Alexander Strom, Jenny Kröcher, Philipp Wolke, Stephan Hannappel & Christian Fokuhl

Hochaufgelöste Dürremodellierung am Fallbeispiel des Landkreises Cuxhaven im Norddeutschen Tiefland

High-resolution drought modeling in the case study of the Cuxhaven district in the North German Lowlands

Häufigere und intensivere Dürreereignisse unterstreichen vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels die Notwendigkeit von Instrumenten zur Zustandsbeschreibung der Umweltkompartimente Boden und Wasser unter Dürre für die Öffentlichkeit und Praxis. Bestehende Tools bieten Informationen in einer mesoskaligen Auflösung von mehreren Kilometern an, was keine Aussagen auf der Ebene von Flurstücken ermöglicht. Zudem wird auf der Mesoskala kein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser in die effektive Wurzelzone berücksichtigt, was die Aussagefähigkeit zum Bodenfeuchtezustand in den grundwassergeprägten Gebieten Norddeutschlands zusätzlich einschränkt.
In der vorliegenden Arbeit wurde eine Dürremodellierung in räumlich hoher Auflösung von 100 x 100 m² unter Einbeziehung der Grundwasserflurabstände jeweils getrennt für Böden mit und ohne Grundwasseranbindung im Landkreis Cuxhaven durchgeführt. Von der Landkreisfläche weisen 41 % eine Anbindung der effektiven Wurzelzone an das Grundwasser bei mittleren Grundwasserständen auf. Bei niedrigen Grundwasserständen erfolgt eine Grundwasserabkopplung auf 4 % der grundwasserangebundenen Flächen, die meist lokal in Senken oder in den Geestrandbereichen ausgeprägt ist. Auf Böden ohne Grundwasseranbindung wurde eine Modellierung der Bodenfeuchte und des Dürrezustands für den Zeitraum von 1991 bis Juni 2023 im täglichen Intervall durchgeführt. Die Ergebnisse veranschaulichen den Verlauf von Dürren auf Flurstücksebene mit ihren Auswirkungen auf den Bodenfeuchtezustand. Am Beispiel der Dürre im Jahr 2018 konnte herausgearbeitet werden, dass der Dürrezustand bei Torfböden mit hohem Wasserspeichervermögen später einsetzt, aber wesentlich länger andauert (9 bis 10 Monate) als bei sandigen Böden auf der Geest mit geringem Wasserspeichervermögen (4 bis 6 Monate). Auf dieser Grundlage wurden mögliche Gefährdungsparameter mit dem Ziel eines flächendifferenzierten und landnutzungsbezogenen Dürrerisikomanagements abgeleitet. Die maximale Dürredauer und die Abkopplung der Grundwasseroberfläche bei niedrigen Grundwasserständen erweisen sich dabei als geeignete und praxistaugliche Parameter.
Die gewonnenen Erkenntnisse regen die Diskussion über neue Ansätze in der Dürremodellierung an. Dazu gehört die Einbeziehung der Grundwasserflurabstände in bestehende hydrologische Modelle zur Berechnung des Bodenwasserhaushalts und die Etablierung von Gefährdungs- und Risikoparametern in Hinblick auf ein zukünftiges Dürrerisikomanagement auf einer Skala von 100 x 100 m² zur räumlichen Auflösung von Flurstücken.

Schlagwörter: Klimawandel, Klimaanpassung, Dürre, Dürregefährdung, Dürrerisiko, Dürremonitor, Norddeutsches Tiefland, Niedersachsen, Cuxhaven

More frequent and intense drought events underscore the necessity of tools for the public and for practitioners to describe the condition of the environmental compartments soil and water in the context of progressing climate change. Existing tools provide information at a mesoscale resolution of several kilometers, which does not allow for conclusions at the parcel level. In addition, no capillary rise from the groundwater into the effective root zone is taken into account at the mesoscale, further limiting the interpretability of soil moisture conditions in the groundwater-influenced areas of Northern Germany.
In the present study, droughts were modelled separately for soils with and without groundwater connection in a spatially high resolution of 100 x 100 m², incorporating the depth to groundwater in the Cuxhaven district. Within the district area, 41 % exhibit a connection of the effective root zone to the groundwater surface at average groundwater levels. During low groundwater levels, a decoupling from the groundwater surface occurs on 4 % of these areas, predominantly localized in depressions or at the margins of the geest areas. For soils without groundwater connection, modeling of the soil moisture and the drought condition was conducted from 1991 to June 2023 on a daily basis. The results illustrate the course of drought events at the parcel level and their implications on soil moisture conditions. Using the example of the drought in 2018, it was revealed that in peat soils with a high water storage capacity the drought condition sets in later, but lasts longer (9 to 10 months) compared to sandy soils on the geest areas with a low water storage capacity (4 to 6 months). On this basis, possible hazard parameters were derived with the aim of an area- and landuse-specific drought risk management. The maximum drought duration and the decoupling of the groundwater surface from the effective root zone at low groundwater levels have proven to be suitable parameters.
The insights gained stimulate the discussion about new approaches in drought modeling. This includes incorporating the depth to groundwater into existing hydrological models for calculating soil water balance and establishing hazard and risk parameters with regard to future drought risk management at the scale of 100 x 100 m² for the spatial resolution of parcels.

Keywords: climate change, climate adaptation, drought, drought hazard, drought risk, German Drought Monitor, North German Lowlands, Lower Saxony, Cuxhaven

1 Einleitung

Trotz der im langjährigen Durchschnitt hohen sommerlichen und gesamtjährlichen Niederschläge stellen die Folgen des Klimawandels den Landkreis Cuxhaven vor neue Herausforderungen. Für Deutschland werden häufigere und länger andauernde Trocken- und Dürreperioden prognostiziert, welche die Gefahren durch Trockenstress und das Risiko von Ertragsverlusten erhöhen. Bei Erwärmungen um 3 °C im Vergleich zur Periode 1971 bis 2000 sind bereits längere Dürredauern um 20 bis 40 % im Norden Niedersachsens zu erwarten (THOBER et al., 2018). Weitere regionale Studien in Niedersachsen stützen diese Prognosen und deuten ebenfalls auf eine solche Entwicklung hin (MUEBK, 2019; NLWKN, 2019; SCHEIHING, 2019). Die zeitlich außergewöhnlich langen Dürren seit dem Jahr 2018 zeigen bereits erste Anzeichen für eine eintretende Intensivierung von Extremwetter in Nordeuropa während der Sommermonate, die durch den Klimawandel begünstigt wird (MANN et al., 2018; WWA, 2018).

Die Klimawirkungsstudie Niedersachsen prognostiziert eine zunehmende Sommertrockenheit im Flachland (MUEBK, 2019). Die wasserwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels für das niedersächsische Binnenland werden im Rahmen des Projektes KliBiW (Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland) durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) quantitativ erfasst (NLWKN, 2021). Im jährlichen Mittel ist von einer Verringerung der Bodenfeuchte auszugehen, die in naher Zukunft (2021 bis 2050) mit -5 % für den langjährigen Durchschnitt zwar niedrig ausfällt, sich jedoch in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) auf ca. -10 % weiter verringern wird (NLWKN, 2021). Obwohl die Veränderungen der durchschnittlichen Bodenfeuchten zunächst gering erscheinen, sind sowohl eine stetig abnehmende Entwicklung, als auch die räumlich-zeitliche Verteilung mit wahrscheinlich höheren Abnahmen in der Vegetationsperiode besonders problematisch für wasserabhängige Ökosysteme und die Landwirtschaft.

In Hinblick auf die Niedrigwasserverhältnisse sind die Ergebnisse der Klimawirkungsmodelle nicht eindeutig zu interpretieren. Während in naher Zukunft in Teilen Niedersachsens eine Entspannung der Situation erwartet wird, sind in ferner Zukunft auch Anzeichen für eine drastische Verschärfung der Niedrigwassersituationen zu erkennen (NLWKN, 2019).

Die klimatisch bedingte Veränderung der Grundwasserneubildung ist ortsabhängig und saisonal unterschiedlich. In Wintermonaten ist im Allgemeinen eine Zunahme der Grundwasserneubildung zu erwarten, in Sommermonaten hingegen eine Abnahme (MUEBK, 2019). Eine Folge wären womöglich höhere Amplituden im jahreszeitlichen Verlauf der Grundwasserstände, weshalb sich in Sommermonaten die Niedrigwassersituation lokal weiter verschärfen könnte.

Die Entwicklung der Grundwasserstände ist in den Grundwasserberichten des NLWKN ausführlich dokumentiert. Die Dürrejahre 2018 bis 2020 äußerten sich im Grundwasser in vielen Grundwassermessstellen durch historische Tiefststände, die meist im September 2019 erreicht wurden. Im Landkreis Cuxhaven lagen die Abweichungen zu diesem Zeitpunkt bei bis zu einem Meter unter dem Mittelwert (NLWKN, 2020). Bis in das Jahr 2021 lagen die Grundwasserstände im zentralen und östlichen Teil Niedersachsens noch auf einem niedrigen Niveau als Folgeerscheinung der Jahre 2018 und 2019. Besonders sind die Geeststandorte, z. B. Stader Geest, mit sich fortsetzenden Grundwasserdürren und sinkenden Grundwasserständen betroffen (NLWKN, 2022).

Für das Monitoring von Dürre und Niedrigwasser wurden in den vergangenen Jahren Werkzeuge auf unterschiedlichen räumlich-zeitlichen Skalen entwickelt. So bietet die Europäische Kommission im Rahmen des Dienstes Copernicus das European Drought Observatory (EDO) an. Auf der Plattform werden anhand von Bodenmess- und Satellitendaten sowie modellierter Daten u. a. Informationen zu Niederschlag, Bodenfeuchte und dem Zustand der Vegetation anhand entsprechender Indizes bereitgestellt. In einem kombinierten Dürreindikator (CDI – Combined Drought Indicator, CAMMALLERI et al., 2021) werden die Indizes zusammengefasst, um Warnstufen auszuweisen. Die Auflösung liegt zeitlich bei zehn Tagen und räumlich bei 5 x 5 km² (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2023).

Der Dürreatlas des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG, 2023) bündelt relevante Daten zu Trockenheit und Dürre für Deutschland. Er integriert Pegelstände, Fernerkundungsdaten zum Zustand und Wasserstress der Vegetation, Landnutzung, meteorologische Daten und den Dürremonitor des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung (UFZ) zum aktuellen Tag. Der Dürremonitor stellt das pflanzenverfügbare Bodenwasser sowie den Dürrezustand des Ober- und Gesamtbodens täglich in einer Auflösung von 4 x 4 km² dar (MARX et al., 2016; ZINK et al., 2016). Im zugrundeliegenden mesoskaligen Hydrologischen Modell "mHM" (SAMANIEGO et al., 2010; SAMANIEGO et al., 2013) wird der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser in die Bodenzone nicht berücksichtigt. Dies ist für Niederschlags-Abfluss-Modelle aufgrund der Zielorientierung zur Abbildung des gesamten Wasserhaushalts und die dazu notwendige Abstraktion zwar üblich, z. B. im Soil & Water Assessment Tool "SWAT" (ARNOLD et al., 1998; ARNOLD et al., 2012). In grundwassergeprägten Niederungen führt das jedoch zu Einschränkungen der Aussagefähigkeit des Bodenwasserhaushalts (KRÖCHER et al., 2023), da der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser bei Flurabständen von weniger als einem Meter maßgeblichen Einfluss auf die reale Evapotranspiration und damit auf die Wasserversorgung der Vegetation hat (WESSOLEK et al., 2011).

Die bestehenden Werkzeuge wie z. B. das EDO, der Dürreatlas und der Dürremonitor bieten für lokale Akteure aus der Wasserwirtschaft, der Landwirtschaft und dem Naturschutz einen regionalen Überblick zum Zustand der Umweltkompartimente Boden und Wasser im Zusammenhang mit Dürre. Für quantitative Detailaussagen auf Flurstücksebene sind sie jedoch aufgrund der groben Auflösung und der fehlenden Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser wenig aussagekräftig. Das Ziel der vorliegenden Studie ist daher eine GIS-gestützte Dürremodellierung in räumlich hoher Auflösung unter Berücksichtigung der Bodenfeuchten sowie der Grundwasseranbindung des Bodens in der Kulturlandschaft des Landkreises Cuxhaven. Damit wird eine Grundlage für die Ermittlung der Gefahren durch Trockenheit und Dürre sowie für ein effektives Dürrerisikomanagement auf Flurstücksebene geschaffen (STROM et al., in Veröffentlichung; HYDOR, 2023).

2 Untersuchungsgebiet – der Landkreis Cuxhaven

Der Landkreis Cuxhaven zeichnet sich durch seine hohe naturräumliche Vielfalt mit Geest- und Marschlandschaften sowie zahlreichen Hoch- und Niedermoorstandorten aus (LK CUXHAVEN, 2000). Er liegt im Norden Niedersachsens und wird nordwestlich von der Nordsee, im Norden von der Elbemündung und im Südwesten von der Wesermündung begrenzt. Östlich und südlich sind ihm die Landkreise Stade, Rotenburg (Wümme) und Osterholz benachbart. Zusammen mit der Stadt Cuxhaven beträgt seine Fläche 2.057 km².

Charakteristisch für den Landkreis sind die ausgedehnten und zahlreichen Moorgebiete, die vereinzelt noch bestehenden Hochmoore und die sandig-lehmigen Geestflächen. Letztere sind in Abbildung 1 in Gelb- und Brauntönen dargestellt. Die höchste Erhebung stellt der Silberberg auf der Wingst mit 74 m NHN dar. Abseits davon befinden sich ausgedehnte Marschgebiete (Grün- und Blautöne), z. B. die Hadelner Marsch im Norden oder die Wesermarsch im Südwesten. Hydrologisch ist das Gebiet im Süden durch die Geeste, die Lune und die Drepte geprägt, die die Geestflächen im Südosten hin zur Weser entwässern.

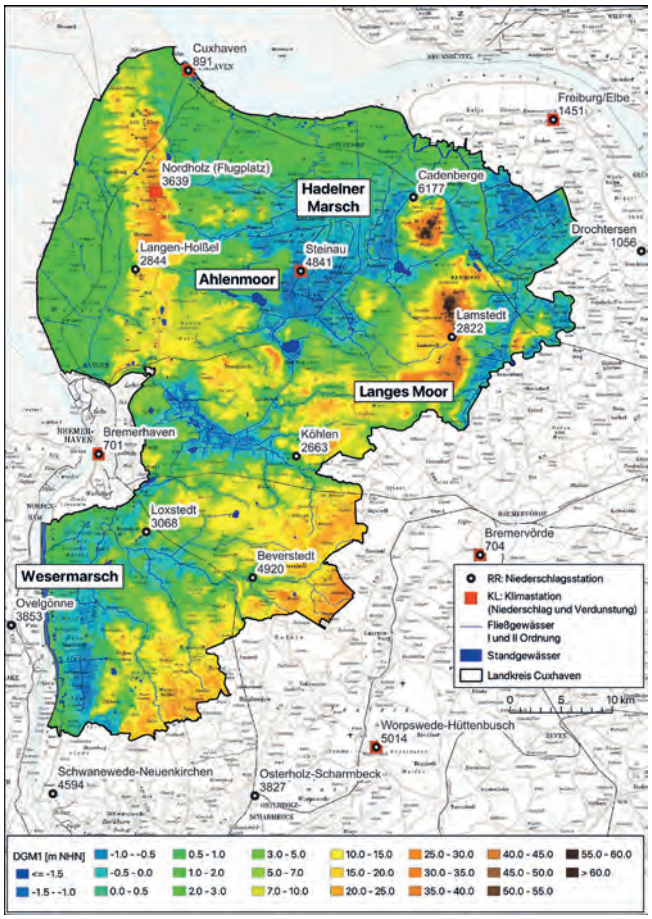

Abbildung 1
Übersicht über den Landkreis Cuxhaven in Niedersachsen mit Topographie, Gewässernetz und verwendeten Wetterstationen für die Dürremodellierung (Datenquellen: LGLN, NLWKN, DWD, BKG).
Overview of the Cuxhaven district in Lower Saxony with topography, stream network and weather stations used for drought modeling (data sources: LGLN, NLWKN, DWD, BKG).

Die tiefliegenden Sietländer der Marschen stellen zusammen mit der Geeste-Niederung mit Geländehöhen von bis zu -2 m NHN die tiefsten Gebiete im Landkreis dar. In den Marschgebieten sind die hydrologischen Verhältnisse durch ein dichtes Entwässerungsnetz mit Schöpfwerksbetrieb gekennzeichnet. Die Entwässerung des Marschlands und der Hoch- und Niedermoore ermöglicht eine landwirtschaftliche Nutzung, die einen Flächenanteil von rund 75 % vereinnahmt, überwiegend geprägt durch Grünlandnutzung. Der Anteil bewaldeter Flächen ist mit etwa 10 % (inkl. Bruch- und Moorwälder) relativ gering. Ein Anteil von 4 % der Landkreisfläche entfällt auf Moorgebiete ohne primäre landwirtschaftliche Nutzung, die bedeutende Habitate für zumeist geschützte Arten darstellen.

Im Zeitraum 1961 bis 1990 lag die durchschnittliche Niederschlagssumme bezogen auf das hydrologische Jahr an der DWD-Station Cuxhaven bei 819 mm/a und stieg im Zeitraum 1991 bis 2020 leicht auf 828 mm/a an (Abb. 2). In den Trockenjahren 2018 und 2019 lagen die jährlichen Niederschläge bei 680 bis 690 mm/a. Insbesondere die Summe der Niederschlagshöhen in den Sommermonaten während dieser Trockenjahre fiel mit rund 200 mm bzw. 400 mm deutlich geringer aus als im Mittel der Jahre 1991 bis 2020 (469 mm). Die Jahresdurchschnittstemperatur zeigt einen stetigen Anstieg mit zu erwartenden höheren Verdunstungsraten.

Geologisch ist das Gebiet eiszeitlich und von holozänen Küstenablagerungen geprägt. Die Geestflächen bestehen oberflächennah meist aus glazifluviatilen Sedimenten mit sandig-kiesigen Schmelzwasserablagerungen aus der Saale-Kaltzeit, die teilweise von Geschiebelehm überlagert werden. Vor allem im Süden des Landkreises häufen sich Flächen mit Geschiebelehm, weshalb dort vermehrt bedeckte Grundwasserleiter zu erwarten sind. Die Grundwasserneubildungsraten liegen nach den Ergebnissen des Modells mGROWA22 ("monatlicher Großräumiger Wasserhaushalt"; LBEG, 2022; ERTL et al., 2019) auf den nördlichen Geestflächen meist bei 400 bis 500 mm/a, während sie im Süden bei 200 bis 400 mm/a liegen. An den Geesträndern erreichen die Neubildungsraten 100 bis 200 mm/a, während die Marschen überwiegend Grundwasserzehrungsgebiete darstellen.

Die Verteilung der Bodenarten und -typen folgt in groben Zügen der naturräumlichen Gliederung in Geest, Marschgebiete und Niederungen. Dies schlägt sich in der Verteilung der nutzbaren Feldkapazität in Abbildung 5 nieder. Auf den Geestflächen überwiegen Podsole aus Lehmsand, zum Teil auch Reinsand. Die nutzbaren Feldkapazitäten des effektiven Wurzelraums (nFK_{We}) liegen laut Bodenkarte 1 : 50.000 (BK 50; LBEG, 2017) im Bereich zwischen 50 bis 140 mm. Im Norden des Landkreises dominieren auf der Hochmarsch im Land Hadeln Sandlehme mit einer nFK_{We} zwischen 140 und 200 mm. Nach Süden zum Sietland hin finden sich Organo- und Kleimarschen mit tonig-schluffigem Charakter. Der Einfluss geringer Grundwasserflurabstände zeigt sich hier besonders an den geringen effektiven Durchwurzelungstiefen von 20 bis 40 cm und nFK_{We}-Werten zwischen 50 und 90 mm. In den Niederungsbereichen liegt die nFK_{We} der Niedermoorböden im Bereich von 140 bis 200 mm, während die Hochmoorböden, z. B. im Ahlenmoor oder im Langen Moor, nFK_{We} von teilweise über 300 mm aufweisen (Abb. 5).

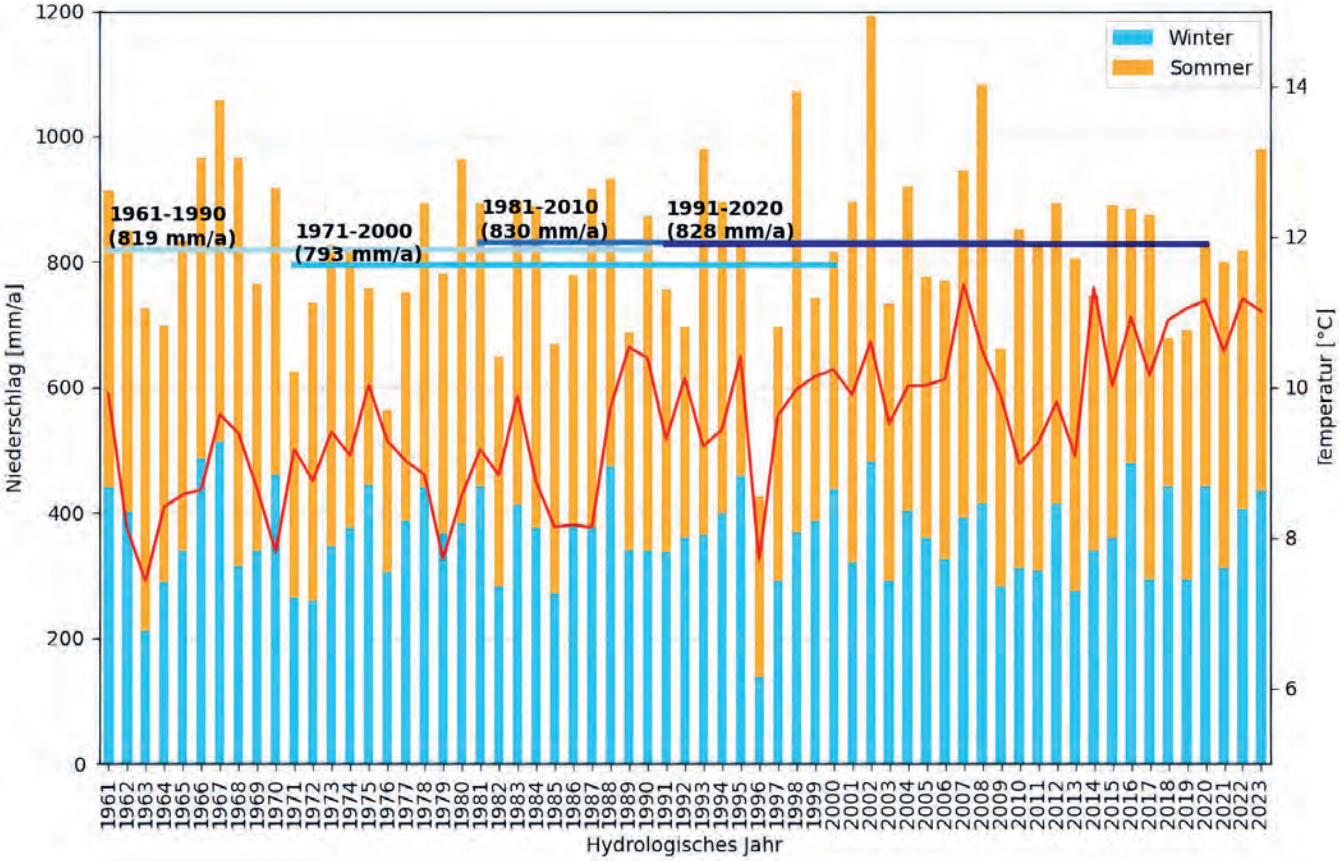

Abbildung 2
Jährliche Niederschlagssummen und Durchschnittstemperaturen für die hydrologischen Jahre von 1961 bis 2022 an der DWD-Wetterstation Cuxhaven.
Annual sum of precipitation and mean temperature for the hydrological years from 1961 to 2022 at the Cuxhaven weather station. (data sources: LGLN, NLWKN, DWD).

3 Methodik

3.1 Überblick und Datengrundlagen

Die Grundlage zur Ermittlung der Dürrevulnerabilität in der Kulturlandschaft ist der Bodenwasserhaushalt, der nicht nur von den meteorologischen Faktoren und bodenphysikalischen Eigenschaften des Bodens abhängt, sondern auch vom Grundwassereinfluss. Böden mit Grundwasseranbindung besitzen neben infiltriertem Niederschlag eine zusätzliche Quelle, die dem Bodenkörper über den kapillaren Aufstieg Wasser zuführen kann. Aus diesem Grund erfolgt die Ermittlung der Dürrevulnerabilität spezifisch jeweils für Böden mit und ohne Grundwassereinfluss in zwei Teilmodellen (Abb. 3).

Die räumliche Trennung des anzuwendenden Teilmodells erfolgte anhand neu erstellter Flurabstandskarten für mittlere und niedrige Grundwasserstände im Landkreis Cuxhaven. Für Böden mit Grundwasseranbindung der effektiven Wurzelzone bei mittleren Grundwasserständen wurde die Veränderung der Anbindung, d. h. die Abkopplung unter niedrigen Grundwasserständen, ermittelt. Für Böden ohne Grundwasseranbindung der effektiven Wurzelzone bei mittleren Grundwasserständen wurde eine Bodenfeuchtemodellierung durchgeführt. In Tabelle 1 sind die verwendeten Datengrundlagen zur Übersicht zusammengestellt.

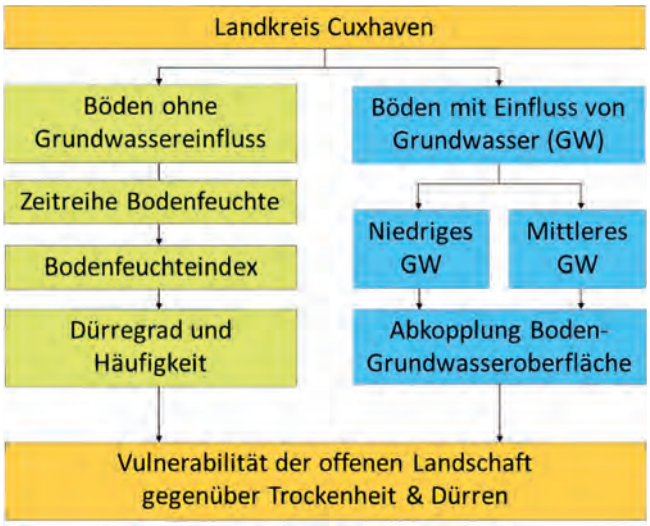

Abbildung 3
Überblick der Vorgehensweise zur Ermittlung der Dürrevulnerabilität.
Overview of the methodology for the assessment of drought vulnerability.

Tabelle 1
Übersicht zur Datengrundlage für die Bodenfeuchtemodellierung und die Erfassung der Grundwasseranbindung des Bodens (DWD: Deutscher Wetterdienst; LGLN: Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen; LBEG: Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie; NLWKN: Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz; WVU: Wasserversorgungsunternehmen; WSA: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt; WBV: Wasser- und Bodenverbände; UHV: Unterhaltungsverbände).
Overview of used data for modeling the soil moisture and assessment of the groundwater connection of the soil.

		Parameter	Datensatz	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Datenquelle
Grundwasseranbindung/-abkopplung	Bodenfeuchtemodell	Niederschlag	Stationsmessdaten	Punktdaten	Täglich	DWD
		Pot. Evapotranspiration	Stationsbezogene Modellierung AMBAV 2.0	Punktdaten	Täglich	DWD
		Landnutzung	ATKIS Basis-DLM	1: 5.000	–	LGLN
		Nutzbare Feldkpapzität	Bodenkarte BK 50	1 : 50.000	–	LBEG
		Effektive Durchwurzelungstiefe	Bodenkarte BK 50	1 : 50.000	–	LBEG
		Bodenart, Torfart, Zersetzungsstufe, Substanzvolumen	Bodenkarte BK 50	1 : 50.000	–	LBEG
		Oberflächennahe Lithologie	Geologische Karte GK 50	1 : 50.000	–	LBEG
		Grundwasserstände	Grundwassermessstellen	Punktdaten	Täglich bis monatlich	NLWKN, WVU
		Wasserstände oberirdische Gewässer	Pegeldaten	Punktdaten	Täglich	NLWKN, WSA, WBV, UHV
		Geländehöhe	Digitales Geländemodell	1 m	–	LGLN

3.2 Erstellung detaillierter Flurabstandskarten

Die Regionalisierung der Grundwasserdruckfläche und Berechnung des Grundwasserflurabstands erfolgte für die zwei hydrogeologischen Systemzustände mittleres Grundwasser (MGW) und niedriges Grundwasser (NGW). Zur Auswahl der charakteristischen Zeitpunkte wurde analog zu HYDOR (2021) eine mittlere Zeitreihe aus den vorliegenden Grundwasserstandszeitreihen (1951 bis 2022) von 107 Messstellen des NLWKN berechnet. Dafür wurden zunächst messstellenbezogene Monatsmittelwerte berechnet und die Grundwasserstände jeder Zeitreihe durch Subtraktion des entsprechenden Mittelwerts der Zeitreihe zentriert. Daraus wurden anschließend über alle Messstellen hinweg das Monatsmittel und die Perzentile berechnet, woraus eine mittlere Zeitreihe für das Gebiet resultiert (Abb. 4).

Die zwei charakteristischen Zeitpunkte der hydrogeologischen Systemzustände wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- ein mittlerer bzw. niedriger gemittelter Wasserstand über alle Messstellen hinweg,
- eine möglichst hohe Anzahl an Messwerten zu den Zeitpunkten,
- die Aktualität der Zeitpunkte und
- eine möglichst geringe Streuung der Grundwasserstände der Messstellen zum über alle Messstellen gemittelten Wasserstand zu diesem Zeitpunkt.

Zur Abwägung wurde Abbildung 4 herangezogen, die die Kriterien grafisch zusammenfasst. Im Ergebnis wurde für den Zeitpunkt des mittleren Grundwassers (MGW) der Mai 2018 und des niedrigen Grundwassers (NGW) der September 2019 identifiziert. Die gebietsbezogene mittlere Abweichung zwischen den beiden Systemzuständen beträgt 55 cm.

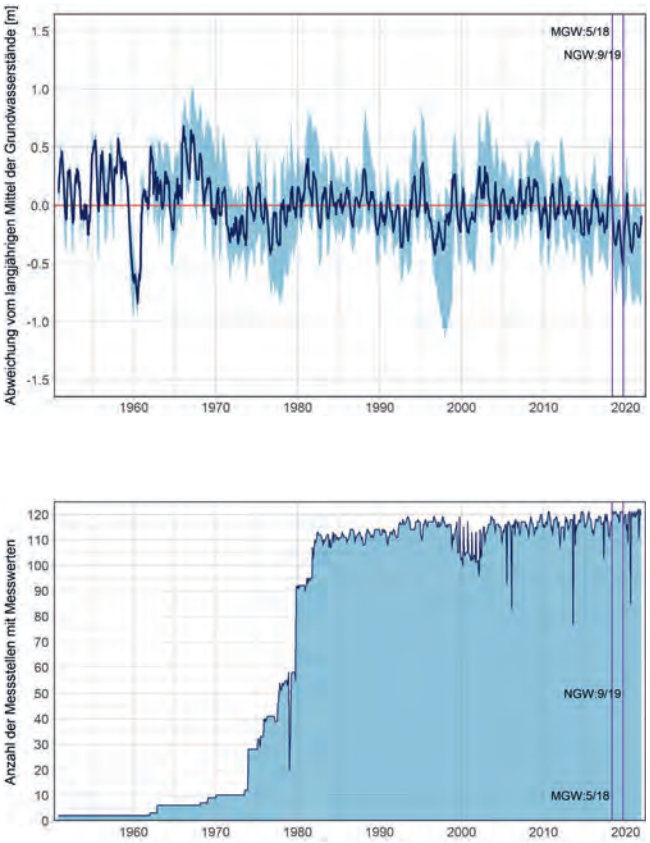

Abbildung 4
Oben: gebietsbezogene Zeitreihe der mittleren Grundwasserstände (dunkelblau: Mittelwert der Messwerte je Monat; hellblau: 2,5 bis 97,5 Perzentile). Unten: Anzahl der Messstellen mit Messwerten.
Top: area-related time series of medium groundwater levels (darkblue: mean value of measurements per month; light blue: 2.5 to 97.5 percentiles). Bottom: number of available observation wells..

Für die sich anschließende Regionalisierung der Grundwasserdruckfläche wurden zusätzlich Daten von 12 Oberflächenwasserpegeln und 64 Schöpfwerken zusammengetragen sowie insgesamt 954 Stützpunkte entlang der Fließgewässer I. und II. Ordnung erstellt. Die Übertragung der punktuell vorliegenden Informationen von Grundwassermessstellen, Pegeln, Schöpfwerken und Gewässerstützpunkten in die Fläche erfolgte durch Variogrammanalyse (PEBESMA, 2004; GRÄLER et al., 2016) und anschließendes Kriging-Verfahren, das in der Modellierung von Grundwasseroberflächen vielfach Anwendung findet (UETRECHT et al., 2019).

Der Grundwasserflurabstand ergibt sich durch Subtraktion der regionalisierten Grundwasseroberfläche vom digitalen Geländemodell. Die Gebiete mit bedecktem und ggf. gespanntem Grundwasserleiter wurden aus der Geologischen Karte 1 : 50.000 (GK 50 in Abb. 5; LBEG, 2007) abgeleitet und exkludiert, da in diesen Fällen die meist unbekannte Lage der Unterkante des Grundwassergeringleiters für den Flurabstand entscheidend ist. Darüber hinaus sind die bedeckten Gebiete für die Betrachtung des Grundwasseranschlusses an den effektiven Wurzelraum der Pflanzen nicht relevant und wurden daher in die Bodenfeuchtemodellierung integriert.

3.3 Ermittlung der Grundwasseranbindung

Die Grundwasseranbindung der effektiven Wurzelzone beschreibt die Verfügbarkeit von Grundwasser für eine Versorgung der Vegetation durch den kapillaren Aufstieg. Die Ableitung erfolgte hier nach BUG et al. (2020) jeweils für das mittlere Grundwasser (MGW) im Mai 2018 und das niedrige Grundwasser (NGW) im September 2019. Die Anbindung an das Grundwasser ist vom Grundwasserflurabstand (FA), der kapillaren Aufstiegshöhe (kh) und der effektiven Durchwurzelungstiefe (We) abhängig. Die notwendigen Daten wurden aus der BK 50 (LBEG, 2017) entnommen.

Die kapillare Aufstiegshöhe leitet sich nach BUG et al. (2020) bei mineralischen Böden aus der Feinbodenart und bei organischen Böden aus der Torfart, der Zersetzungsstufe und dem Substanzvolumen ab. Dabei wird zwischen verschiedenen Kennwerten der kapillaren Aufstiegshöhe in Abhängigkeit der Wasserversorgung unterschieden: kapillarer Aufstieg für eine optimale (kh_{opt}) und eine ertragsrelevante Wasserversorgung (kh_{Ertrag}) sowie eine Notwasserversorgung der Vegetation in Trockenphasen (kh_{min}). Letztere beschreibt die Höhe, bis zu der das Grundwasser mit einer Rate von mindestens 0,3 mm/d bei einer Wasserspannung von pF4 kapillar aufsteigen kann (DIN 4220 aus BUG et al., 2020), um eine Notwasserversorgung der Vegetation zu gewährleisten. Um die Auswirkungen niedriger Grundwasserstände durch Trockenheit und Dürre auf die Vegetation zu charakterisieren, wurde daher der Kennwert kh_{min} zur Ableitung des Grundwasseranschlusses verwendet.

Die Methodik zur Ableitung von kh_{min} ist in BUG et al. (2020) beschrieben. Dabei wird zunächst für jeden Bodenhorizont zwischen der Unterkante der effektiven Durchwurzelungstiefe und der Oberkante des Grundwassers der horizontspezifische Kennwert $kh_{min,i}$ bestimmt. Die kapillare Aufstiegshöhe des gesamten Bodenprofils leitet sich anschließend aus dem Kennwert des Horizonts mit der geringsten kapillaren Aufstiegshöhe bei einer Mindestmächtigkeit von 2 dm ab.

Die Summe aus der effektiven Durchwurzelungstiefe (We) und der kapillaren Aufstiegshöhe zur Notwasserversorgung der Vegetation (kh_{min}) ergibt den Grenzflurabstand, aus dem nach der Subtraktion des vorherrschenden Grundwasserflurabstands (FA) die Grundwasseranbindung abgeleitet wird:

$$Grundwasseranschluss = \begin{cases} ja, & We + kh_{min} - FA \geq 0 \\ nein, & We + kh_{min} - FA < 0 \end{cases} \qquad \text{Gl. 1}$$

3.4 Modellierung der Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte und der Dürrezustand wurden für Böden ohne Grundwasseranbindung im täglichen Intervall in einer Auflösung von 100 x 100 m^2 ab 1. Januar 1991 modelliert. Das Modell wurde in der Programmiersprache Python entwickelt und speist sich aus frei verfügbaren behördlichen Daten. Die ausführliche Modelldokumentation ist in HYDOR (2023) veröffentlicht.

Die Modelldomäne besteht aus 100.579 Rasterzellen (1.006 km^2). Sie geht aus der Landkreisfläche (2.072 km^2) hervor, die um die Siedlungsflächen und die Flächen mit Grundwasseranbindung bei mittleren Grundwasserständen reduziert wurde. Die Parametrisierung der Böden (We und nFK_{We}) erfolgt anhand der Daten der BK 50 (LBEG, 2017). Die räumliche Verteilung der Parameter ist in Abbildung 5 dargestellt.

In die Niederschlagsverteilung bzw. Verteilung der potenziellen Evapotranspiration fließen die Daten von 17 bzw. 7 Stationen des DWD ein (Abb. 1). Die Punktdaten werden mittels linearer Radialer Basisfunktion (RBF) auf das Raster interpoliert. Dafür wird in Python das Paket Scipy (VIRTANEN et al., 2020) und die Funktion *scipy.interpolate.Rbf* verwendet. FELIX & JUNG (2022) zeigten, dass die Interpolation mittels RBF eine geeignete Methode für die Komplementierung hydrologischer Modelle darstellt.

Die potenzielle Evapotranspiration wird kulturspezifisch vom Deutschen Wetterdienst (DWD) als Produkt des Modells AMBAV 2.0 bereitgestellt (Agrarmeteorologische Berechnung der aktuellen Verdunstung; LÖPMEIER, 1994; HERBST et al., 2021): z. B. für Gras, Winterweizen, Mais und Zuckerrüben, weshalb auf eine gesonderte Modellierung verzichtet wurde. Die Grundlage für die dafür notwendige Parametrisierung der Landnutzung liefert das digitale Landschaftsmodell (Basis-DLM, Stand Juni 2020), das sich bei der Erstellung an der Deutschen Grundkarte 1 : 5.000 orientierte und laufend anhand digitaler Orthophotos aktualisiert wird (LGLN, 2024). Bei Grünland wurde zur Ermittlung der potenziellen Evapotranspiration der Wert für Gras und bei Ackerflächen der Mittelwert aus Winterweizen und Mais angesetzt. Für die Waldflächen gilt ein Pauschalansatz, bei dem die Verdunstung auf Basis der potenziellen Verdunstung von Gras multipliziert mit einem Faktor f_W abgeschätzt wurde. Die Ermittlung des Faktors erfolgte spezifisch für Nadel- (f_W = 1,6), Laub- (f_W = 1,35) und Mischwald (f_W = 1,47) auf Grundlage forsthydrologischer Modellierungen in der Lüneburger Ostheide (UDATA, 2015) sowie Lysimetermessungen in St. Arnold in Nordrhein-Westfalen (KLEIN, 2000 aus ZIMMERMANN et al., 2008). Die abgeleiteten Faktoren stimmen gut mit anderen klimatischen Räumen in Deutschland überein. So liegt für den Standort Britz in Brandenburg die langjährige Verdunstung von Kiefern um rund 20 % höher als die von Buchen (MÜLLER, 2005).

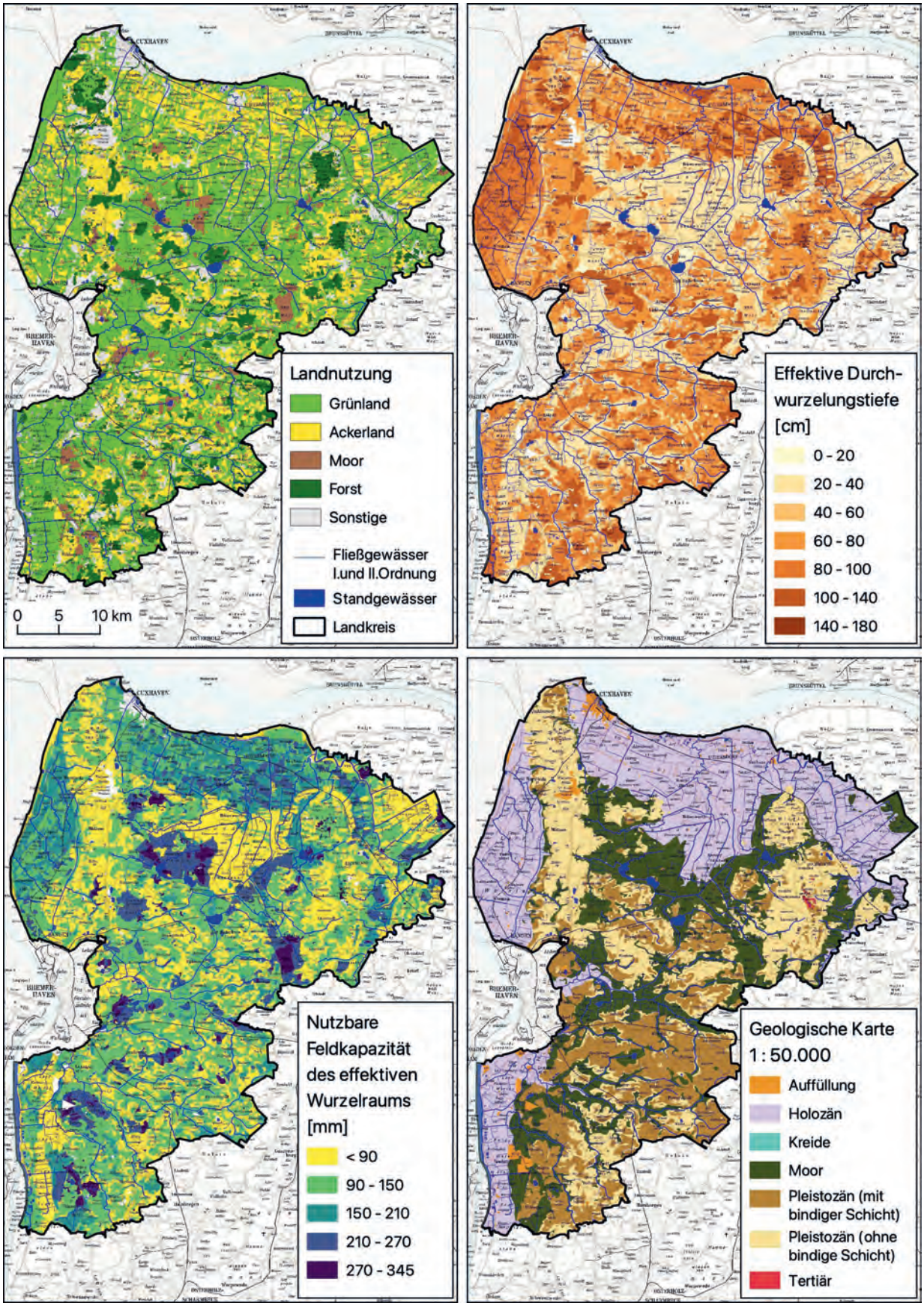

Abbildung 5
Räumliche Verteilung der für die Dürremodellierung verwendeten Parameter (für Datenquellen siehe Tabelle 1).
Spatial distribution of the parameters used for drought modelling (for data sources see table 1).

Aus der potenziellen Evapotranspiration ETP [mm] wird die reale Verdunstung ETA [mm] mithilfe eines Korrekturfaktors f_{Bf} in Abhängigkeit der vorherrschenden Bodenfeuchte Bf_d [mm] und der nFK_{We} [mm] bestimmt:

$$ETA = f_{Bf} * ETP \qquad \text{mit } f_{Bf} = Bf_d / nFK_{We} \qquad \text{Gl. 2}$$

Die Bodenfeuchte Bf_d [mm] wird am aktuellen Tag aus der Bodenfeuchte des Vortags Bf_{d-1} [mm], dem Niederschlag N_d [mm] und der realen Evapotranspiration ETA_d [mm] für einen Bodenmonolith bis zur effektiven Wurzelzone berechnet:

$$Bf_d\,[mm] = Bf_{d-1} + N_d - ETA_d \qquad \text{Gl. 3}$$

Aufgrund der bodenkundlichen und hydrogeologischen Gegebenheiten wird angenommen, dass kein relevanter Oberflächenabfluss stattfindet. Überschüssiges Bodenwasser über die nutzbare Feldkapazität hinaus wird als Sickerwasser abgeführt. In Abbildung 6 ist das Bodenfeuchtemodell schematisch skizziert.

3.5 Ableitung des Bodenfeuchteindex und der Dürrestufe

Die Bodenfeuchtezeitreihe liefert die Grundlage zur Ermittlung des Bodenfeuchteindex (Soil Moisture Index – SMI; SAMANIEGO et al., 2013), der die Unterschreitungswahrscheinlichkeit einer Bodenfeuchte angibt. Die Ermittlung des SMI erfolgt in Anlehnung an die Methodik des UFZ, die im Rahmen der Modellierung für den deutschlandweiten Dürremonitor angewendet wird (MARX et al., 2016; ZINK et al., 2016). Der Ansatz gründet auf demjenigen von SVOBODA et al. (2002), der im Rahmen des U.S. Drought Monitors entwickelt wurde. In Tabelle 2 sind die Perzentile dargestellt, die entsprechende SMI-Spannen und Dürrestufen repräsentieren (nach SVOBODA et al., 2002).

Die einzelnen Schritte zur Ermittlung des SMI sind in Abbildung 6 dargestellt. Da aus dem SMI letztlich eine Dürrestufe abgeleitet werden soll, wird aus Gründen der Recheneffizienz die SMI-Spanne bzw. Dürrestufe direkt ermittelt und auf eine exakte Berechnung des SMI verzichtet. Dafür wird auf die Zeitreihe der Bodenfeuchte vorbereitend ein gleitendes Mittel von 30 Tagen

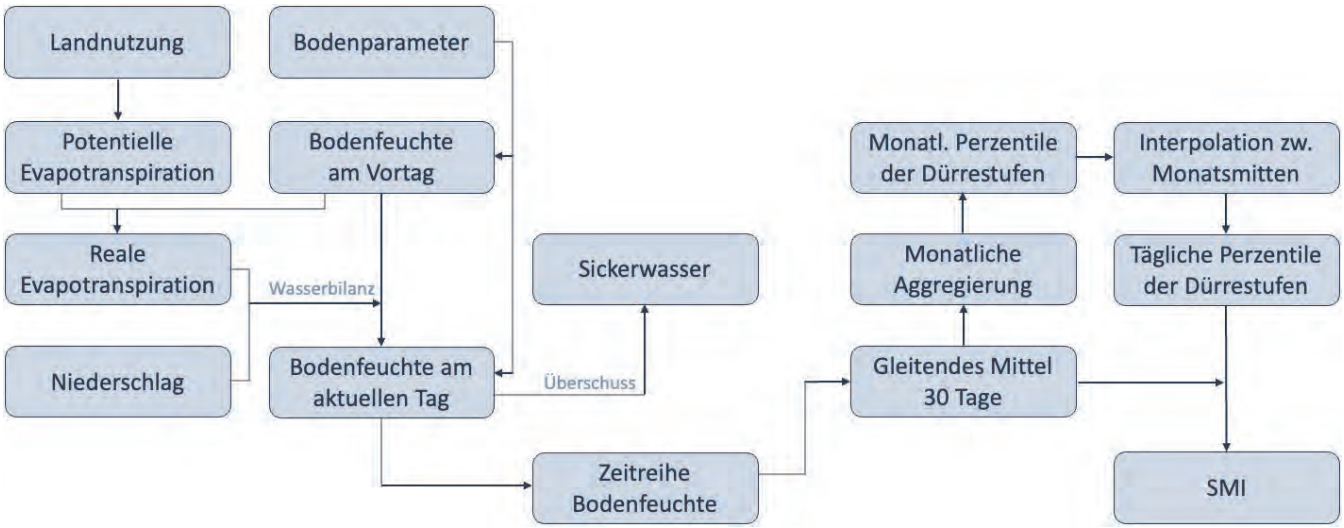

Abbildung 6
Aufbau des Teilmodells zur Berechnung der Bodenfeuchte und zur Ermittlung des SMI.
Structure of the partial model for the estimation of soil moisture and determination of the SMI.

Tabelle 2
Perzentile für Trockenheits- und Dürrestufen. Die Erläuterungen wurden aus dem Englischen übersetzt (Originalquelle: SVOBODA et al., 2002).
Percentiles for conditions of dryness and drought. The explanations were translated from the original source (SVOBODA et al., 2002).

Perzentil	Trockenheits- bzw. Dürrestufe	Erläuterung
≤ 30 – 20	1 – Ungewöhnliche Trockenheit	Auswirkungen auf Pflanzenwachstum
≤ 20 – 10	2 – Moderate Dürre	Schadwirkung auf Grünland und Ackerkulturen
≤ 10 – 5	3 – Schwere Dürre	Ertragsverluste auf Grünland und Acker zu erwarten
≤ 5 – 2	4 – Extreme Dürre	Hohe Ertragsverluste auf Grünland und Acker
≤ 2	5 – Außergewöhnliche Dürre	Außergewöhnlich hohe und flächenhafte Ertragsverluste

angewendet. Im Anschluss erfolgt eine monatliche Aggregierung, d. h. aus jeder Zeitreihe einer Rasterzelle werden 12 Teildatensätze. Danach werden die Perzentile (30, 20, 10, 5 und 2) der monatlichen Teildatensätze rangstatistisch ermittelt. Die daraus resultierenden monatlichen Perzentile der Bodenfeuchten sind äquivalent zu den Bodenfeuchten der SMI = {0.3, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02} und entsprechen den Dürrestufen 1 bis 5. Um Sprünge zwischen den Monatswechseln zu vermeiden, erfolgt eine lineare Interpolation zwischen den Monatsmitten. Für jede Rasterzelle und für jeden Kalendertag im Jahr ergeben sich fünf Bodenfeuchtenstufen, die jede perzentilabhängige SMI-Spanne bzw. Dürrestufe abbilden. So kann jeder aktuellen Bodenfeuchte eine SMI-Spanne bzw. Dürrestufe zugeordnet werden.

4 Dürregefährdung in der Kulturlandschaft

4.1 Flurabstände und Grundwasseranbindung der effektiven Wurzelzone bei Niedrigwasser

In Abbildung 7 (links) ist die Flurabstandskarte für den Systemzustand des mittleren Grundwassers (MGW) dargestellt. Darin werden die geringen Flurabstände in den Niedermoor- und Marschgebieten mit Flurabständen von weniger als 2 Metern verortet, wo eine Anbindung an das Grundwasser zu erwarten ist. Mit zunehmender Nähe zur Küste steigt der Flurabstand in den Marschgebieten an. Dies zeigt sich am Hochland der Hadelner Marsch im Norden mit Flurabständen zwischen 2 bis 3 m, lokal sogar bis zu 5 m. In den Hochmooren (z. B. Ahlenmoor) betragen die Flurabstände ebenfalls 2 bis 5 m.

Die Geestflächen sind durch Flurabstände von mehr als 5 m gekennzeichnet. Dort ergibt sich eine Absenkung der Grundwasseroberfläche vom Zeitpunkt des MGW im Mai 2018 zum Zeitpunkt des niedrigen Grundwassers (NGW) im September 2019 von 0,2 bis 1 m (Abb. 7, rechts). In den Moor- und Marschgebieten ergeben sich hingegen nur geringe Abnahmen von wenigen Zentimetern oder zum Teil geringfügige Zunahmen des Grundwasserstands zwischen 5 und 20 cm. Diese lokal erhöhten Grundwasserstände bei Niedrigwasser sind auf den Schöpfwerksbetrieb zurückzuführen, bei dem im Trockenjahr 2019 geringfügig höhere Wasserstände gehalten wurden (HADELNER DEICH- UND GEWÄSSERVERBAND, 2023).

In den Gebieten mit Flurabständen von mehr als 3 m ist in der Regel keine Anbindung der effektiven Wurzelzone an die Grund-

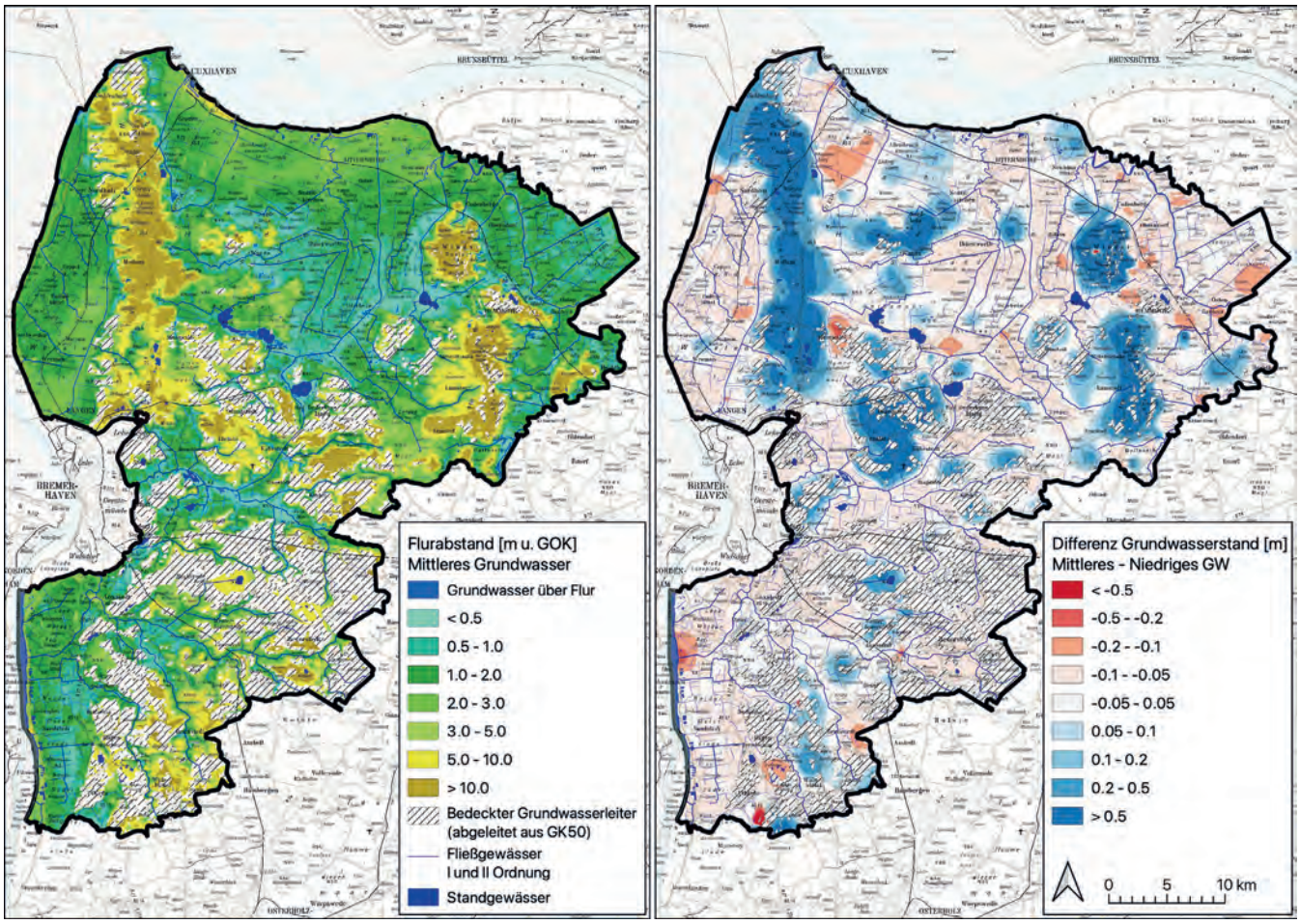

Abbildung 7
Links: Flurabstandskarte für mittlere Grundwasserstände im Mai 2018. Rechts: Differenzenkarte zwischen mittleren und niedrigen Grundwasserständen. Datenquellen: NLWKN, WSA, lokale Wasserversorger, Wasser- und Bodenverbände, Unterhaltungsverbände, LBEG, LGLN, BKG.
Left: Map of depth to groundwater table for medium groundwater levels in May 2018. Right: Difference map between medium and low groundwater levels. Data sources: NLWKN, WSA, local water suppliers, associations for water and soil management, LBEG, LGLN, BKG.

wasseroberfläche zu erwarten. Entsprechend können Flächen ohne Grundwasseranbindung auf den Geestflächen und in den Hochmooren identifiziert werden (Abb. 8, links), die insgesamt einen Flächenanteil von 41 % (845 km²) aufweisen. Die Flächen mit Grundwasseranbindung liegen in den Niedermooren und in den tiefliegenden Sietländern der Marschen. Im feinkörnigem Bodensubstrat kann dort das Grundwasser kapillar bis zu 2,1 m aufsteigen und ist dadurch noch bei einem Grundwasserflurabstand von 2,5 m und teilweise höher pflanzenverfügbar.

Unter niedrigen Grundwasserständen treten Abkopplungen des effektiven Wurzelraums vom Grundwasser meist lokal in den Geestrandbereichen und Senken auf (Abb. 8, rechts). So kann z. B. im Dorumer Moor, das sich in einer abflusslosen Senke bildete, eine Abkopplung großer Flächen beobachtet werden, auf denen bei niedrigen Grundwasserständen die Notwasserversorgung der Vegetation nicht mehr gewährleistet wird. Bezogen auf die gesamte Landkreisfläche erfahren 4 % der bei mittlerem Grundwasser hydraulisch angebundenen Flächen eine Abkopplung unter Verhältnissen niedriger Grundwasserstände.

4.2 Bodenfeuchten und Dürrestufen exemplarisch für das Jahr 2018

Das Jahr 2018 war im Landkreis Cuxhaven sehr warm und durch einen besonders niederschlagsarmen Sommer gekennzeichnet (Abb. 2). In Abbildung 9 sind daher die räumlichen Verteilungen der relativen Bodenfeuchten in der effektiven Wurzelzone (oben) und die entsprechenden Dürrestufen (unten) für die Böden ohne Grundwasseranschluss außerhalb der Siedlungsgebiete exemplarisch für das Jahr 2018 dargestellt. Der Winter 2017/18 und das Frühjahr 2018 waren zunächst niederschlagsreich, sodass die Bodenspeicher gefüllt waren, ohne eine Abweichung von den jahreszeittypischen Bodenfeuchten aufzuweisen. Bis zum 1. Mai konnte daher noch keine Dürre festgestellt werden.

Nach dem Eintritt der Vegetationsperiode erfolgte eine intensive Entleerung der Bodenwasserspeicher aufgrund der Trockenphase. Anfang Mai lagen die Bodenfeuchten teilweise noch bei 70 bis 80 % und sanken in weiten Teilen des Landkreises auf meist unter 30 % nFK_{We} im Juni 2018. Innerhalb weniger Wochen wurde bereits eine moderate bis schwere Dürre erreicht. Die Moore, z. B. Ahlenmoor und Langes Moor, wiesen zum Zeitpunkt

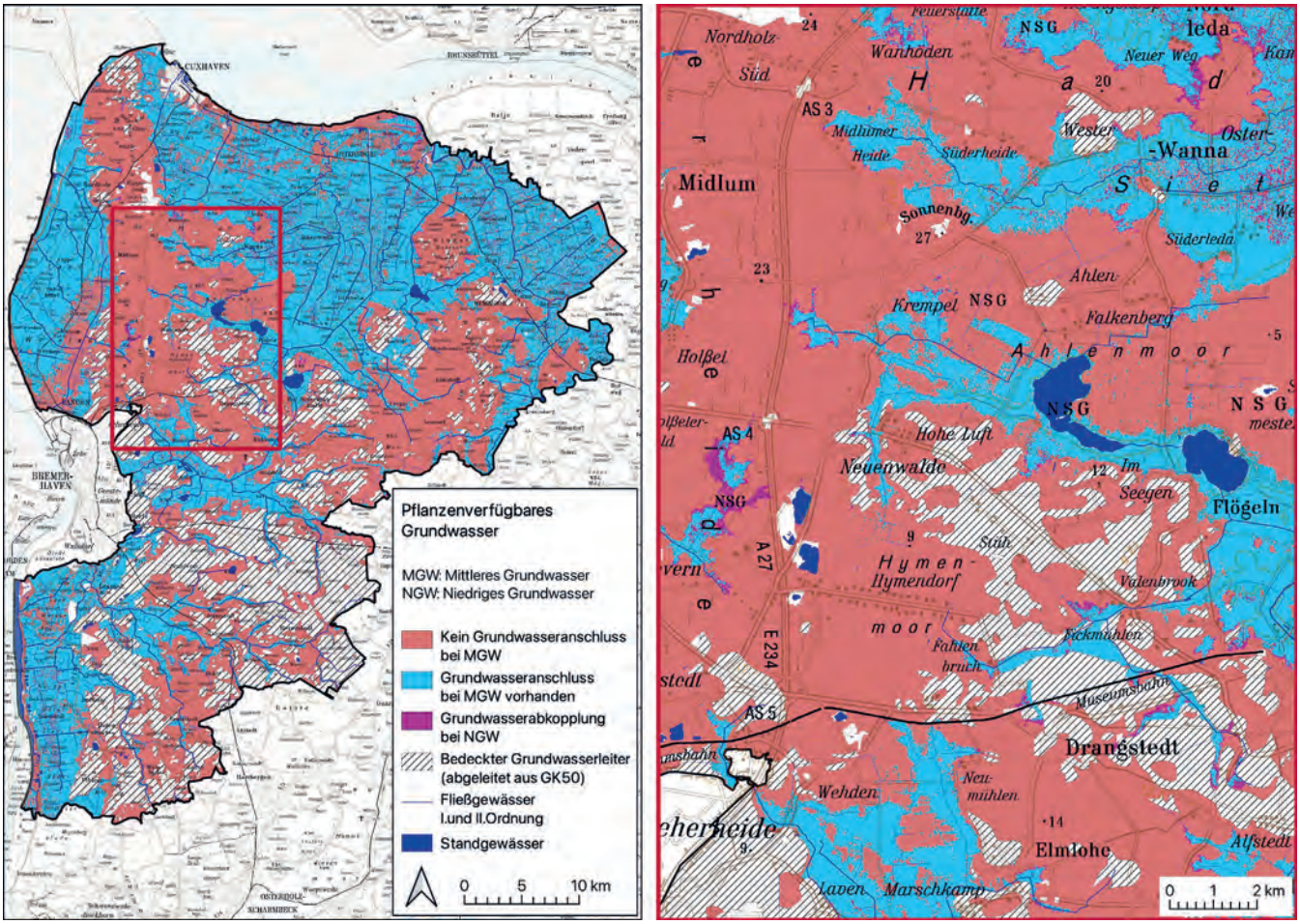

Abbildung 8
Links: Anbindung der effektiven Wurzelzone bei mittleren Grundwasserständen und abgekoppelte Flächen bei niedrigem Grundwasser. Rechts: Detailausschnitt zur Veranschaulichung der lokal ausgeprägten Grundwasserabkopplung. Datenquellen: NLWKN, WSA, lokale Wasserversorger, Wasser- und Bodenverbände, Unterhaltungsverbände, LBEG, LGLN, BKG.
Left: Connection of the effective root zone at medium groundwater levels and disconnected areas at low groundwater levels. Right: Detailed map showing the disconnected areas as local features. Data sources: NLWKN, WSA, local water suppliers, associations for water and soil management, LBEG, LGLN, BKG..

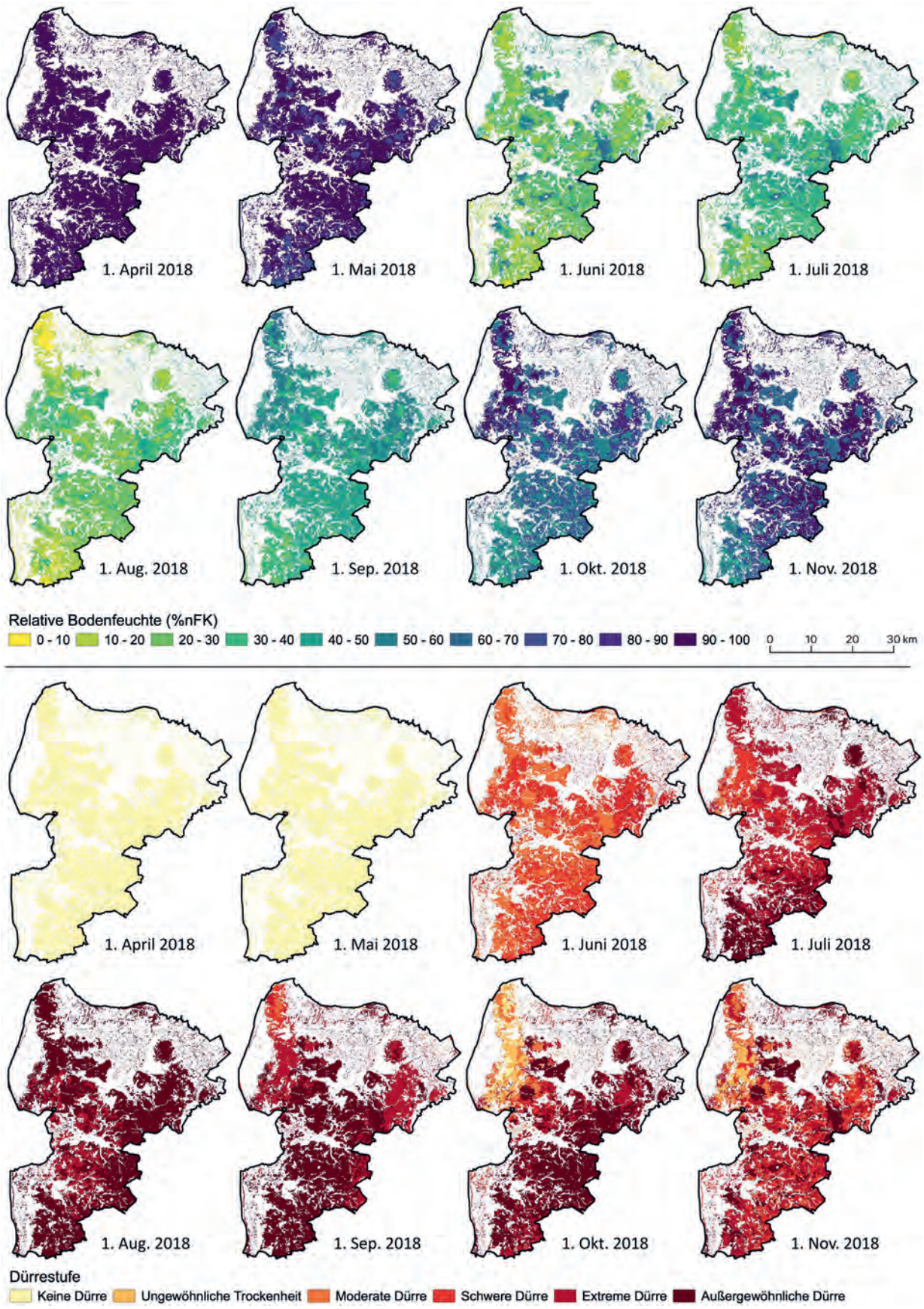

Abbildung 9
Räumlich-zeitliche Verteilung der Bodenfeuchten und der Dürrestufe für Böden ohne Grundwasseranschluss von April bis November 2018.
Spatio-temporal distribution of the soil moisture and drought level for soils without connection to groundwater from April to November in 2018..

noch relativ hohe Werte von 50 bis 70 % auf, da die Wasserspeicherkapazität der Torfböden im Vergleich zu den sandigen Böden auf den Geestflächen wesentlich höher ist. Im Verlauf von Juni bis Juli erfolgte lokal nur eine kurzfristige Entspannung bzw. Stagnation der Trockenheit. Die Situation verschärfte sich mit dem folgenden Eintritt der extremen Dürre Anfang Juli, die sich bis Anfang August zu einer außergewöhnlichen Dürre entwickelte. Die Bodenfeuchten sanken meist auf unter 30 %. Auch die Moore wiesen Tiefstwerte von teilweise weniger als 40 % auf.

Im September erfolgte eine allmähliche Füllung der Bodenwasserspeicher, vor allem im Norden des Landkreises mit höheren Niederschlagsmengen. Aufgrund der für diese Jahreszeit noch untypisch niedrigen Bodenfeuchten, dauerte die außergewöhnliche Dürre weiter an. Im Oktober 2018 lagen die relativen Bodenfeuchten auf den Geestflächen im nordwestlichen Teil bereits bei über 90 %, da dort die Niederschlagssummen an den DWD-Stationen von August und September bei 128 bis 151 mm lagen, während sie im übrigen Teil des Landkreises 76 bis 111 mm betrugen (DWD, 2021). Da es sich auf den nordwestlichen Geestflächen um sandige Böden mit geringen nutzbaren Feldkapazitäten handelt, erfolgte die Füllung der Bodenspeicher relativ schnell und der Dürrezustand entspannte sich dort zu einer ungewöhnlichen Trockenheit. Die Moorflächen mit hohem Wasserspeichervermögen benötigten hingegen eine deutlich längere Regenerationszeit. Im Oktober lagen die Bodenfeuchten dort noch bei 50 bis 60 %. Da eine solche Bodenfeuchte im Moor für diese Zeit sehr untypisch ist, lag im Oktober weiterhin eine außergewöhnliche Dürre vor. Bis November dauerte diese Situation auf den Moorflächen mit Bodenfeuchten von 60 bis 70 % an.

Ein Vergleich des Dürreverlaufs mit den Ergebnissen des UFZ-Dürremonitors (UFZ, 2024) zeigt, dass solche flächenspezifischen Analysen damit nicht möglich sind. So gehen daraus für das Jahr 2018 zwar Unterschiede im Dürreverlauf zwischen Küste und Binnenland hervor, aber differenzierte Aussagen zum Dürrezustand von Geestflächen und Mooren sind aufgrund der groben Auflösung von 4 x 4 km² daraus nicht ableitbar.

4.3 Identifikation von Gefährdungsparametern: Dürredauer und Grundwasserabkopplung bei Niedrigwasser

Im Rahmen der Gefährdungsanalyse zu Dürreereignissen sind zunächst geeignete Parameter zu identifizieren. Eine Gefährdung der Kulturlandschaft durch Trockenheit impliziert, dass die auszuwählenden Parameter Stressfaktoren für die Wasserverfügbarkeit der Vegetation darstellen müssen. Für Böden mit Grundwasseranbindung wurde daher die Abkopplung der effektiven Wurzelzone vom Grundwasser bei niedrigen Grundwasserständen als Gefährdungsparameter ausgewählt, während für Böden ohne Grundwasseranbindung die Dürredauer herangezogen wurde. ZINK et al. (2016) verwenden u. a. die Dürredauer erfolgreich, um die Magnituden von historischen Dürreereignissen in Deutschland zu quantifizieren.

Im modellierten Zeitraum 1991 bis 2022 wurde für jede Rasterzelle die maximale Dürredauer eines Kalenderjahres ermittelt (Abb. 10). Sie entspricht der Summe der Tage, die das 20-Perzentil in einem Kalenderjahr unterschreiten. Die Spanne der resultierenden Verteilung liegt zwischen 4 bis 10 Monaten und bietet ausreichend Raum für eine räumliche Differenzierung. Sie erweist sich damit grundsätzlich als geeignetes Maß für eine flächendifferenzierte Dürregefährdung.

Die Geestflächen im Nordwesten des Landkreises weisen eine relativ geringe maximale Dauer von 4 bis 6 Monaten auf, da die sandigen Bodenwasserspeicher auch bei geringen oder mittleren Niederschlagsmengen am Ende einer Dürre relativ schnell wieder gefüllt werden können. Darüber hinaus sind die nordwestlichen Geestflächen stärker der Küste und damit potenziellem Niederschlag exponiert. Im übrigen Teil des Landkreises werden meist maximale Dürredauern von 6 bis 8 Monaten erreicht, wobei sie im südlichen Teil länger ausfallen. Bemerkenswert sind die Moorgebiete, z. B. Langes Moor und Ahlenmoor, mit den längsten Dauern von 8 bis zu 10 Monaten. Die Unterschiede sind primär auf das Wasserspeichervermögen der Böden zurückzuführen. Von Bedeutung sind jedoch auch die regionalen und lokalen Niederschlagsmuster sowie die Verteilung der Evapotranspiration.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde eine Dürremodellierung im Landkreis Cuxhaven in einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m² durchgeführt. Im Vergleich zum Dürremonitor (MARX et al., 2016; ZINK et al., 2016), der eine Auflösung von 4 x 4 km² besitzt, konnte so die Dürreentwicklung im Jahr 2018 räumlich differenzierter nachvollzogen und Unterschiede in den Dürrezuständen zwischen benachbarten Geest- und Moorflächen erkannt werden. Aus den Ergebnissen können verallgemeinerbare Rückschlüsse auf die Dürregefährdung unterschiedlicher Landnutzungsgruppen im norddeutschen Raum gezogen werden. Es konnte herausgearbeitet werden, dass Standorte mit hohem Wasserspeichervermögen im Boden wie z. B. Moore mit hohen Torfmächtigkeiten und Standorte mit geringem Wasserspeichervermögen, z. B. Heideflächen auf der Geest, sehr unterschiedlich auf lange Zeiträume mit ausgeprägter Trockenheit bzw. Dürre reagieren. Böden mit hohem Wasserspeichervermögen zeigen in Bezug auf die relative Bodenfeuchte eine trägere Reaktion auf trockene Witterungsverhältnisse als Böden mit geringem Wasserspeichervermögen, d. h. die Dauer der Speicherentleerung ist höher. Dieses Trägheitsphänomen tritt auch bei der sich anschließenden Speicherfüllung auf, d. h. die Böden mit hohem Wasserspeichervermögen verharren länger im Dürrezustand als die Böden mit geringem Wasserspeichervermögen. Im Ergebnis tritt der Dürrezustand bei Böden mit geringem Wasserspeichervermögen häufig und kurz auf, während er bei Böden mit hohem Wasserspeichervermögen seltener auftritt und länger anhält. Das häufigere Eintreten von Dürren auf Sandböden im Vergleich zu Tonböden bei ähnlichem Klima wird durch Bodenfeuchtemessungen von YU et al. (2023) bestätigt.

Der effektive Wurzelraum der Böden weist auf etwa 41 % der Landkreisfläche eine Grundwasseranbindung bei mittleren Grundwasserständen auf, wobei es sich um Niederungen und die tiefliegenden Sietländer der Marschgebiete handelt. Eine Abkopplung des effektiven Wurzelraums vom Grundwasser bei niedrigen Grundwasserständen (September 2019) wurde nur sehr lokal, z. B. im Gebiet des Dorumer Moors, sowie den Geestrandbereichen beobachtet. Insgesamt erfahren 4 % der grundwasserangebundenen Flächen eine Abkopplung bei niedrigem Grundwasser (31 km²). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass in den Niedrigwassersituationen seit dem Jahr 2018 auf

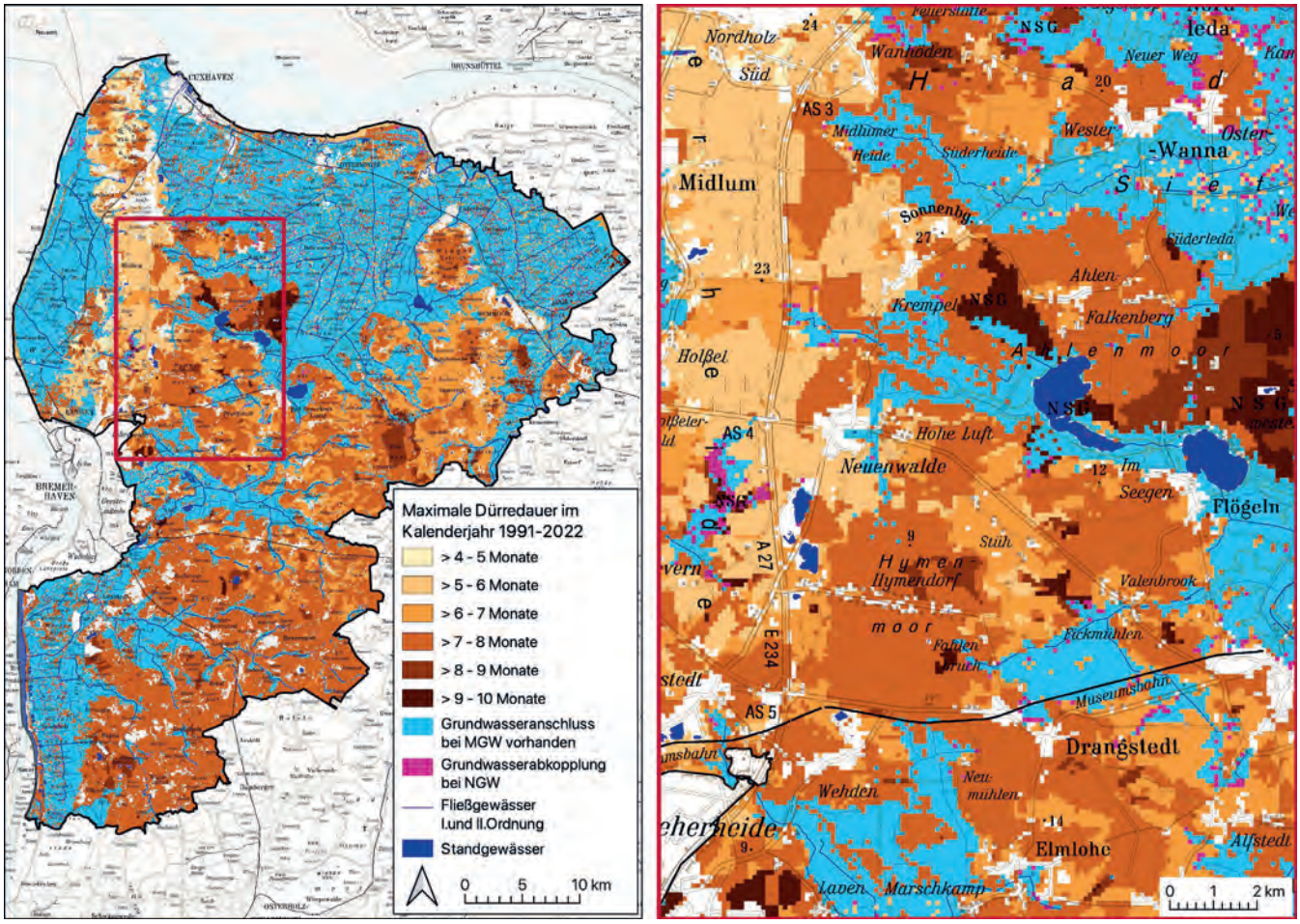

Abbildung 10
Maximale Dürredauer in einem Kalenderjahr von1991-2022 in gemeinsamer Darstellung mit der Grundwasseranbindung in einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m².
Maximum drought duration per calendar year from 1991 to 2022 together with the groundwater connection in a spatial resolution of 100 x 100 m².

Böden mit Grundwasseranschluss die Notwasserversorgung der Vegetation weitestgehend gedeckt war und die Abkopplung nur lokal ein Problem darstellte. Ein Grund dafür ist das Wassermengenmanagement, das in den Niederungen und Marschgebieten durch die Schöpfwerke betrieben wird und die Grundwasserstände reguliert. Durch die Drosselung der Entwässerung können Grundwasserschwankungen in Dürreperioden ausgeglichen werden. Methodisch ist daraus abzuleiten, dass die Einbeziehung detaillierter Grundwasserflurabstände auf grundwassergeprägten Böden, wie sie in Norddeutschland häufig vorkommen, unerlässlich für die Modellierung der Gefahren und Risiken durch Trockenheit und Dürre sind, weil das oberflächennahe Grundwasser in weiten Teilen des Landkreises wichtig für die Wasserversorgung von Boden und Vegetation ist.

Als geeignete Parameter zur Beschreibung der Dürregefährdung in der Kulturlandschaft wurden die maximale Dauer einer Dürre und die Abkopplung der Grundwasseroberfläche von der effektiven Wurzelzone bei niedrigen Grundwasserständen jeweils für Böden ohne und mit Grundwasseranbindung identifiziert. Der Vorteil dieser Parameter ist, dass sie selbst sowie auch ihre Zahlenwerte für die allgemeine Öffentlichkeit im Gegensatz zu zusammengesetzten Indizes nachvollziehbar sind. Nachteilig ist bei der maximalen Dürredauer die Begrenztheit der Aussage über die Dürreintensität. ZINK et al. (2016) nutzen diese als zeitlich-räumliches Integral der negativen Abweichungen von einem SMI = 0,2 (Eintritt des Dürrezustands) zur Beschreibung der Magnituden von Dürreereignissen in Deutschland. Das Ergebnis ist ein abstrakter Zahlenwert, der selbst wenig aussagekräftig ist, aber neben der Dürredauer den Dürrezustand diskreter Flächen komplementiert.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind auf die Wahl einer räumlich hohen Auflösung von 100 x 100 m² bei der Bodenfeuchtemodellierung zurückzuführen. Eine erhöhte Auflösung des UFZ-Dürremonitors (MARX et al., 2016; ZINK et al., 2016) von 1,2 x 1,2 km² anstatt 4 x 4 km² wurde bereits von BOEING et al. (2022) erfolgreich unter Verwendung der BÜK 200 (BGR, 2020) demonstriert. Die länderspezifischen Bodenkarten in der Auflösung von 1 : 50.000 bieten diesbezüglich weiterführende Datengrundlagen für zukünftig noch höhere Zielauflösungen, um die Praxistauglichkeit dieser wertvollen Informationen zu erhöhen. Gleichzeitig wurde von BOEING et al. (2022) hervorgehoben, dass für ein nachhaltiges, bundesweites Dürreinformationssystem nicht nur verlässliche Bodenfeuchtemodellierungen notwendig sind, sondern auch flächendeckende Bodenfeuchtemessungen.

Die Wahl der hohen Auflösung impliziert jedoch auch Fehler, da vor allem die hydrometeorologischen Eingangsdaten aufgrund der Stationsdichte und der erreichbaren Genauigkeit in der Interpolation maximal in einer Auflösung von 1 x 1 km² bereitgestellt werden, z. B. die regionalisierten Niederschläge (REGNIE) des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2020; RAUTHE et al., 2013). Der induzierte Fehler in der Bodenfeuchte durch die Regionalisierung des Niederschlags wird im Vergleich zur räumlichen Variabilität der nutzbaren Feldkapazität als gering und hinnehmbar eingeschätzt. Ein Fehler in der Größenordnung von Millimetern entspricht bei derselben Bodenart schon der Schwankung der nFK zwischen verschiedenen Lagerungsdichten (BUG et al., 2020). Hinzu kommt ein Fehler in der nFK durch die Übertragung punktuell aufgenommener Bodenprofile auf die Fläche im Zuge der Erstellung der Bodenkarten.

Die Modellierung der realen Evapotranspiration stellt eine zusätzliche Fehlerquelle dar. Das etablierte Modell AMBAV 2.0 (HERBST et al., 2021) berücksichtigt die komplexen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Pflanze und Boden und bietet plausible Modellergebnisse für die potenzielle Evapotranspiration diverser Hauptkulturen. Die reale Evapotranspiration wird jedoch nur für die Bodenarten sandiger Lehm und lehmiger Sand bereitgestellt (DWD, 2019), weshalb hier zur Berechnung der realen Evapotranspiration auf einen Proportionalitätsfaktor in Abhängigkeit der Bodenfeuchte zurückgegriffen wurde. Zudem wurden pauschale Annahmen für forstlich genutzte Flächen getroffen, die u. a. in Abhängigkeit der genauen Bestandszusammensetzung und des Baumalters womöglich nicht auf allen Flächen zutreffend sind. Dies gilt auch für die Annahmen, dass die Ackerflächen mit einer Mischform aus Mais und Winterweizen parametrisiert werden und auf nicht landwirtschaftlich genutzten Moorflächen eine Grünlandverdunstung angesetzt wird. Die Ergebnisse der realen Evapotranspiration liegen jedoch insgesamt in einem plausiblen Bereich und folgen der allgemeinen Vorstellung einer abnehmenden Verdunstungsleistung in der Reihenfolge "Wald – Grünland – Acker". Die Herangehensweise bietet Raum für eine Weiterentwicklung zur präziseren Modellierung lokaler Auswirkungen von Dürreereignissen.

Darüber hinaus wurden Modellannahmen zum Oberflächenabfluss getroffen, der im Landkreis Cuxhaven vollständig vernachlässigt wird. Im südlichen Gebiet ist die Annahme womöglich nicht an jedem Ort zutreffend, da die Böden vereinzelt sehr feinkörnig sind und ein einsetzender Oberflächenabfluss nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Diese Teilbereiche besitzen jedoch nur eine geringe Ausdehnung, wie aus den modellierten Direktabflüssen des Modells mGROWA22 hervorgeht (LBEG, 2023). Zudem ist nach Einsetzen einer Abflussbildung auf dem folgenden Fließweg nach oberflächlicher Passage der geringdurchlässigen Bodenschichten mit einer anschließenden Versickerung in benachbarten Böden mit sandiger Ausprägung zu rechnen. Der Mehrwert der Modellvereinfachung im gesamten Landkreis ist deshalb wesentlich höher als der sehr lokal ausgeprägte Fehler durch diese Modellannahme.

Um die genannten Unsicherheiten und die Modellgüte in Bezug auf die Wasserhaushaltskomponenten einzuordnen, wurden Modellvergleiche mit zwei etablierten Wasserhaushaltsmodellen durchgeführt. Die Bodenfeuchte wurde exemplarisch für Gras auf lehmigem Sand mit AMBAV 2.0 (HERBST et al., 2021) und die Grundwasserneubildung eines Geeststandorts mit mGROWA22 (LBEG, 2022) abgeglichen. In beiden Fällen wurden gute Übereinstimmungen zwischen den Modellen erreicht (HYDOR, 2023). Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels ist mit einer Intensivierung der Gefährdungssituation in Hinblick auf Niedrigwasser und agrarische Dürren zu rechnen. Räumlich und zeitlich hochaufgelöste, flächenspezifische Instrumente zum Monitoring von Dürre und Trockenheit stellen daher zukünftig wichtige Informations- und Entscheidungsgrundlagen für die Akteure der landwirtschaftlichen und naturschutzfachlichen Praxis sowie der Verwaltungen dar. Der hier dargestellte Ansatz liefert eine auf die Bedürfnisse der Praxis angepasste Dürremodellierung als Grundlage für ein zukünftiges Dürrerisikomanagement und bietet Raum für spezifische Weiterentwicklungen.

Discussion & Conclusions

In this study, drought modeling was carried out in the Cuxhaven district at a spatial resolution of 100 x 100 m². Compared to the German Drought Monitor (MARX et al., 2016; ZINK et al., 2016), which has a resolution of 4 x 4 km², the course of the drought in 2018 could be tracked spatially in a more differentiated manner and differences between geest and bog areas could be recognized. The results allow generalized conclusions to be drawn about the drought hazard of different land use groups in Northern Germany. It was possible to work out that locations with high soil water storage capacity (e.g. bog areas with high thicknesses of peat layers) and low soil water storage capacity (e.g. heathlands in the geest areas) react very differently to long periods of pronounced dryness or drought. With regard to the relative soil moisture, soils with a high water storage capacity show a time-shifted reaction to dry weather conditions compared to soils with a low water storage capacity, i.e. the duration of the drainage is longer. This time-shift also occurs when the soil water body is subsequently filled after the peak of the drought, i.e. the soils with a high water storage capacity remain in a state of drought longer than the soils with a low water storage capacity. As a result, the drought condition occurs more frequently, but for a shorter period of time in soils with low water storage capacity, while it occurs less frequently, but for a longer period in soils with high water storage capacity. Higher occurrence of droughts in sandy soils compared to clay soils at similar climate conditions is confirmed by soil moisture measurements of YU et al. (2023).

The effective root zone of the soils reveals a connection to the groundwater surface at average groundwater levels on about 41 % of the district area, representing the conditions of the lowlands and the low-lying parts of the marsh areas. A decoupling of the effective root zone from the groundwater surface at low groundwater levels (September 2019) was only observed very locally, e.g. in the area of the "Dorumer Moor" and the margins of the geest areas. In total, around 4 % of the groundwater-connected areas are decoupled, when the groundwater level is low (31 km²). It can be concluded that the minimum water supply for the vegetation was largely covered and the decoupling from the groundwater surface was only a local problem in the low-water situations since 2018. One reason for this is the local water management, which is carried out by the pumping stations in the lowlands and marsh areas, that regulates the groundwater levels. By reducing drainage, groundwater fluctuations can be compensated during periods of drought. Methodologically, it can be concluded that the consideration of groundwater surface

information (depth to groundwater) in areas with soils under strong influence of groundwater, as they often occur in Northern Germany, is essential for modeling the hazards and risks of drought because near-surface groundwater is important for the water supply of soil and vegetation in large parts of the Cuxhaven district.

The maximum duration of a drought and the decoupling of the groundwater surface from the effective root zone at low groundwater levels are proposed as suitable parameters for describing the risk of drought in the cultivated landscape for soils with and without groundwater connections. The advantage of these parameters is that their meaning, as well as their numerical values, are easy to understand for the general public, in contrast to composite indices. The disadvantage of the maximum drought duration is the limited information about the drought intensity. ZINK et al. (2016) use it as a spatio-temporal integral of the negative deviations from an SMI = 0.2 (onset of drought) to describe the magnitudes of drought events in Germany. The result is an abstract numerical value, that is not easy to interpret, but it complements information on the drought condition in addition to the sole duration of the drought.

The knowledge gained is based on the choice of a spatially high resolution of 100 x 100 m^2 for the soil moisture modeling. An increased resolution of the German Drought Monitor (MARX et al., 2016; ZINK et al., 2016) of 1.2 x 1.2 km^2 instead of 4 x 4 km^2 has already been successfully tested by BOEING et al. (2022) using the digital soil map of Germany at a scale of 1 : 200,000 (BGR, 2020). The soil maps with a resolution of 1 : 50,000 held by the federal states offer possibilities of even higher target resolutions in the future to further encourage the practical use of this important information on drought. Simultaneously, BOEING et al. (2022) highlighted that not only reliable soil moisture models are necessary, but also soil moisture measurements with high coverage for a sustainable, nationwide drought information system.

The choice of the high resolution implies errors, since the hydrometeorological input data in particular are provided in a maximum resolution of 1 x 1 km^2 due to the station density and the achievable accuracy in the interpolation, e.g. the interpolated precipitation (REGNIE) of the DWD (DWD, 2020; RAUTHE et al., 2013). However, the error in soil moisture induced by the interpolation is estimated to be small and acceptable compared to the spatial variability of the soil parameters.

The modeling of the real evapotranspiration is an additional source of error. The model AMBAV 2.0 (HERBST et al., 2021) takes into account the complex interactions between atmosphere, plant and soil and offers plausible model results for the potential evapotranspiration of various crops. However, the real evapotranspiration is only provided for the soil types sandy loam and loamy sand (DWD, 2019), which is why a proportionality factor depending on the soil moisture was used to calculate the real evapotranspiration in this study. In addition, general assumptions were made for forest, which may not apply to all areas depending on the exact composition of the type and age of the trees. This also applies to the assumptions that arable land is parameterized with a mixed form of maize and winter wheat and that grassland evaporation is assumed on natural bog areas without agricultural use. The results of the real evapotranspiration are within a plausible range and follow the general idea of a decreasing evaporation rate in the order "forest – grassland – crops". However, the approach also offers possibilities for further development towards more precise modeling of local effects of drought events.

In addition, model assumptions were made on surface runoff, which was completely neglected in the Cuxhaven district. In the southern part, the assumption may not be correct for all the model cells, since some of the soils are very fine-grained and surface runoff cannot be completely ruled out. However, these sub-areas only have a small extent, as can be seen from the modelled direct runoff of the mGROWA22 model (LBEG, 2023). Assuming a runoff generation on these areas, after passing the low-permeability soil layers surficially, a subsequent seepage into neighboring sandy soils can be assumed. The major advantage of the model simplification in the entire district is therefore significantly higher than the locally pronounced error caused by it.

In order to assess uncertainty and model quality in relation to the water balance components, model comparisons were carried out with two established water balance models. The soil moisture was compared for grass on loamy sand with the model AMBAV 2.0 (HERBST et al., 2021) and the groundwater recharge at a geest site with the model mGROWA22 (LBEG, 2022). In both cases, good agreement between the models was achieved (HYDOR, 2023).

Against the background of the ongoing climate change, an intensification of the hazard situation with regard to low-water and agricultural droughts is expected. Spatially and temporally high-resolution, area-specific tools for monitoring drought and dryness will therefore provide important information and decision-making bases for the stakeholders in agricultural and nature conservation practice as well as for administrations in the future. This study presents a drought modeling approach adapted to the needs of the local practitioners as a basis for future drought risk management and leaves space for further development.

Datenverfügbarkeit

Die Modellierung basiert auf frei verfügbaren Daten des Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html) und frei verfügbaren Daten von Landesbehörden (LBEG, NLWKN, LGLN, WSA), die auf Anfrage übermittelt werden. Darüber hinaus wurden Daten von Wasser- und Bodenverbänden bzw. Unterhaltungsverbänden und kommunalen Wasserversorgungsunternehmen verwendet, die nicht frei verfügbar sind.

Über den Vulnerabilitätskartendienst des Landkreises Cuxhaven sind die Forschungsergebnisse für Forschende und die breite Öffentlichkeit einsehbar: www.landkreis-cuxhaven.de/redirect.phtml?extlink=1&La=1&url_fid=3189.1822.1 (zuletzt aufgerufen am 22. Januar 2024).

Anschriften der Verfasser

Alexander Strom
Freiberuflicher Hydrogeologe, Berlin
alexander@strom-hydro.de

Jenny Kröcher
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.
Eberswalder Straße 84, 15374 Müncheberg
jenny.kroecher@zalf.de

Stephan Hannappel
Philipp Wolke
HYDOR Consult GmbH
Am Borsigturm 31, 13507 Berlin
hannappel@hydor.de
wolke@hydor.de

Christian Fokuhl
Landkreis Cuxhaven
Einrichtung 06 - GIS-Service
Vincent-Lübeck-Straße 2, 27470 Cuxhaven
c.fokuhl@landkreis-cuxhaven.de

Literaturverzeichnis

ARNOLD, J.G., R. SRINIVASAN, R. MUTTIAH, J. WILLIAMS (1998): Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development, J. Am. Water Resour. Ass. 34(1), 73-89.

ARNOLD, J.G., D.N. MORIASI, P.W. GASSMANN, K.C. ABBASPOUR, M.J. WHITE, R. SRINIVASAN, C. SANTHI, R.D. HARMEL, A. VAN GRIENSVEN, M.W. VAN LIEW, N. KANNAN, M.K. JHA (2012): SWAT: model use, calibration and validation, Trans. ASABE 55(4), 1491-1508.

BGR (2020): Bodenübersichtskarte 1 : 200.000 (BÜK 200), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Informationsgrundlagen/Bodenkundliche_Karten_Datenbanken/BUEK200/buek200_node.html (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

BKG (2023): Dürreatlas, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, https://tigis.bkg.bund.de/duerreatlas/ (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

BOEING, F., O. RAKOVEC, R. KUMAR, L. SAMANIEGO, M. SCHRÖN, A. HILDEBRANDT, C. REBMANN, S. THOBER, S. MÜLLER, S. ZACHARIAS, H. BOGENA, K. SCHNEIDER, R. KIESE, S. ATTINGER, A. MARX 2022): High-resolution drought simulations and comparison to soil moisture observations in Germany, Hydrol. Earth Syst. Sci. 26, 5137-5161. DOI: 10.5194/hess-26-5137-2022.

BUG, J., S. HEUMANN, U. MÜLLER, A. WALDECK (2020): Auswertungsmethoden im Bodenschutz. Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS), GeoBerichte 19, hrsg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover.

CAMMALLERI, C., C. ARIAS-MUÑOZ, P. BARBOSA, A. DE JAGER, D. MAGNI, D. MASANTE, M. MAZZESCHI, N. MCCORMICK, G. NAUMANN, J. SPINONI, J. VOGT (2021): A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO), Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 21(2), 481-495. DOI: 10.5194/nhess-21-481-2021.

DIN 4220 (2008): Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen), Ausg. 2008-11, hrsg. v. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, DOI: 10.31030/3181018.

DWD (2019): Berechnete tägliche Werte von charakteristischen Elementen aus dem Boden und dem Pflanzenbestand, Version v19.3, Deutscher Wetterdienst Climate Data Center, https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/derived_germany/soil/daily/historical/BESCHREIBUNG_derivgermany_soil_daily_historical_de.pdf (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

DWD (2020): REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge) – Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, Interner Bericht, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

DWD (2021): Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland, Version v21.3, Deutscher Wetterdienst Climate Data Center, https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/BESCHREIBUNG_obsgermany_climate_daily_kl_historical_de.pdf (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

ERTL, G., J. BUG, J. ELBRACHT, N. ENGEL, F. HERRMANN (2019): Grundwasserneubildung von Niedersachsen und Bremen – Berechnungen mit dem Wasserhaushaltsmodell mGROWA18, GeoBerichte 36, hrsg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen, Hannover.

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2023): European Drought Observatory (EDO), Europäische Kommission, https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1111 (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

FELIX, M.L., K. JUNG (2022): Impacts of Spatial Interpolation Methods on Daily Streamflow Predictions with SWAT, Water 14(20), 3340. DOI: 10.3390/w14203340.

GRÄLER, B., E.J. PEBESMA, G. HEUVELINK (2016): Spatio-Temporal Interpolation using gstat, The R Journal 8(1), 204-218, https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-014/index.html (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

HADELNER DEICH- UND GEWÄSSERVERBAND (2023): Telefongespräch am 29.03.2023.

HERBST, M., E. FALGE, C. FRÜHAUF (2021): Regionale Klimamodellierung – Perspektive Landwirtschaft, In: Regionale Klimamodellierung II – Anwendungen, hrsg. v. Deutscher Wetterdienst, promet 104, 55-62.

HYDOR (2021): Emslandplan 2.0: Nachhaltiges Wassermengenmanagement in die Fläche bringen, Abschlussbericht der HYDOR Consult GmbH, https://www.emsland.de/pdf_files/klima-und-umwelt/emslandplan-2-0-hydor-2021_4970_1.pdf (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

HYDOR (2023): Vulnerabilitätskartendienst – Modellierung der Gefahren durch Trockenheit und Dürre im Landkreis Cuxhaven, Abschlussbericht der HYDOR Consult GmbH, https://cuxland-gis.landkreis-cuxhaven.de/gisdata/vulnerabilitaet_trockenheit_duerre/HYDOR-Consult_Vulnerabilitaet-Trockenheit-Duerre_Landkreis-Cuxhaven_Abschlussbericht_2023_09_19 (zuletzt aufgerufen am 22. Januar 2024).

KLEIN, M. (2000): Langjähriger Wasserhaushalt von Gras- und Waldbeständen – Entwicklung, Kalibrierung und Anwendung des Modells LYFE am Großlysimeter St. Arnold, Dissertation am Institut für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück.

KRÖCHER, J., A. STROM, S. HANNAPPEL (2023): Wirkungsbetrachtung einer grundwasserangepassten Entwässerungsinfrastruktur in einem landwirtschaftlich geprägten Tieflandeinzugsgebiet in Nordwestdeutschland, Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 28, 135-146, https://doi.org/10.1007/s00767-023-00544-7.

LBEG (2007): GK 50 – Geologische Karte 1:50.000, Niedersächsisches Bodeninformationssystem NIBIS®, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, http://nibis.lbeg.de/cardomap3/ (zuletzt aufgerufen am 25. August 2023).

LBEG (2017): BK 50 – Bodenkarte von Niedersachsen 1 : 50.000, Kartenserver des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, http://nibis.lbeg.de/cardomap3/ (zuletzt aufgerufen am 25. August 2023).

LBEG (2022): Mittlere jährliche Grundwasserneubildung 1991 – 2020 (Methode mGROWA22), Kartenserver des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, http://nibis.lbeg.de/cardomap3/ (zuletzt aufgerufen am 25. August 2023).

LBEG (2023): Direktabfluss (Methode mGROWA22), Kartenserver des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®, Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, http://nibis.lbeg.de/cardomap3/ (zuletzt aufgerufen am 25. August 2023).

LGLN (2024): Digitales Landschaftsmodell (Basis-DLM), Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen, https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten_karten/topographische_geodaten_aus_atkis/dlm/digitale-landschaftsmodelle-dlm-atkis-144141.html (zuletzt aufgerufen am 9. Januar 2024).

LK CUXHAVEN (2000): Landschaftsrahmenplan für den Landkreis Cuxhaven – Endfassung 2000, hrsg. v. Landkreis Cuxhaven.

LÖPMEIER, F.-J. (1994): Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. Z. Bewässerungswirtsch. 29(2). 157-167.

MANN, M.E., S. RAHMSTORF, K. KORNHUBER, B.A. STEINMAN, S.K. MILLER, S. PETRI, D. COUMOU (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification, Science Advances 4(10), DOI: 10.1126/sciadv.aat3272.

MARX, A., L. SAMANIEGO, R. KUMAR, S. THOBER, J. MAI, M. ZINK (2016): Der Dürremonitor – Aktuelle Information zur Bodenfeuchte in Deutschland, Konferenzbeitrag zum Tag der Hydrologie am 17./18. März 2016 in Koblenz.

MUEBK (2019): Klimawirkungsstudie Niedersachsen – Wissenschaftlicher Hintergrundbericht, hrsg. v. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, Hannover.

MÜLLER, J. (2005): 30 Jahre forsthydrologische Forschung auf der Großlysimeteranlage in Britz – Zielstellung und Ergebnisse, Konferenzbeitrag auf der 11. Gumpensteiner Lysimetertagung am 5. und 6. April 2005.

NLWKN (2019): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Gesamtbericht des Projektes KliBiW – Themenbereich Niedrigwasser, hrsg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN-Schriftenreihe Grundwasser, Bd. 42, Norden.

NLWKN (2020): Grundwasserbericht Niedersachsen – Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation in den Trockenjahren 2018 und 2019, hrsg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN-Schriftenreihe Grundwasser, Bd. 41, Norden.

NLWKN (2021): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Abschlussbericht des Projektes KliBiW Phase 6 – Vertiefende Hochwasseranalysen, hrsg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN-Schriftenreihe Oberirdische Gewässer, Bd. 45, Norden.

NLWKN (2022): Grundwasserbericht Niedersachsen – Grundwasserbericht Niedersachsen – Sonderausgabe zur Grundwasserstandsentwicklung im Jahr 2021, hrsg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN-Schriftenreihe Grundwasser, Bd. 54, Norden.

PEBESMA E.J. (2004): Multivariable geostatistics in S: the gstat package. In: Computers & Geosciences (30), S. 683-691.

RAUTHE, M., H. STEINER, U. RIEDIGER, A. MAZURKIEWICZ, A. GRATZKI, (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), 22(3), 235-256. DOI:10.1127/0941- 2948/2013/0436.

SAMANIEGO, L., R. KUMAR, S. ATTINGER (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale, Water Resources Research 46. DOI: 10.1029/2008WR007327.

SAMANIEGO, L., R. KUMAR, M. ZINK (2013). Implications of Parameter Uncertainty on Soil Moisture Drought Analysis in Germany, Journal of Hydrometeorology, 14(1), 47-68. DOI: 10.1175/JHM-D-12-075.1.

SCHEIHING, K. (2019): Klimawandel in Niedersachsen und mögliche Folgen für die Grundwasserbewirtschaftung: ein Review, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 63, 85-97. DOI: 10.5675/HyWa_2019.2_2

STROM, A., J. KRÖCHER, P. WOLKE, S. HANNAPPEL, C. FOKUHL (in Veröffentlichung): Dürrerisikokarten als Instrument für ein lokales Dürrerisikomanagement in der Kulturlandschaft am Fallbeispiel des Landkreises Cuxhaven, KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, hrsg. v. DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef.

SVOBODA, M., D. LECOMTE, M. HAYES, R. HEIM, K. GLEASON, J. ANGEL, B. RIPPEY, R. TINKER, M. PALECKI, D. STOOKSBURY, D. MISKUS, S. STEPHENS (2002): The drought monitor. Bulletin of the American Meteorological Society, 83 (8), 1181-1190, https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/83/8/1520-0477-83_8_1181.xml (zuletzt aufgerufen am 25. August 2023).

THOBER, S., A. MARX., F. BOEING (2018): Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland, Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad, hrsg. v. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Leipzig.

UETRECHT, R.M., A.C. ELMORE, J.D. GUGGENBERGER, Z.D. HELWIG (2019): Practical considerations for kriging groundwater surfaces, Remediation 29(4), 83-91. DOI: 10.1002/rem.21615.

UFZ (2024): Entwicklung der Trockenheit im Jahr 2018, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, https://www.ufz.de/index.php?de=40990 (zuletzt aufgerufen am 22. Januar 2024).

UDATA (2015): Wasserhaushaltssimulationen, Versickerungstabellen und Versickerungskarten – Projekt: "Wasserwald im Privatwald der östlichen Lüneburger Heide in Niedersachsen" – Abschlussbericht, UDATA – Umweltschutz und Datenanalyse.

VIRTANEN, P., R. GOMMERS, T.E. OLIPHANT, M. HABERLAND, T. REDDY, D. COURNAPEAU, E. BUROVSKI, P. PETERSON, W. WECKESSER, J. BRIGHT, S.J. VAN DER WALT, M. BRETT, J. WILSON, K.J. MILLMAN, N. MAYOROV, A.R.J. NELSON, E. JONES, R. KERN, E. LARSON, C.J. CAREY, I. POLAT, Y. FENG, E.W. MOORE, J. VANDERPLAS, D. LAXALDE, J. PERKTOLD, R. CIMRMAN, I. HENRIKSEN, E.A. QUINTERO, C.R. HARRIS, A.M. ARCHIBALD, A.H. RIBEIRO, F. PEDREGOSA, P. VAN MULBREGT, SCIPY 1.0 MITWIRKENDE (2020): SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python, Nature Methods, 17(3), 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

WESSOLEK, G, K. BOHNE, W. DUIJNISVELD, S. TRINKS (2011): Development of hydro-pedotransfer functions to predict capillary rise and actual evapotranspiration for grassland sites, Journal of Hydrology 400(3-4), 429-437. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.059.

WWA (2018): Heatwave in northern Europe – summer 2018, World Weather Attribution, https://www.worldweatherattribution.org/attribution-of-the-2018-heat-in-northern-europe/ (zuletzt aufgerufen am 31. August 2023).

YU, M., J. ZHANG, L. WEI, G. WANG, W. DONG, X. LIU (2023): Impact of soil textures on agricultural drought evolution and field capacity estimation in humid regions, Journal of Hydrology, 626(Part A), 130257. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130257.

ZIMMERMANN, L., S. RASPE, C. SCHULZ, W. GRIMMEISEN, W. (2008): Wasserverbrauch von Wäldern – Bäume und Bestände verdunsten unterschiedlich stark, LWF aktuell 66/2008.

ZINK, M., L. SAMANIEGO, R. KUMAR, S. THOBER, J. MAI, D. SCHÄFER, A. MARX (2016): The German drought monitor, Environ. Res. Lett. 11. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074002.