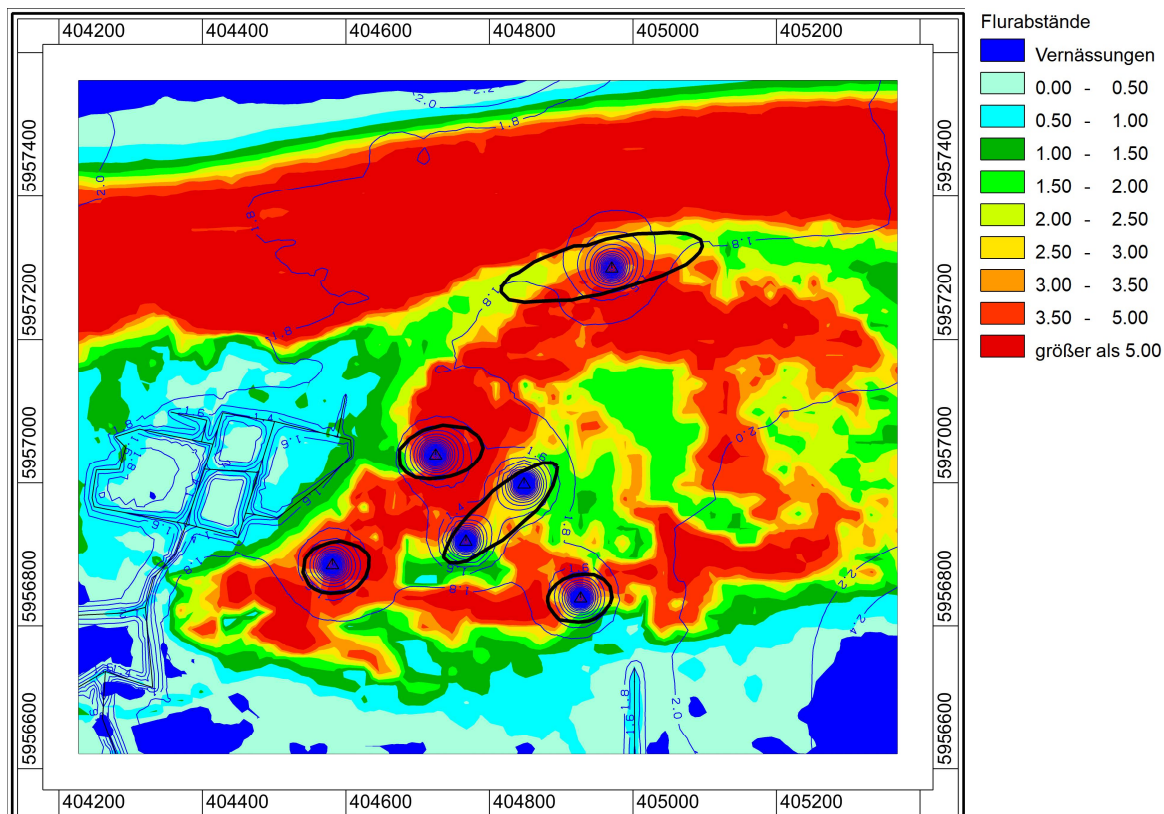
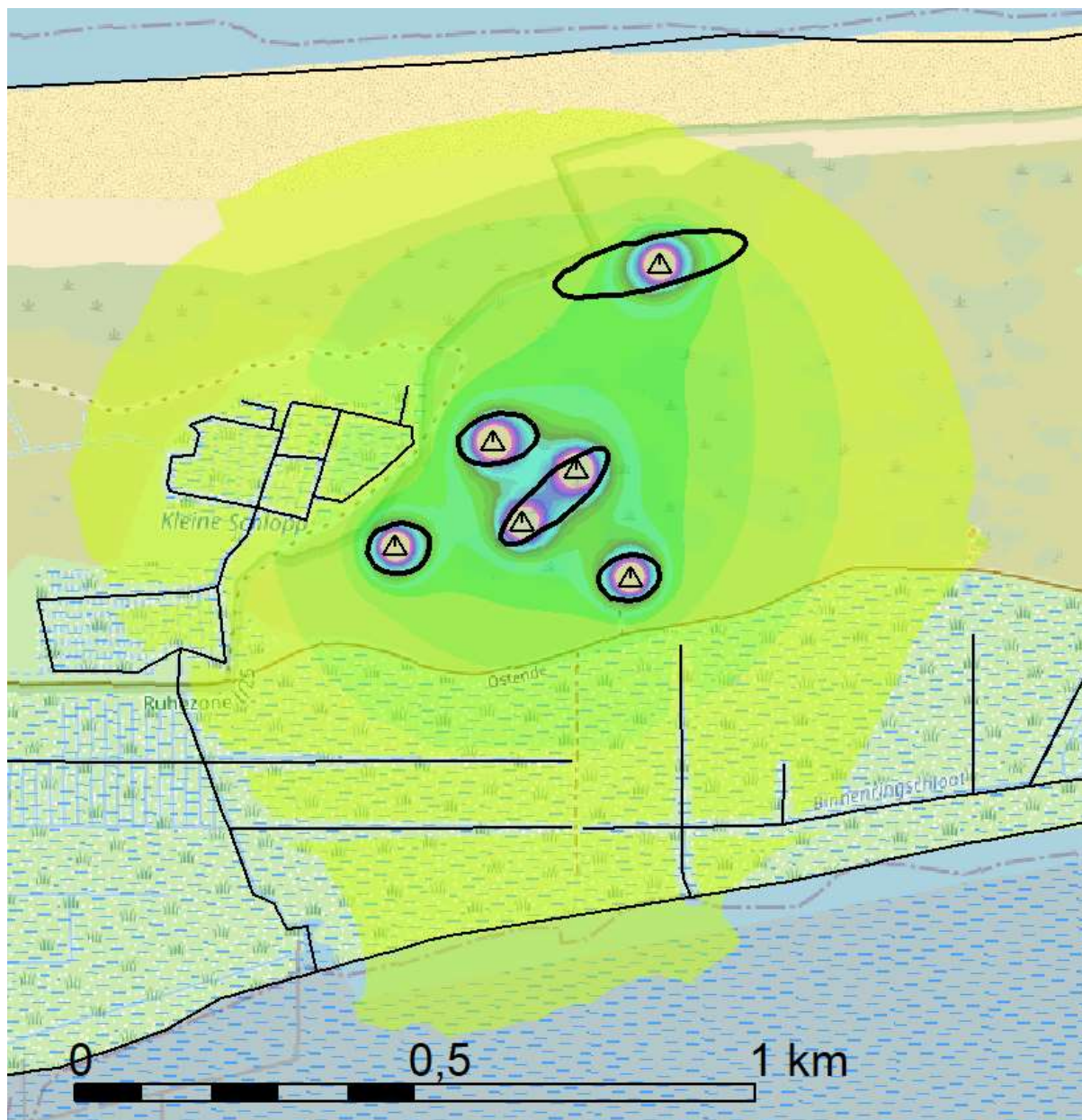


Abbildung 78: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Grundwasseroberfläche und Flurabstände

Die Absenkung der Grundwasseroberfläche im Nahbereich der Brunnen ist in Abbildung 79 in Form von Differenzen zum Nullzustand dargestellt. In ca. 500 m Entfernung von den Brunnen beträgt die Differenz nur noch 0,20 m. Der Einflussbereich bis zu einer Differenz von 0,20 m ist farblich abgesetzt. Er ist nach Süden breiter als nach Norden.



Differenz [m]

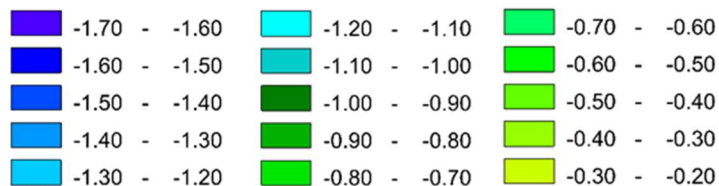


Abbildung 79: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Differenz der Grundwasser-
seroberfläche zum Nullzustand

Um die Einzugsgebiete der Brunnen zu visualisieren, wurden unter Ansatz einer Gesamtförderung von 150.000 m³/a Bahnlinien berechnet. Sie sind in Abbildung 80 in ihrer räumlichen Lage zu den geplanten Kabeltrassen und in Abbildung 81 als vergrößerter Ausschnitt dargestellt.

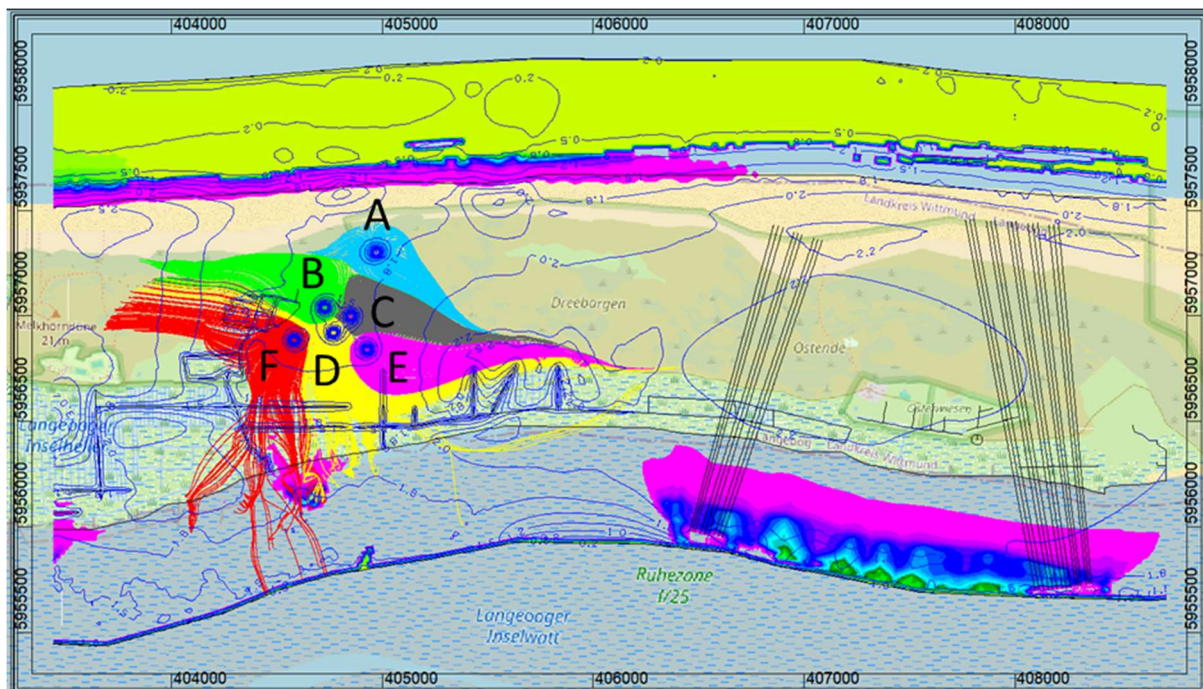


Abbildung 80: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Bahnlinien (für jeden Brunnen jeweils farblich abgesetzt), Grundwasseroberfläche, Konzentrationen an der freien Oberfläche, Lage der Kabeltrassen

Anhand der für die einzelnen Brunnen A-E farblich abgesetzten Bahnlinien können die jeweiligen Einzugsgebiete abgegrenzt werden. Der Brunnen A (hellblaue Bahnlinien) fördert Grundwasser aus östlicher Richtung. Der Brunnen B (grüne Bahnlinien) fördert aus westlicher Richtung. Die Einzugsgebiete der Brunnen C (graue Bahnlinien) und E (pinkfarbene Bahnlinien) fördern aus östlicher Richtung mit langen schmalen Einzugsgebieten. Der Brunnen F (rote Bahnlinien) fördert aus westlicher und südlicher Richtung. Der Brunnen D (gelbe Bahnlinien) fördert überwiegend aus südlicher und vereinzelt aus östlicher Richtung.

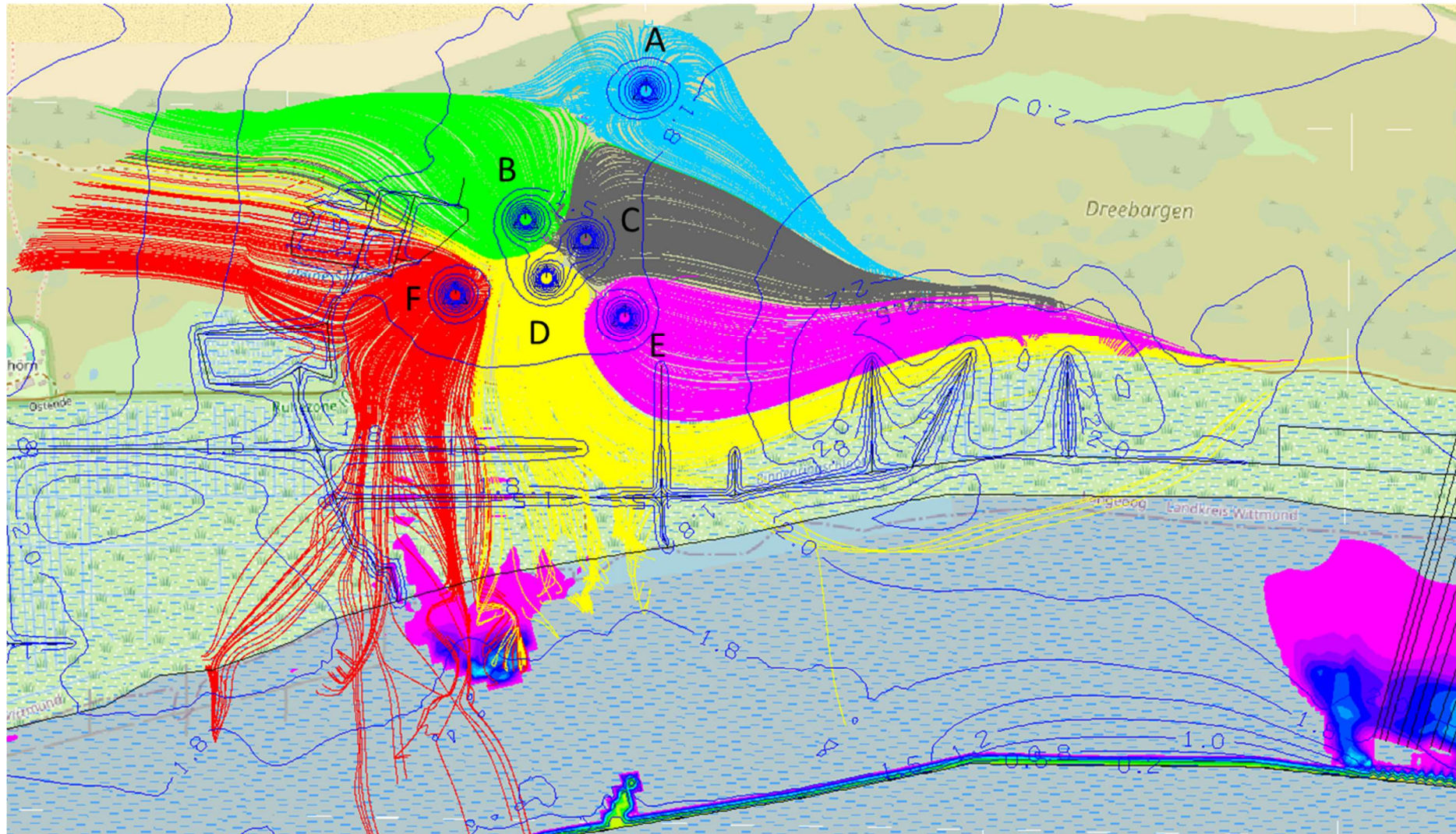


Abbildung 81: Brunnenfeld im Osten: Vertikalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Bahnlinien (für jeden Brunnen jeweils farblich abgesetzt), Grundwasseroberfläche, Konzentrationen an der freien Oberfläche

8.2.3 Horizontalbrunnen

Die Varianten mit Horizontalbrunnen wurden in Hinblick auf die vom OOWV übermittelten Angaben zur angestrebten Gesamtförderleistung von 150.000 m³/a entwickelt. Die Brunnen liegen in der Nähe der ausgewiesenen Gebiete und sind als Horizontalbrunnen angelegt, um trotz der hohen Entnahmeraten ein Upconing zu vermeiden (Abbildung 82). Es gibt 6 Brunnen und jeder Brunnen fördert 16.667 m³/a bei einer Gesamtförderung von 100.000 m³/a bzw. 25.000 m³/a bei einer Gesamtförderung von 150.000 m³/a.

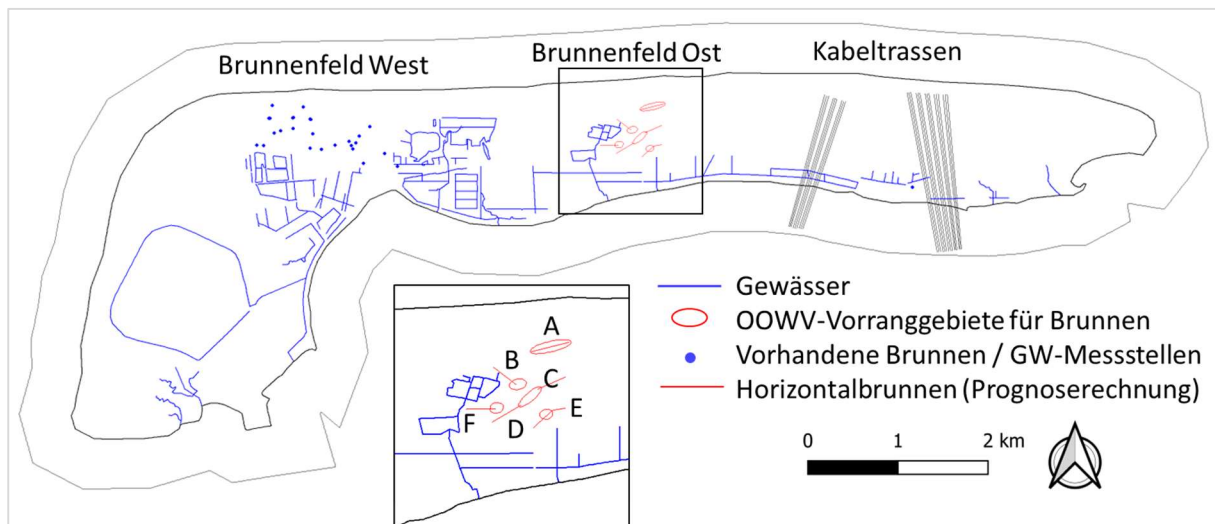


Abbildung 82: Brunnenfeld im Osten: Lage der Horizontalbrunnen für die Prognoserechnung

Abbildung 83 zeigt die prognostizierten Auswirkungen auf die Süßwasserlinse und Upconing-Effekte in einem Vertikalschnitt im Vergleich für die verschiedenen Förderraten. Für die Visualisierung des Upconing-Effekts wird die Minimalkonzentration für Süßwasser von 0,25 kg/m³ bzw. g/l verwendet. Die Süßwasserlinse entspricht dem Bereich, in dem die Salzkonzentration unterhalb von 0,25 g/l liegt. Dieser Bereich bleibt weiß. In der ersten Abbildung ohne Förderung verläuft die freie Oberfläche horizontal. Die Mächtigkeit der Süßwasserlinse schwankt stark zwischen ca. 40 m bis hin zu sehr geringen Mächtigkeiten zwischen B und C. In den Abbildungen mit Förderung sind die Absenkungstrichter nicht so deutlich ausgeprägt wie bei Vertikalbrunnen. Mit Förderung tritt an den mit A-E markierten Brunnen jeweils Upconing auf, erkennbar daran, dass die Grenze 0,25 g/l nach oben verschoben ist. Das Upconing ist nicht so stark wie bei den Vertikalbrunnen. Für eine Gesamtförderung von 100.000 m³/a erreicht die 0,25 g/l-Grenze nicht die Brunnen. Eine Trinkwassergewinnung mit Horizontalbrunnen in dieser Konfiguration wäre möglich. Für eine Gesamtförderung von 150.000 m³/a erreicht die 0,25 g/l-Grenze bereits die Brunnen und das geförderte Wasser wäre versalzen. Eine Trinkwassergewinnung mit Horizontalbrunnen in dieser Konfiguration mit einer Gesamtförderung von 150.000 m³/a wäre daher nicht möglich.

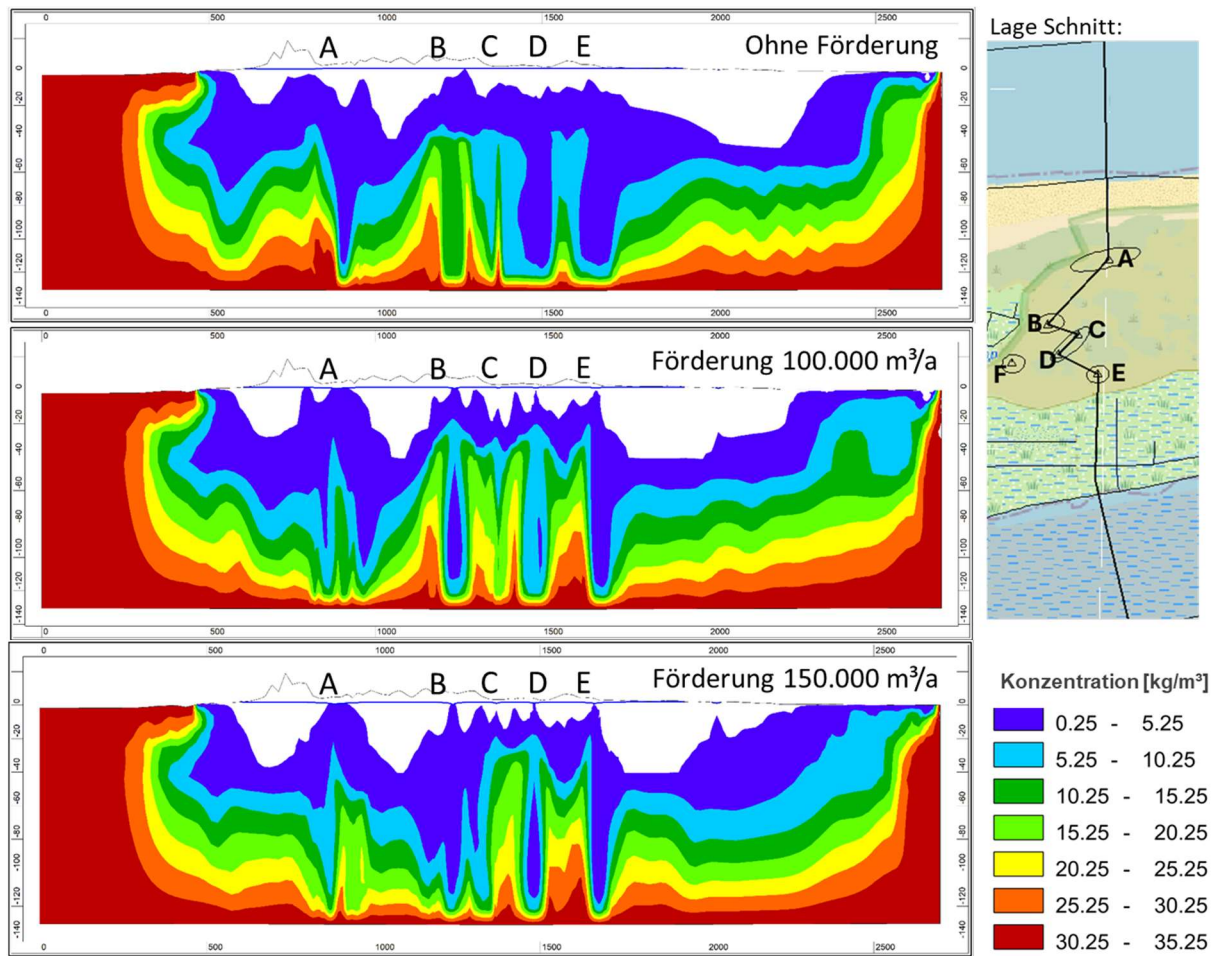


Abbildung 83: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Vergleich der Konzentrationen im Vertikalschnitt A-E für die Zustände (i) ohne Förderung, (ii) Gesamtförderung 100.000 m³/a, (iii) Gesamtförderung 150.000 m³/a

Abbildung 84 zeigt zusätzlich zur Grundwasseroberfläche die Flurabstände. Im Einflussbereich der Förderung würden sich Flurabstände von mehr als 4 m ausbilden. Sie sind damit etwas geringer im Vergleich zu den prognostizierten Flurabständen bei Vertikalbrunnen.

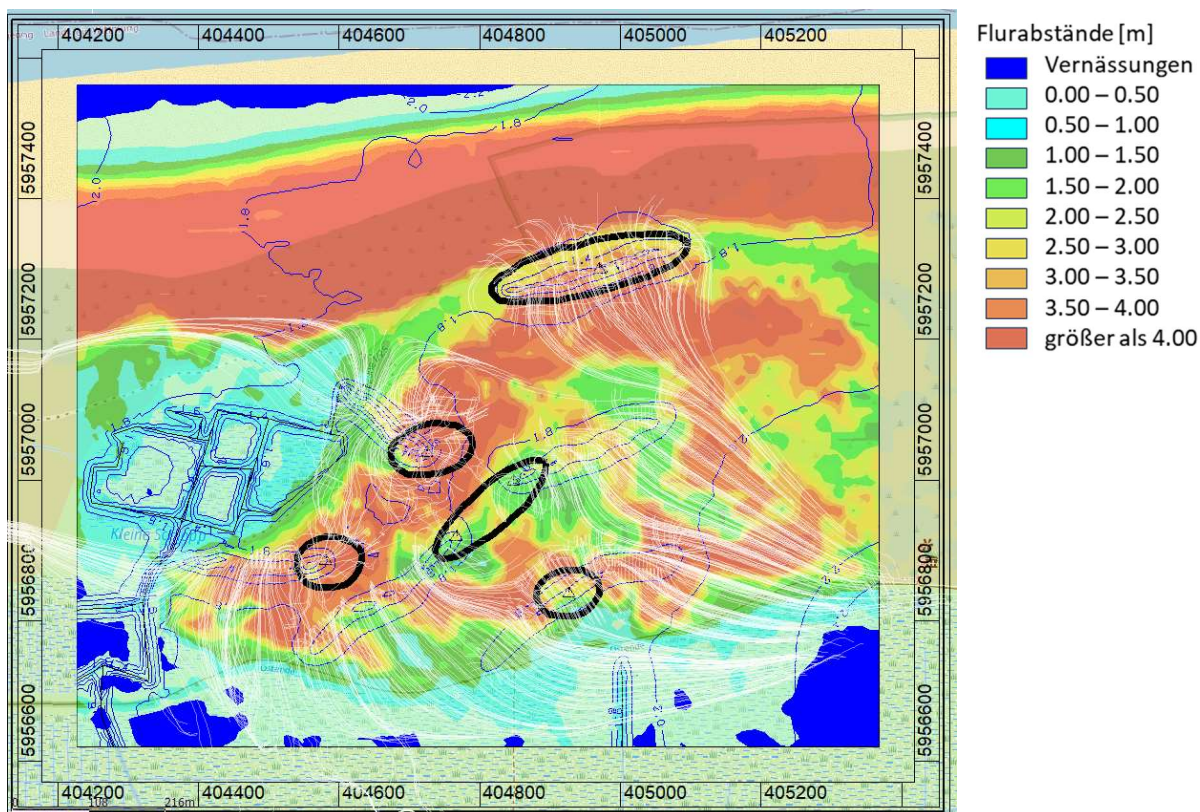
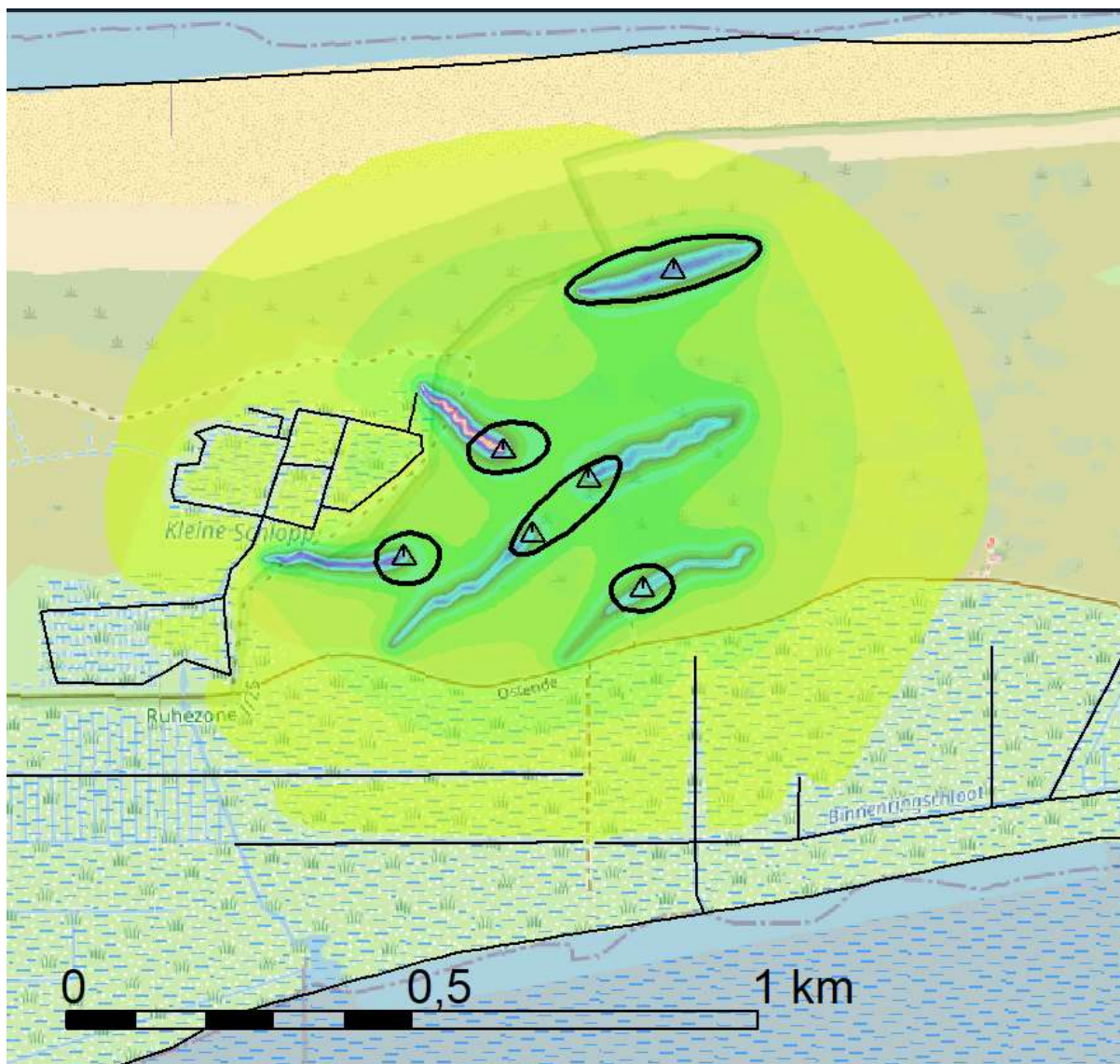


Abbildung 84: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Grundwasseroberfläche und Flurabstände

Die Absenkung der Grundwasseroberfläche im Nahbereich der Brunnen ist in Abbildung 85 in Form von Differenzen zum Nullzustand dargestellt. In ca. 300 m Entfernung von den Brunnen geht die Differenz gegen 0. Der Einflussbereich ist farblich abgesetzt und kleiner als bei den Vertikalbrunnen. Der Einfluss der Absenkung ist gleichmäßig in alle Richtungen.



Differenz [m]

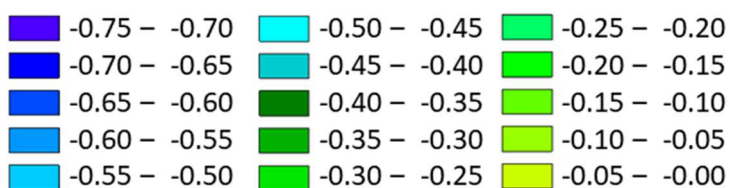


Abbildung 85: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Differenz der Grundwasser Oberfläche zum Nullzustand

Um die Einzugsgebiete der Brunnen zu visualisieren, wurden unter Ansatz einer Gesamtförderung von 150.000 m³/a Bahnlinien berechnet. Sie sind in Abbildung 86 in ihrer räumlichen Lage zu den geplanten Kabeltrassen des westlichen Trassenkorridors dargestellt.

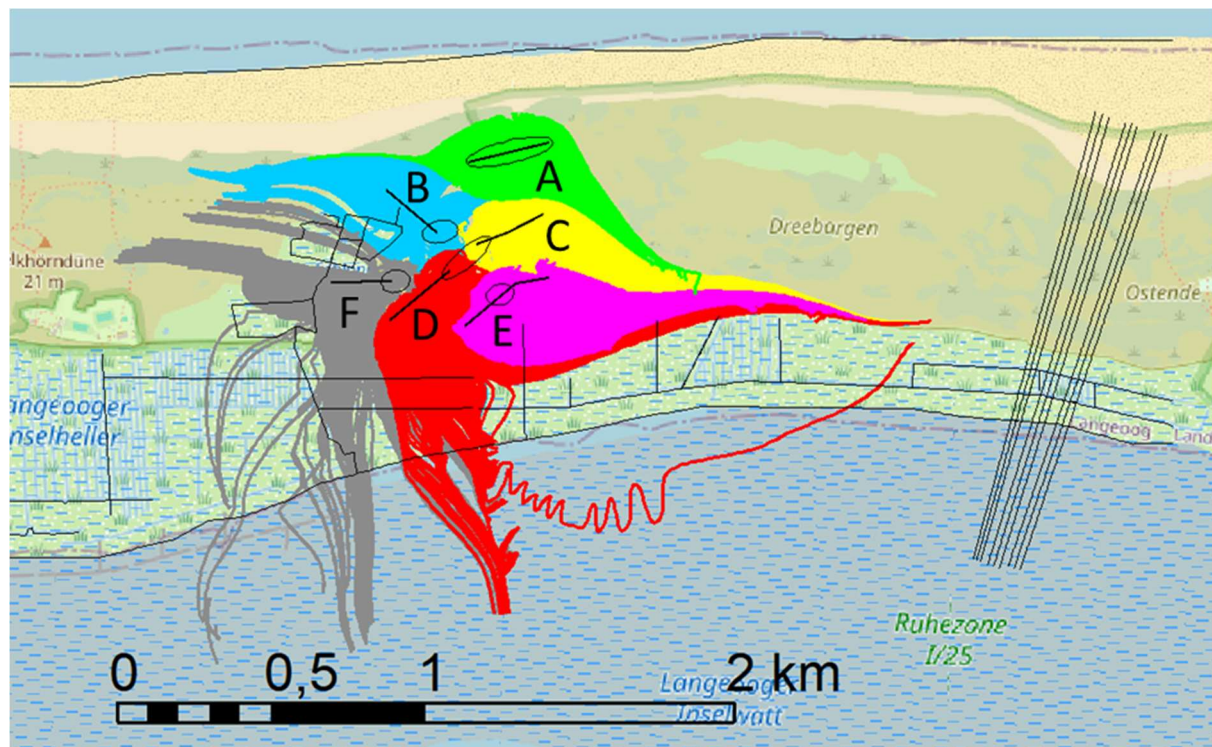


Abbildung 86: Brunnenfeld im Osten: Horizontalbrunnen, Gesamtförderung 150.000 m³/a, Bahnlinien (für jeden Brunnen jeweils farblich abgesetzt)

Anhand der für die einzelnen Brunnen A-E farblich abgesetzten Bahnlinien können die jeweiligen Einzugsgebiete abgegrenzt werden. Der Brunnen A (grüne Bahnlinien) fördert Grundwasser aus östlicher Richtung. Der Brunnen B (hellblaue Bahnlinien) fördert aus westlicher Richtung. Die Brunnen C (gelbe Bahnlinien) und E (pinkfarbene Bahnlinien) fördern aus östlicher Richtung mit langen schmalen Einzugsgebieten. Der Brunnen F (graue Bahnlinien) fördert aus westlicher und südlicher Richtung. Der Brunnen D (rote Bahnlinien) fördert überwiegend aus südlicher und vereinzelt aus östlicher Richtung. Die Einzugsgebiete der Horizontalbrunnen reichen nicht so dicht an den westlichen Trassenkorridor heran wie die der Vertikalbrunnen.

9 Zusammenfassung und Bewertung der Berechnungsergebnisse

Die in Kap. 8.1 vorgestellten Modellergebnisse zur Wärmeausbreitung lassen für das Worst-Case-Szenario (gleichzeitiger Betrieb der acht ONAS unter Volllast, vgl. Kap. 4.10.3) eine prognostizierte Temperaturerhöhung des Grundwassers in den betrachteten Trassenkorridoren C6a und C6b in horizontaler und vertikaler Richtung erwarten, die im Bereich bis 10 K liegt. Dabei ist die maximale Temperaturerhöhung von bis zu 10 K auf den direkten Nahbereich der Polkabel begrenzt und zeigt sich vor allem an den Polkabeln in der Mitte des breiteren östlichen Korridors C6b in Tiefenlagen, in denen die maximale Überdeckungstiefe erreicht wird. In geringeren Überdeckungstiefen sowie an den Rändern der Trassenkorridore ist die Erwärmung durch Kühlungseffekte deutlich reduziert. Ausgehend von dem äußersten Kabel ist der betriebsbedingte Einfluss der ONAS auf die Süßwasserlinse in horizontaler Richtung bis zu einer Entfernung von maximal 140 m nachweisbar, danach liegt die prognostizierte Temperaturänderung unter 0,5 K. In vertikaler Richtung zeigt sich der Einfluss der ONAS durch geringe Temperaturänderungen bis in eine Tiefe von maximal 85 m unterhalb der Kabel und 30 m oberhalb der Kabel. Außerhalb dieser Bereiche liegt die prognostizierte Temperaturänderung ebenfalls unterhalb von 0,5 K.

Neben der Temperaturänderung zeigen die Prognoserechnungen, dass es im Bereich der Kabeltrassen zu thermisch bedingten, geringfügigen Dichteänderungen kommen kann. Dabei ist die Abnahme der Dichte mit maximal $3,8 \text{ kg/m}^3$ im Nahbereich der Polkabel am höchsten; mit zunehmendem Abstand zum Polkabel verringert sich diese Wirkung deutlich. Am Rand des temperaturbeeinflussten Bereichs geht die Änderung der Dichte gegen 0, sodass der Einfluss der ONAS insgesamt auch hier auf den Nahbereich der Trassenkorridore begrenzt bleibt und wärmeinduzierte, negative Auswirkungen auf die Dimension der Süßwasserlinse somit nicht zu erwarten sind.

Aus den vorliegenden Modellergebnissen zur Wärmeausbreitung für den Betriebszustand der acht ONAS ist abzuleiten, dass der Einfluss der ONAS gegenüber dem Einfluss der zukünftigen Brunnen auf die Strömungsverhältnisse und die Stabilität der Süß-Salzwassergrenze vernachlässigbar ist. Es sind keine signifikanten Veränderungen in der Beschaffenheit der Süßwasserlinse zu erwarten, da die Wärmeausbreitung durch den Betrieb der ONAS auf den Nahbereich der Kabeltrassen, die innerhalb der Trassenkorridore C6a und C6b geplant werden, beschränkt bleibt. Demnach ist nicht von wärmeinduzierten, negativen Auswirkungen auf die Dimension der Süßwasserlinse auszugehen.

Mit Blick auf eine zukünftige Trinkwassergewinnung aus der östlichen Süßwasserlinse wurden unter Nutzung des vorgestellten Modells verschiedene Varianten betrachtet (vgl. Kap. 8.2). Die vorliegenden Modellergebnisse zu einem weiteren Brunnenfeld im östlichen Teil der Insel lassen dabei die Schlussfolgerung zu, dass eine zusätzliche Grundwasserförderung von $150.000 \text{ m}^3/\text{a}$ aus der östlichen Süßwasserlinse möglich ist. Anhand der Betrachtung verschiedener Szenarien wurde verdeutlicht, dass Wechselwirkungen zwischen den ONAS und den Brunnenstandorten nicht bestehen. Sofern eine zukünftige zusätzliche Trinkwassergewinnung außerhalb der von der Erwärmung betroffenen Bereiche erfolgt, sind damit insgesamt Wechselwirkungen zwischen den ONAS und der Trinkwasserversorgung nicht zu erwarten.

Entscheidend für die nachhaltige Trinkwasserversorgung aus der östlichen Süßwasserlinse Langeoogs ist die Wahl geeigneter Brunnenstandorte unter Berücksichtigung der hydrologischen Bedingungen

sowie eine darauf abgestimmte Grundwasserförderungsstrategie. Dabei können wesentliche, planungsrelevante Informationen für die Detailplanung eines möglichen Brunnenfeldes etwa aus den Daten der vorliegenden Hubschrauberelektromagnetik (HEM-Daten: HEM128Langeoog © BGR, Hannover, 2015, [32]) abgeleitet werden. Wie Abbildung 87 zeigt, liegt das hier untersuchte Brunnenfeld Ost in einem Bereich, in dem die Süßwasserlinse schmäler und geringmächtiger ist als in anderen Bereichen. Bei der Planung eines Brunnenfeldes sollten vertikale Strömungskomponenten in diesen Bereichen so weit wie möglich reduziert werden, um Upconing von Salzwasser zu vermeiden. Um dies zu erreichen, können auf Grundlage der Untersuchungen und Prognosen zum vorliegenden Bericht die nachfolgenden Planungskriterien für ein östliches Brunnenfeld abgeleitet werden:

- Planung Brunnenfeld Ost als unvollkommene Brunnen, die möglichst im oberen Bereich des Küstenholozäns bei ca. -1 bis -10 mNHN verfiltert sind,
- Abstand der Brunnen untereinander von mindestens 150 m,
- Verteilung der Gesamtfördermenge auf mindestens 6 Brunnen,
- Räumliche Ausrichtung des Brunnenfeldes möglichst in West-Ost-Ausrichtung und im Nahbereich der Wasserscheide.

Darüber hinaus sollte bei der Auswahl eines nach allen Kriterien optimalen Standorts ein Sicherheitsabstand von 200 m zu den geplanten Kabeltrassen berücksichtigt werden. Bei dieser Entfernung sind auf der sicheren Seite liegend keinerlei Wechselwirkungen mit dem Betrieb der ONAS erkennbar. Sollte im Rahmen der Umplanung der Trinkwasserentnahmen auf Langeoog die Notwendigkeit zur Unterschreitung dieses Schutzabstandes resultieren, könnten ergänzende instationäre Berechnungen zum Wärmetransport durchgeführt werden. Schon die mit der stationären Berechnung gewonnenen Ergebnisse deuten an, dass eine weitere Reduktion des Schutzabstandes wahrscheinlich ist.

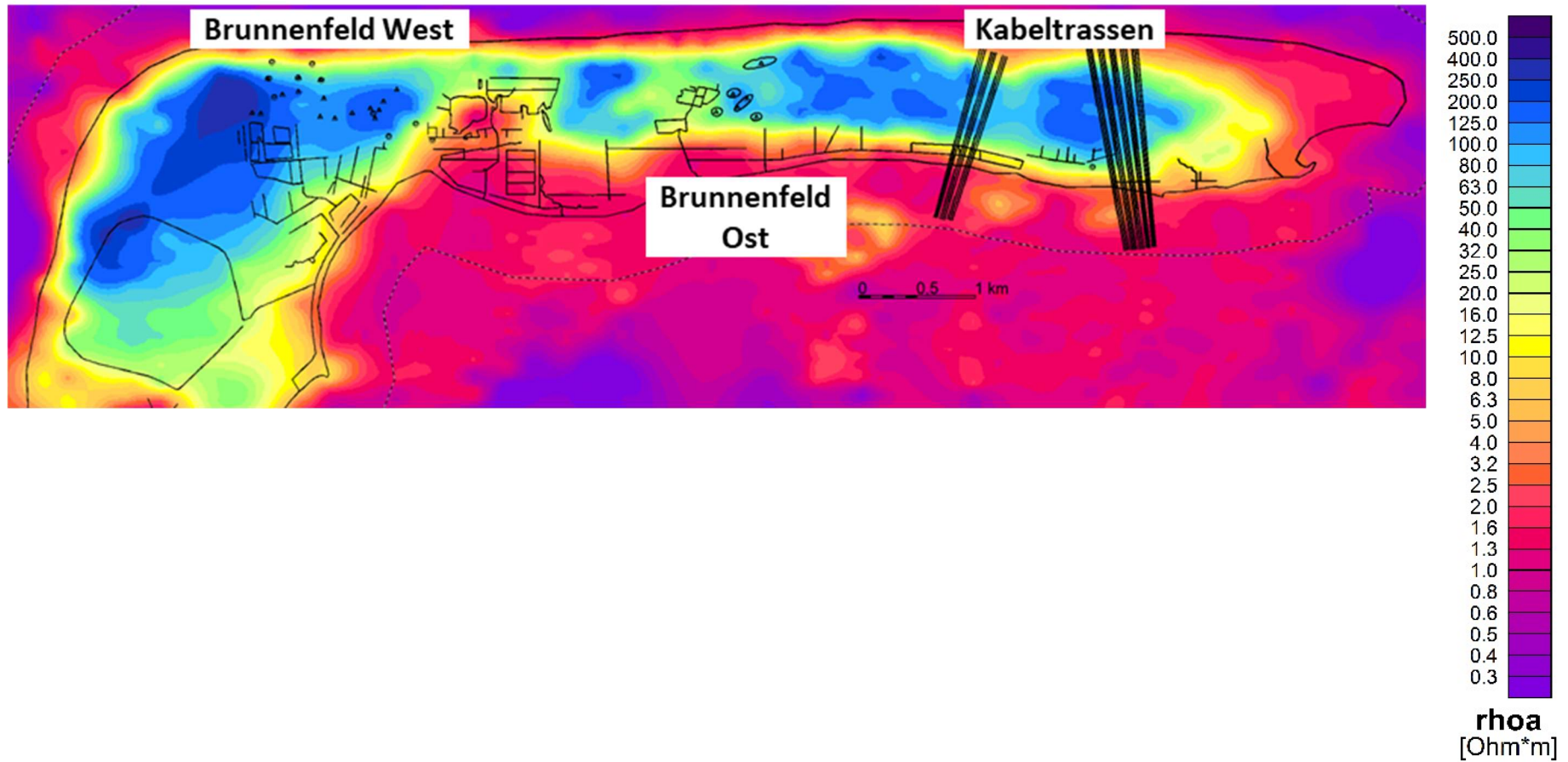


Abbildung 87: Lage der Süßwasserlinse anhand von HEM-Daten mit Markierungen für Brunnenfeld West, untersuchtes Brunnenfeld Ost sowie geplante Kabeltrassen

Zusammenfassend ist aus den vorliegenden Modellergebnissen zur Wärmeausbreitung für den Betriebszustand der acht ONAS abzuleiten, dass der Einfluss der ONAS gegenüber dem Einfluss zukünftiger Förderbrunnen auf die Strömungsverhältnisse und die Stabilität der Süß-Salzwassergrenze vernachlässigbar ist. Eine mögliche, durch den Betrieb der ONAS verursachte Erwärmung des Grundwassers ist auf den Nahbereich der Trassenkorridore C6a und C6b beschränkt, sodass keine signifikanten, großräumigen Veränderungen in der Beschaffenheit oder Dimension der Süßwasserlinse zu erwarten sind. In Hinblick auf eine zukünftige Grundwasserentnahme aus der östlichen Süßwasserlinse und dem gleichzeitigen Betrieb der acht ONAS verdeutlichen die hier vorgestellten Ergebnisse der Grundwasserströmungs-, Dichte- und Wärmemodellierung, dass eine Vereinbarkeit zwischen der zukünftigen Trinkwassergewinnung und dem Betrieb der acht ONAS hergestellt werden kann.

10 Literatur

- [1] König, Ch. M.; Becker, M.; Brömme, K.; Diehl, A.; König, T.; Rosen, B., Rüber, O., Schröder, S.; Seidel, T.; Zimmermann, C.: SPRING Benutzerhandbuch, Ausgabe 6.1. 584 S.; ISBN 978-3-00-073433-5, delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten, 2022.
- [2] Stoeckl, L. (2018): Dokumentation der numerischen Grundwasserströmungs- und Transportmodellierung von Langeoog. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2018
- [3] Seidel, T., König, C., Schäfer, M., Ostermann, I., Biedert, T., Hietel, D.: Intuitive visualization of transient groundwater flow; Computers and Geosciences (2014) pp. 173-179, 2014
- [4] NIEDERSACHSEN WASSER Kooperations- und Dienstleistungsgesellschaft mbH (2020): Geologisches 3D-Untergrundmodell Wasserwerk Langeoog. Bericht. Brake, 2020
- [5] Zepp, H., König, Ch. M., Kranl, J., Becker, M., Werth, B., Rathje, M. (2017): Implizite Berechnung der Grundwasserneubildung (RUBINFLUX) im instationären Grundwasserströmungsmodell SPRING. Eine neue Methodik für regionale, räumlich hochaufgelöste Anwendungen. – Grundwasser 22: 113-126, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00767-017-0354-3>
- [6] DVWK: Einfluss der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt; DVWK Schriften 57; 1983
- [7] Abwassertechnische Vereinigung und Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK): Merkblatt ATV-DVWK-M 504. Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden; Hennef; 2002
- [8] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO): Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56; 2000
- [9] DVWK: Beitrag zur Bestimmung des effektiven Niederschlags für Bemessungshochwasser aus den Gebietskenngrößen; DVWK-Materialien 2/1991
- [10] Forschungszentrum Jülich: Die Grundwasserneubildung in Nordrhein-Westfalen; Schriftenreihe des FZ Jülich; Reihe Umwelt; Band 37; Jülich; 2003
- [11] Williams, J.R.: The EPIC Model. In: Singh, V.P.: Computer Models of Watershed Hydrology. Seite 909-1000. Reihe: Water Resources Publications. – Highlands Ranch; 1995
- [12] Becker, M., Rosemann, H.J.: Regionalisierung von Hochwasserabflüssen für kleine Einzugsgebiete in Bayern. Ein Beitrag zur Bereitstellung hydrologischer Planungsgrundlagen. Hydraulik und Gewässerkunde 61. TU München, Institut für Wasserwesen, München (1995)
- [13] Disse, Markus: Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen Einzugsgebieten; Dissertation Universität Karlsruhe; 1995
- [14] Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): BAGLUVA - Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses; Koblenz; 2003

- [15] Ross, C.W., L. Prihodko, J.Y. Anchang, S.S. Kumar, W. Ji, and N.P. Hanan: Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA; 2018
- [16] United States Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS): National Engineering Handbook, Part 4 – Hydrology; Hydrologic Soil Groups; 2009
- [17] US Soil Conservation Service (SCS): National engineering handbook (Chapt. 4: Hydrology, 2nd reprint), US Dept. Agriculture, Washington, 1972.
- [18] AG Boden: MethodenWiki Bodenkunde, Verknüpfungsregel 1.11 Ermittlung der Kennwerte der Wasserbindung. URL: https://www.methodenwiki-bodenkunde.de/MethodenWiki/AGBoden:Verkn%C3%BCpfungsregel_1.11 (Stand: 27.11.2023)
- [19] Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (Hrsg.): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5. Hrsg. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Auflage, Hannover 2005
- [20] Gelhar L W, Axness C L (1983): Three-dimensional stochastic analysis of macrodispersion in aquifers. *Water Resources Res*, 19 (1), 161-180
- [21] Frind, E.O.; Burnett, R. D. (1987): Simulation of contaminant transport in three dimensions, 2. Dimensionality effects. *Water Resour. Res.*, 23(4), pp. 695-705
- [22] Forkel, C. (2004): Numerische Modelle für die Wasserbaupraxis: Grundlagen, Anwendungen, Qualitätsaspekte. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen (Nr. 130). Aachen: Shaker – ISBN 3-8322-3082-3
- [23] White, I. and Falkland, T. (2010): Management of Freshwater Lenses on Small Pacific Islands. *Hydrogeology Journal*, 18, 227-246. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-009-0525-0>
- [24] DVGW (2016): Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, Technische Regel – Arbeitsblatt DVGW W 107 (A)
- [25] Eckl, H. & Raissi, F. (2009): Leitfaden für hydrogeologische und bodenkundliche Fachgutachten bei Wasserrechtsverfahren in Niedersachsen. – *GeoBerichte* 15: 99 S., 39 Abb., 10 Tab., Anh.; Hannover (LBEG)
- [26] Trüby, P. (2018): Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen, Gutachten, Freiburg
- [27] Oude Essink, Gualbert. (2001). Density dependent groundwater flow: salt water intrusion.
- [28] Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH (2021): Seetrassen 2030 – Möglicher Einfluss von Horizontalbohrungen auf Süßwasserlinsen unter Langeoog und Baltrum – Risiko- und Gefährdungsanalyse, Gutachten, Kiel
- [29] Prof. Burmeier Ingenieurgesellschaft mbH (2021): Ergänzende Stellungnahme zum Gutachten „Seetrassen 2030 – Möglicher Einfluss von Horizontalbohrungen auf Süßwasserlinsen unter Langeoog und Baltrum – Risiko- und Gefährdungsanalyse“, Kiel

- [30] Stoeckl, L., Houben, G.H. (2012): Flow dynamics and age stratification of freshwater lenses: experiments and modeling. *Journal of Hydrology* 458–459 (2012) 9–15
- [31] Houben, G. (2018): Annotated translation of “Die Wasserversorgung einiger Nordseebäder [The water supply of some North Sea spas]” by Alexander Herzberg (1901). *Hydrogeol J* 26, 1789–1799. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1772-8>
- [32] Voß, W., Siemon, B., Bock, M., Ibs-von Seht, M. & Pielawa, J. (2015): Technischer Bericht Hub-schraubergeophysik - Befliegung Langeoog 2008/2009. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 0132536, Hannover.
- [33] OSM Standard (2023): Open Street Map, URL: <https://www.openstreetmap.org> (Stand: 09.02.2023)
- [34] Wikipedia (2023): Schloppsee, URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Schloppsee> (Stand: 09.02.2023)
- [35] Bin im Garten (2010): Luftbild, Flug über Langeoog – von Westen kommend, am Nordstrand entlang, Flughöhe 500 m = 1500 ft, Juli 2010, Lizenz: CC BY-SA 3.0, URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Schloppsee#/media/Datei:Flug_Langeoog_2010_PD_077.JPG (Stand: 09.02.2023)
- [36] Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (2023): Basis-DLM, URL: <https://opengeodata.lgln.niedersachsen.de/#bdlm> (Stand: 09.02.2023)
- [37] Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (2024): Grundwasserneubildung, URL: https://nibis.lbeg.de/DetailseitenKartenserver/SimpleDownload/SimpleDownload.ashx?FileName=Grundwasserneubildung_qrn.zip (Stand: 19.01.2024)
- [38] Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2010): VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 Thermische Nutzung des Untergrunds – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte, Juni 2010
- [39] Tanaka, K. (1978): Self-diffusion Coefficients of Water in Pure Water and in Aqueous Solutions of Several Electrolytes with ^{18}O and ^2H as Tracers, *J. Chem. Soc., Faraday Trans. 1*, 1978, 74, 1879-1881
- [40] European Union's Copernicus Land Monitoring Service information (2018): Imperviousness Density 2018 (raster 10 m), Europe, 3-yearly, DOI (raster 10 m): <https://doi.org/10.2909/3bf542bd-eebd-4d73-b53c-a0243f2ed862>
- [41] delta h Ingenieurgesellschaft mbH (2022): interner Vergleich von Berechnungsverfahren für die Grundwasserneubildung am Beispiel des Teileinzugsgebiets Pegel Meschede, unveröffentlicht