



Landwirtschaftlicher Wasserhaushalt im Polder Scheidgraben (Brandenburg)

Katrin Drastig¹ · Lea Schmidtke¹ · Helen Jacobs¹ · Martin Recker²

Eingegangen: 29. Juni 2022 / Überarbeitet: 10. Oktober 2022 / Angenommen: 25. Oktober 2022 / Online publiziert: 29. Dezember 2022
© Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung

Ein prognostizierter erhöhter Wasserbedarf für die Bewässerungslandwirtschaft im Zuge des Klimawandels und drohenden längeren Trockenperioden stellt für die Verfügbarkeit der Grundwasserressourcen in Deutschland eine Herausforderung dar. Es ist abzusehen, dass die Landwirtschaft zukünftig noch stärker Grundwasserressourcen für die Bewässerung von Agrarflächen nutzen wird. In der vorliegenden Studie wird das nutzbare Grundwasserdargebot den Wassermengen für landwirtschaftliche Bewässerung im Polder Scheidgraben (Brandenburg) gegenübergestellt. Der landwirtschaftliche Wasserbedarf wird mithilfe des AgroHyd-Farmmodells für vier Jahre (2017–2020) schlagweise modelliert. Als Datengrundlage werden Klima, Boden- und pflanzenspezifische Daten verwendet und Betriebsdaten von vier Betrieben einbezogen. In den betrachteten trockenen Jahren 2018 und 2019 werden mehr als 20 % des potenziellen nutzbaren Wasserdargebots für die Bewässerung genutzt. Die Nutzung der Wasserressourcen durch die landwirtschaftliche Wasserentnahme in dem Gebiet kann zukünftig zunehmend ein Problem darstellen. In einigen Regionen Brandenburgs sind regionalspezifische Berechnungen für das Wassermanagement nötig, da es zu vielfältigen Konflikten und damit zu stetig wachsenden Herausforderungen für die Wasserbehörden kommt.

Schlüsselwörter Nutzbares Grundwasserdargebot · Landwirtschaftliche Bewässerung · Extremereignisse · AgroHyd Farmmodell · Wassernutzungsindex

Agricultural water balance in the polder Scheidgraben (Brandenburg)

Abstract

A predicted increase in water demand for irrigated agriculture in the wake of climate change, and the threat of more extensive periods of drought, poses a challenge to the availability of groundwater resources in Germany. In this study, water availability and water withdrawal for agricultural irrigation are calculated for the polder Scheidgraben (Brandenburg). The agricultural water demand in the Scheidgraben polder is modeled using the AgroHyd Farmmodel. Climate data, soil data, plant-specific data and operating data of all farms in the polder are used as a data basis. In the dry years 2018 and 2019, more than 20% of the potentially available water in the Scheidgraben polder was used for irrigation. The use of water resources by agricultural water withdrawals in the area may increasingly be a problem in the future. In some regions of Brandenburg, region-specific calculations for water management are necessary due to a wide range of conflicts and thus steadily increasing challenges for water authorities.

Keywords Water availability · Irrigation · Extreme events · AgroHyd Farmmodel · Water use index

✉ Katrin Drastig
kdrastig@atb-potsdam.de

Lea Schmidtke
lschmidtke@posteo.de

Martin Recker
martin.recker@opr.de

¹ Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e. V.,
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, Deutschland

² SG Abfall, Boden und Wasser, Landkreis Ostprignitz-Ruppin,
Bau- und Umweltamt, Neustädter Str. 14, 16816 Neuruppin,
Deutschland

Einleitung

Extremwetterereignisse wie Hochwasser (z. B. 2002, 2006, 2011, 2013 in Deutschland und 2017 im Landkreis Ostprignitz-Ruppin) oder lang andauernde Niedrigwasser- bzw. Dürreperioden (z. B. 2003, 2006, 2018, 2019) nehmen in ihrer Häufigkeit zu (Drastig et al. 2016a; Kliem und Georg 2017). Die durch das Klima bedingten Veränderungen in Temperatur und Niederschlagsverteilungen haben direkte Auswirkungen auf Mensch und Natur (LfU 2018). Wetterextreme können dort erhebliche Einbußen verursachen (Gömann et al. 2015). Höhere Wärmesummen wirken sich bei ausreichender Wasserversorgung positiv auf das Wachstum bestimmter Kulturarten aus. Zu hohe Temperaturen oder Trockenheit können allerdings Ertrags- oder Qualitätseinbußen u. a. durch ein zu frühes Abreifen von Getreide zur Folge haben. 2018 und 2019 hingegen hatten viele Regionen Deutschlands in den Sommermonaten mit hohen Temperaturen und Dürre zu kämpfen (DWD 2019). Für die Landwirtschaft lagen die Dürreschäden im Jahr 2018 im einstelligen Milliardenbereich, wobei folgende Bundesländer besonders stark betroffen waren: Niedersachsen mit 980 Mio. €, Mecklenburg-Vorpommern mit 351 Mio. €, Schleswig-Holstein mit 422 Mio. €, Sachsen mit 308 Mio. €, Brandenburg mit 260 Mio. € sowie Sachsen-Anhalt mit 237 Mio. € (STATISTA 2018).

Es erscheint notwendig, die bestehende Infrastruktur zur Wasserversorgung besser an extreme Witterungsbedingungen anzupassen. Dabei müssen die Interessen der Nutzer und Akteure sowie der Ökologie berücksichtigt werden. Ein Weg, die Bewirtschaftung der Wasserressourcen zu planen, besteht in einer Analyse hydrologisch-wasserwirtschaftlicher Systeme. Die Analyse von hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Systemen stellt eine Kombination von Wasserhaushaltsanalysen, Wasserdargebotsermittlungen und anderen hydrologischen Untersuchungen mit wasserwirtschaftlichen Planungs- und Bewirtschaftungsuntersuchungen und Planungen in hydrologischen Systemen dar. Probleme bei der Bewirtschaftung resultieren meist aus der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung sowie durchgeführten Wasserhaushaltsmaßnahmen wie Flussbegradigungen, Trockenlegung natürlicher Feuchtgebiete, Flächenstilllegungen etc. (Lahmer und Becker 1998). Bedingt durch ein zeitweise niedriges nutzbares Wasserdargebot kann es zu Konflikten einzelner Verbraucher- und Interessensgruppen in der Wasserverteilung kommen. Zu nennen wären beispielsweise Konflikte zwischen den Systemdienstleistungen Versorgung, Regulierung und kulturellen Dienstleistungen (Behboudian et al. 2021; Gutzler et al. 2015).

Wasserdargebot bezeichnet die für eine bestimmte Zeit aus dem natürlichen Wasserkreislauf zur Verfügung stehende nutzbare Menge an Süßwasser; nutzbares Wasserdargebot umfasst einen Teil des Wasserdargebots und be-

inhaltet meist neben den ökonomischen auch ökologische Einschränkungen (UBA 2019). Der ökologische Mindestabfluss entspricht dem langfristigen jährlichen Abfluss, der erforderlich ist, damit die ökologischen Qualitätsziele für die mit dem Grundwasserkörper in Verbindung stehenden Oberflächengewässer erreicht werden und damit jede signifikante Verschlechterung des ökologischen Zustands dieser Gewässer und jede signifikante Schädigung der mit ihnen in Verbindung stehenden Landökosysteme vermieden wird (EU 2000). Im Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg (MLUK 2021) wird der ökologische Mindestabfluss auf den hydrologisch möglichen Wert abgesenkt, wenn das natürliche Wasserdargebot nicht ausreicht, um die ökologisch begründete Mindestwasserführung sicherzustellen.

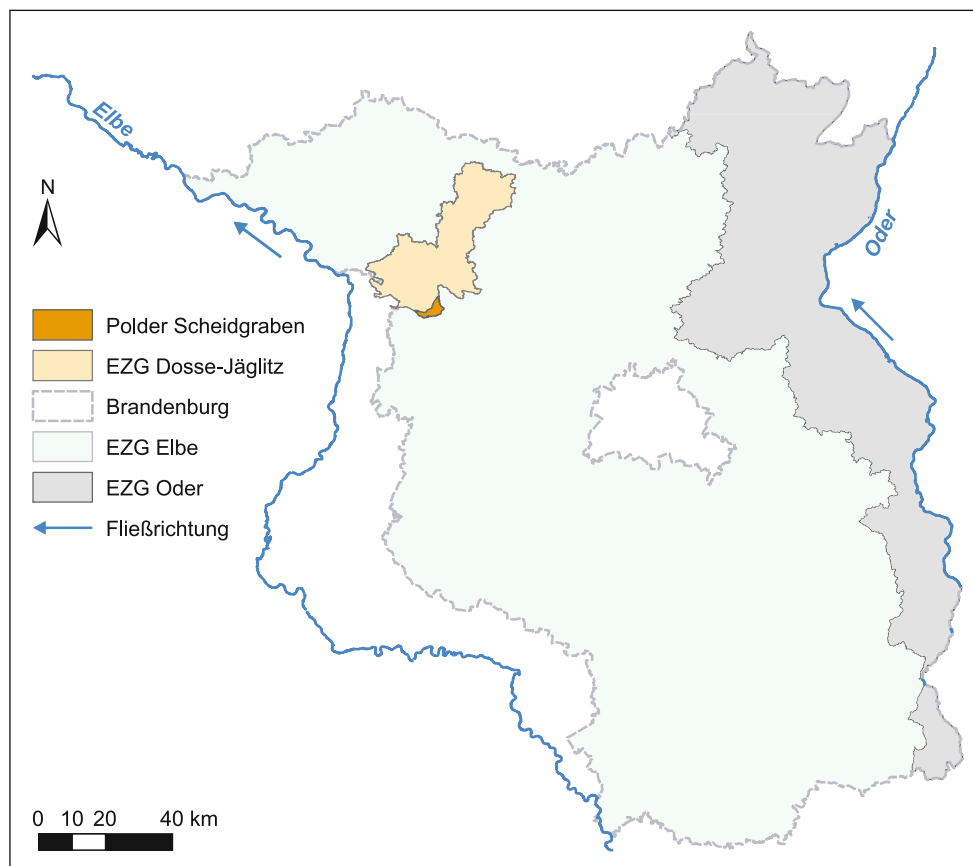
Wasserhaushaltsuntersuchungen für die südlichen Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (Kopp et al. 2018) und für Niedersachsen (Herrmann et al. 2017) sowie Grundwasserhaushaltsuntersuchungen für Mecklenburg-Vorpommern (Hennig und Hilgert 2021) zeigen Tendenzen zu einer abnehmenden Grundwasserneubildung. Eine erhöhte Temperatur und eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- auf das Winterhalbjahr werden die Nutzungskonflikte zwischen Verbraucher- und Interessensgruppen verschärfen und weitere Anpassungsmaßnahmen erforderlich machen, da deshalb die Verdunstung zunimmt und weniger Niederschlagswasser in der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Bereits in den letzten drei Jahren konnte vom Landkreis Ostprignitz-Ruppin eine erhebliche Zunahme von Anträgen auf wasserrechtliche Erlaubnisse für die Entnahme von Grundwasser zu Berechnungszwecken festgestellt werden.

In Brandenburg ist es seit 1881 etwa 1,3 °C wärmer geworden. Die Menge des Niederschlags hat seit 1881 zugenommen. Dies gilt insbesondere für den Winter: Die Winterniederschläge haben sich seit dem Winter 1881/82 bis heute um 20 %, relativ zu 1961–1990, erhöht. In der Jahressumme sind es bis 2018 etwa drei Prozent mehr als noch vor 137 Jahren (DWD 2019). Klimatische Wasserbilanzen wurden bereits mehrfach für Brandenburg oder für innerhalb des Bundeslandes liegende Einzugsgebiete (EZG) berechnet (Grünwald 2010; LfU 2018). Die Klimatische Wasserbilanz (KWB) ist gemäß DIN 4049-3 (1994) -10 die Differenz zwischen Niederschlagshöhe und potenzieller Verdunstung (ET_{pot}) für einen Betrachtungsort in einer Betrachtungszeitspanne. Für Grundwasserleiter (GWL), die über die oberflächennahe ungesättigte Zone gespeist werden, entspricht die KWB näherungsweise der Grundwasserneubildung (GWN):

$$N - V = \text{Abfluss} = \text{GWN}$$

Abb. 1 Lage Polder Scheidgraben im Einzugsgebiet (EZG) Dosse-Jäglitz und Bundesland Brandenburg mit den EZG Elbe und Oder (LUA 2016)

Fig. 1 Location of the Polder Scheidgraben in the Dosse-Jäglitz catchment (EZG) and the Federal State of Brandenburg with the Elbe and Oder catchments (LUA 2016)



mit N: Niederschlag, V: Verdunstung, als langjährige Mittelwerte.

So ermittelte Grünewald (2010) eine Wasserbilanz für die Region Berlin-Brandenburg im Zeitraum zwischen 1961–1990. Dabei stellte sich heraus, dass der Wasserhaushalt durch die geringen Niederschlagswerte von 550–650 mm/a, sowie der hohen potenziellen Verdunstungsrate von 600–650 mm/a als problematisch einzustufen ist. Das Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU 2018) hat das Grundwasserdargebot für die Region Brandenburg berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass weniger Wasser für die Versorgung unterschiedlicher Verbrauchergruppen entnommen wird, als das Dargebot an Grundwasser umfasst. Nach Bednorz et al. (2022) stehen aktuell 178.058 m³/d als nutzbares Grundwasserdargebot in Brandenburg zur Verfügung. Das Grundwasserdargebot ist ein Teil des oben beschriebenen Wasserdargebots und umfasst alle positiven Glieder der Wasserhaushaltsgleichung für einen Grundwasserabschnitt, z. B. Grundwasserneubildung aus Niederschlägen und die Zusickerung aus oberirdischen Gewässern für einen Grundwasserabschnitt. Das nutzbare Grundwasserdargebot umfasst einen Teil dieses Grundwasserdargebots und beinhaltet, wie das nutzbare Wasserdargebot, meist neben den ökonomischen auch ökologische Einschränkungen. Die Europäische Gemeinschaft legte in

der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 fest, dass das nutzbare Grundwasserdargebot der Grundwasserneubildung abzüglich eines ökologischen Mindestabflusses entspricht (EU 2000): „Der Grundwasserspiegel im Grundwasserkörper ist so beschaffen, dass die verfügbare Grundwasserressource nicht von der langfristigen mittleren jährlichen Entnahme überschritten wird. Dementsprechend unterliegt der Grundwasserspiegel keinen anthropogenen Veränderungen, die

- zu einem Verfehlen der ökologischen Qualitätsziele gemäß Artikel 4 für in Verbindung stehende Oberflächengewässer,
- zu einer signifikanten Verringerung der Qualität dieser Gewässer,
- zu einer signifikanten Schädigung von Landökosystemen

führen würden, die unmittelbar von dem Grundwasserkörper abhängen, ...“

Die Grundwasserneubildung wird gemäß DIN 4049-3 (1994) als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ definiert und ist ein wichtiges Maß für die natürliche Regenerationsfähigkeit der Grundwasserressourcen. Nach Dörhöfer und Josopait (1997) erfolgt die Grundwasserneubildung flächenhaft überwiegend durch Zusickerung von Niederschlagsanteilen. Das gilt in Lockergesteinsge-

bieten bis auf wenige Ausnahmeflächen. Die Züsickerung von Niederschlags- und Bewässerungswasseranteilen in die ungesättigte Zone wird als Sickerwasserbildung (SWB) bezeichnet.

Der Wassernutzungsindex besagt, ab welcher prozentualen Menge der Wassernutzung am Wasserdargebot in Deutschland die Wassernutzung nachhaltig ist oder zu Wasserstress führt (Alcamo et al. 2000; UBA 2019). Grundlage für die Berechnung des Wasserdargebots ist die Wasser- und Abflussbilanz für Deutschland. Sie ergibt sich aus den Zuflüssen aus den Nachbarländern abzüglich der Abflüsse in die Nachbarländer und in die Nord- und Ostsee sowie aus der Differenz von Niederschlägen und Evapotranspiration (UBA 2019). Ab einer Nutzung des potenziellen Wasserdargebots von 20 % herrscht eine Wasserknappeit (UBA 2019). Auch international liegt der Schwellenwert zum Wasserstress bei 20 %. Ein Wasserstress entsteht, wenn die Wassernutzung diesen Wert überschreitet. Ab 40 % spricht man von starkem Wasserstress (Alcamo et al. 2000). Diese Wasserknappeit wird entweder durch verstärkte Wasserentnahme oder durch Rückgang des natürlichen Wasserdargebots oder durch eine Kombination der beiden Faktoren bedingt.

In der vorliegenden Arbeit wird das nutzbare Grundwasserdargebot und der landwirtschaftliche Wasserbedarf mit Hilfe des AgroHyd-Farmmodells im Polder Scheidgraben bestimmt (Abb. 1). Der landwirtschaftliche Wasserbedarf umfasst transpiriertes Niederschlagswasser und transpiriertes Bewässerungswasser aus Oberflächenwasser (OW) und Grundwasser (GW). Es wird dabei detailliert der Einfluss der Kulturpflanzen auf den Wasserhaushalt und auf das GW untersucht. Weiterhin erfolgt ein Überblick über das nutzbare Grundwasserdargebot und die landwirtschaftlichen Wasserentnahmen für Bewässerung. Diese werden in das Verhältnis zueinander gesetzt und analysiert. Der Beobachtungszeitraum umfasst die Erntejahre 2017 bis 2020. Die landwirtschaftliche Wasserentnahme umfasst Bewässerungswasser aus OW und GW.

Anhand der Darstellung des Wasserhaushalts soll untersucht werden, ob ausreichend Wasser für die Pflanzenproduktion zur Verfügung stand. Die Darstellung der Wasserbilanzierung der einzelnen Jahre und der Grundwasserganglinien seit 1990 bis 2020 soll darüber Auskunft geben, inwieweit die Extremwetterereignisse der letzten Jahre Einfluss auf den Grundwasserstand nahmen und ob sich die hier vorgenommenen Wasserhaushaltsberechnungen in den Grundwasserganglinien widerspiegeln.

Untersuchungsgebiet Polder Scheidgraben

Der Polder Scheidgraben liegt im Landkreis Ostprignitz-Ruppin an der südlichen Spitze des Einzugsgebiets Dosse-

Jäglitz im Flusseinzugsgebiet der Elbe (Abb. 1). Der Polder wird durch die Fließgewässer Rhinkanal im Süden und Scheidgraben im Westen, sowie östlich von Neustadt (Dosse) über Dreetz bis hin zum Dreetzer See eingeschlossen. Bei der westlichen Gebietsgrenze, dem Gewässer Scheidgraben, handelt es sich um einen künstlichen Gewässerabschnitt. Der Polder ist ebenfalls durch ein künstliches Grabensystem gekennzeichnet, welches zu Be- und Entwässerungszwecken angelegt wurde. Das ökologische Potenzial des Polders verfehlt durch mäßige Einstufung die Vorgaben der WRRL (LUGV 2015). Weitere Kennzeichen des Untersuchungsgebiets befinden sich in Tab. 1.

Der Polder Scheidgraben befindet sich im Bereich des Grundwasserkörpers Rhin (LfU 2021b) und untergeordnet im Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz (LfU 2021a) (Abb. 2) am Rand des Urstromtals. Ein Teil des Polders im Bereich des Grundwasserkörpers Rhin gehört zu dem europaweiten Schutzgebietsnetz Natura 2000 und ist Teil des 13.943 ha großen Vogelschutzgebietes (SPA) Unteres Rhinluch/Dreetzer See, Havelländisches Luch und Belziger

Tab. 1 Kennzeichen der drei Untersuchungsgebiete (Statistik Berlin-Brandenburg 2020; DWD 2021; MLUL 2016; LUGV 2015; LBGR 1998)

Table 1 Characteristics of the three study areas (Statistik Berlin-Brandenburg 2020; DWD 2021; MLUL 2016; LUGV 2015; LBGR 1998)

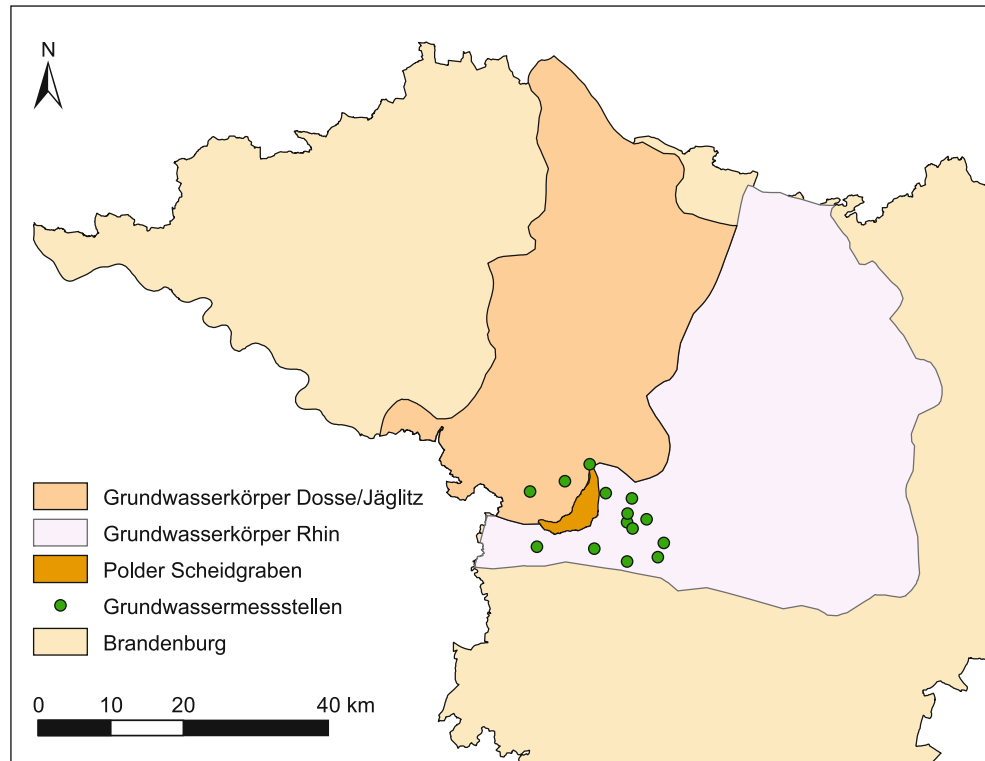
Mittlere jährliche Niederschlagssumme [mm]	553 ^a
Fläche [km ²]	20,1
Mittlere jährliche Temperatur [°C]	10,5 ^b
Grundwasserleiter	Bereich Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz (HAV_DJ_1; LfU 2021a) und Grundwasserkörper Rhin (DEGB_DEBB_HAV_RH_1; LfU 2021b). 1. GWL: quartäre unbedeckte Mittel- und Grobsande (GWL 1.1 weitgehend unbedeckter GWL der Urstromtäler und Niederungen). 2. GWL: quartäre bedeckte Mittel- und Grobsande (GWL 2.1 und GWL 2.2 bedeckter gebietsspezifischer GWL). 3. GWL: tertiäre/quartäre Mittel- und Grobsande (GWL 3.1 GWL/Quartär, GWL 3t GWL/Tertiär)
Landwirtschaftliche Betriebe	4
Bewaldete Landfläche	1708,5 ha
Grünland	38 %
Ackerbau	45 %

^a 2017–2020

^b 1991–2015

Abb. 2 Lage der untersuchten Grundwassermessstellen und des Polders Scheidgraben innerhalb der beiden Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz (HAV_DJ_1; LfU 2021a) und Rhin (DEGB_DEBB_HAV_RH_1; LfU 2021b)

Fig. 2 Location of the investigated gauges and the polder Scheidgraben within the two groundwater bodies Dosse/Jäglitz (HAV_DJ_1; LfU 2021a) and Rhin (DEGB_DEBB_HAV_RH_1; LfU 2021b)



Landschaftswiesen (LUGV 2014a) und des FFH-Gebiets „Unteres Rhinluch – Dreetzer See“. Die Niederungen in diesem FFH-Gebiet weisen Grundwasserflurabstände von 0 bis 80 cm auf. Diese oberflächennahen Grundwasserstände waren die Voraussetzung für die Entstehung der Niedermoore im Gebiet. Die Grundwasserstände im Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz variieren zwischen 75 mNN im Nordosten auf der Ruppiner Heide und 24 mNN im Süden im Bereich der verschiedenen Polder (LUGV 2015). Die Grundwasserflurabstände des 1. Grundwasserleiters (GWL) betragen in den Niederungen und im unbeeinflussten Zustand laut LBGR (2021) ca. 50–200 cm. Informationen zur Ausdehnung und stratigraphischen Einordnung der GWL im Polder Scheidgraben befinden sich in Tab. 1 und Abb. 2. Seit Mitte des letzten Jahrhunderts ist ein Abwärtstrend bei den Wasserständen des 1. GWL im Gebiet der Dosse festzustellen (MUGV 2013).

Die Böden im Süden des Untersuchungsgebiets bestehen überwiegend aus Mooren und Anmooren. Die Bodenwertzahlen sind im Poldergebiet gering bis mittel einzustufen (30 bis >50, LBGR 2021). Bodenwertzahlen bilden das Verhältnis der Ertragsfähigkeit der geschätzten zur ertragsfähigsten Bodenfläche ab. Für das Ackerland erfolgt dies durch die Bodenzahl und Ackerzahl. Die Bodenzahlen für Acker verdeutlichen die durch Bodenbeschaffenheit (Bodenarten, geologische Herkunft, Zustandsstufen) bedingten Ertragsunterschiede. Die Ackerzahlen werden durch Zu- oder Abschläge von der Bodenzahl nach dem Einfluss von

Klima, Geländegestaltung u. a. auf die Ertragsbedingungen ausgewiesen. Die nutzbare Feldkapazität ist im Norden des Gebiets als sehr gering (<13 Vol.-%) und im Süden als sehr hoch (>30 Vol.-%) einzustufen. Die Humusgehalte des Oberbodens liegen besonders im Süden des Untersuchungsgebiets bei >30 % (LBGR 2021).

Der Polder dient vor allem der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und bei Hochwasser als Überflutungsfläche; er ist als Hochwasserrisikogebiet mit mittlerer und geringer Hochwasserwahrscheinlichkeit eingeordnet (LUGV 2015). Im Untersuchungszeitraum 2017–2020 wurde im Polder 85 % der Fläche landwirtschaftlich bewirtschaftet (Tab. 1).

Daten

Erträge im Polder Scheidgraben

Betriebsdaten und Pflanzenparameter

Im Untersuchungsgebiet des Polders Scheidgraben befinden sich insgesamt vier landwirtschaftliche Betriebe, von welchen die folgenden Daten erhoben wurden (Tab. 1, Tab. 5 im Anhang): Schlaggröße und Lage, Hauptfrucht, Aussaatdatum und Erntedatum. Pflanzenspezifische Informationen stehen im AgroHyd Farmmodell (Drastig et al. 2013, 2012) eingepflegt zur Verfügung (siehe Tab. 5 und 6 im Anhang). Die Pflanze Lupine wurde in die Datenbank neu aufgenommen.

Tab. 2 Grundwasserbürtige und oberflächenwasserbürtige Bewässerungsmengen [m³]

	2017	2018	2019	2020
Betrieb 1	239.023	151.290	278.309	200.591
Betrieb 4	k. A.	51.840	51.840	17.280
Summe	239.023	203.130	330.149	217.871

men (TLLLR 2020; Eulenstein et al. 2005). Weiterhin wurde Spargel mit 50 Erntetagen um Spargelkulturen mit 40, 60 und 80 Erntetagen ergänzt (Leske 2011; Kadau 2005). Die in den Betrieben erhobenen Bewässerungsmengen sind in Tab. 2 und 3 dargestellt. Das Grundwasser zur Bewässerung wird in einem Betrieb aus dem 2. GWL entnommen.

Im nassen Jahr 2017 wurde mit 47ha deutlich weniger Fläche als in den Folgejahren mit 76 bis 120ha beregnet. Da teilweise der Zeitpunkt der Bewässerung nicht mehr bekannt war, wurden anhand der Klimadaten und eigener Expertise, Zeitpunkte der Bewässerungsgaben retrospektiv festgelegt. Im Betrieb 4 wurde Spargel im Modell unmittelbar nach der Ernte (2017, 2018, 2019) mit einer Wassergabe zwischen 20 und 60mm bewässert. Im Betrieb 1 wurden Bewässerungstermine und die Wassermenge pro Termin für das Jahr 2020 vollständig übermittelt – für die anderen Jahre war nur die Jahresmenge an Bewässerungswasser bekannt. Die Anzahl der Bewässerungsgaben und die Bewässerungsmenge wurden hier anhand der bekannten Jahresmenge, der Anbaukultur, den Daten aus 2020 und den Niederschlägen folgendermaßen geschätzt/festgelegt: Wassergabe 1 und 2 wie im Mittel 2020 (Tage nach Aussaat),

Wassergabe 3: 14 Tage nach Wassergabe 2. Sofern Niederschläge am Vor- und am Bewässerungstag stattfanden, wurde der Bewässerungszeitpunkt im Modell vorverlegt.

Klima- und Bodendaten

Die verwendeten Klimadaten in täglicher Auflösung stammen von den Wetterstationen DWD_02794_Kyritz und DWD_03552_Neuruppin des DWD in ca. 50km Entfernung (DWD 2021). Diese wurden über einen Inverse Distance Weighting (IDW)-Algorithmus kombiniert. Die verwendeten Daten waren: Niederschlag [mm], Sonnenscheindauer [h], Dampfdruck [hPa], Luftdruck [hPa], relative Luftfeuchtigkeit [%] und Temperatur [°C]. Nach dem Import der Daten wurden Fehlstellen ebenfalls mit dem IDW-Algorithmus ergänzt.

Die Bodendaten der Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1:300.000, BÜK 300 (LBGR 2021) wurden verwendet.

Grundwasserganglinien

Da sich direkt im Polder Scheidgraben nur die Grundwassermessstelle (GWM) „Neustadt Birkenweg“ befindet, wurden Informationen von 13 weiteren GWM der näheren Umgebung herangezogen – die maximale Entfernung der GWM vom Polder war dabei 11 km (Abb. 2). Es wurden hierbei Messwerte vom Landesamt für Umwelt (LfU) ab dem Jahr 2000 bis 2022 verwendet, die in täglicher Auflösung vorliegen.

Tab. 3 Kulturen im Polder Scheidgraben**Table 3** Crops in the polder Scheidgraben

Angebaute Kultur	Summe der bewirtschafteten Flächen [ha]				Wassermenge [mm]	Zeitpunkt, Wassergaben
	2017	2018	2019	2020		
Hafer	1,5	0	0	0		
Möhren	22,2	13,3	0	2,6	20–60	Je zwei Wassergaben
Kartoffel	181,6	181,1	176,7	135,1	25–50	Ein bis zwei Wassergaben zur Blüte und/oder zum Zeitpunkt des Knollenansatzes
Körnermais	32,4	32,4	32,4	32,4		
Silomais	276,9	240,3	290,2	260,8		
Lupinen	0	0	13,4	0		
Sommergerste	1,5	0	0	0		
Sommerweizen	59,6	99,7	43,2	106,9		
Spargel	k,A	8,7	8,7	8,7	20–60	Unmittelbar nach der Ernte
Weide	9,1	2,8	–	6,7		
Wiese	687,2	647,3	661,9	626,5		
Wintergerste	260,0	159,0	112,3	132,0		
Winterrraps	113,1	142,7	75,3	61,0		
Winterroggen	5,7	162,4	21,3	48,0		
Wintertriticale	122,7	112,4	276,8	189,1		
Winterweizen	–	–	75,6	107,1		

Methoden

Modellierung mit dem AgroHyd-Farmmodell

Basierend auf dem ausgearbeiteten Rahmenwerk von Prochnow et al. (2012) wurde das Modellierungssystem AgroHyd-Farmmodell entwickelt, um hydrologische Prozesse zu identifizieren und Wasserflüsse innerhalb landwirtschaftlicher Systeme zu modellieren und zu quantifizieren (Drastig et al. 2013, 2012). Mit dem AgroHyd-Farmmodell wurden bereits verschiedene Bewirtschaftungsmaßnahmen untersucht, die die Wasserproduktivität in der pflanzlichen (Drastig et al. 2016a, b, 2019, 2020, 2021; Peth et al. 2017) und tierischen Produktion (Drastig et al. 2016c) erhöhen könnten. Mithilfe des AgroHyd-Farmmodells wurden die täglichen Wasserflüsse Referenzevapotranspiration (ET₀), tatsächliche Evaporation (E_{act}), Niederschlag (N), tatsächliche Transpiration (T_{act}), pflanzenspezifische Transpiration (T_c), Interzeptionsverdunstung und Versickerung modelliert (Drastig et al. 2016b). Modelliert wurde in dieser Studie im Bezugszeitraum der jeweiligen Kulturen für jeden landwirtschaftlichen Schlag im Polder Scheidgraben. Dieser beginnt einen Tag nach der Ernte der angebauten Kultur des Vorjahres und endet am Tag der Ernte der Kultur im beobachteten Jahr (Prochnow et al. 2012). Im Folgenden sind die Berechnungsschritte nach der „Dual crop coefficient“-Methode der FAO 56 dargestellt (Allen et al. 1998). Grundlage der Berechnung der T_{act} ist die Referenzevapotranspiration ET₀ [mm], die nach der Penman-Monteith-Formel ermittelt wird. Mit dem Bodenverdunstungskoeffizienten K_e [-] wird die tatsächliche Evaporation E_{act} [mm], die Verdunstung direkt aus dem Boden berechnet:

$$E_{act} = ET_0 \cdot K_e$$

K_e wird aus Bodeneigenschaften und Klimabedingungen bestimmt.

Mit dem korrigierten Transpirationskoeffizient K_{cb} [-], wird die kulturspezifische Transpiration T_c berechnet:

$$T_c = ET_0 \cdot K_{cb}$$

Das Teilergebnis kulturspezifische Transpiration T_c [mm] gilt unter ausreichend verfügbarer Bodenfeuchte. Wasserstress wird durch den Wasserstresskoeffizienten K_s [-] dargestellt. Die tatsächliche Transpiration T_{act} [mm] ergibt sich zu:

$$T_{act} = ET_0 \cdot K_{cb} \cdot K_s$$

K_s ist gegeben durch:

$$K_s = (TAW - D_r) / (TAW - RAW)$$

wobei D_r die Wurzelzonenerschöpfung [mm] ist. TAW ist das gesamte verfügbare Wasser in der Wurzelzone [mm], berechnet als:

$$TAW = (\Theta_{fc} - \Theta_{wp}) \cdot 1000 \cdot Z_r$$

mit Θ_{fc} , dem Wassergehalt bei Feldkapazität [mm/mm], Θ_{wp} , dem Wassergehalt bei permanentem Welkepunkt [mm/mm] und Z_r, der Wurzeltiefe [m].

Der verfügbare Bodenwassergehalt (RAW) wird beschrieben als

$$RAW = p \cdot TAW$$

p [-] ist ein pflanzenspezifischer Wert (Tab. 6), der den durchschnittlichen Anteil des TAW beschreibt, der den Pflanzen aus der Wurzelzone verfügbar ist, ohne dass es zu Trockenstress für die Pflanze kommt. Für ackerbauliche Kulturen in Brandenburg bewegt sich der Wert je nach Entwicklungsstadium der Pflanze im Bereich von 0,3 bis 0,7. Der Wasserstress für die Pflanze beginnt, wenn die Bodenfeuchte unter den Wert 1-p fällt. Um die Wasserverfügbarkeit für die Evapotranspiration zu bestimmen, wurde die Erschöpfung der Wurzelzone (D_r) mit dem täglichen Wasserhaushalt über einen einfachen bucket-Ansatz berechnet.

$$D_{r_i} = D_{r_{i-1}} - P_i + T_{act_i} + DP_i + I_i + E_{act_i} - I_{r_i}$$

mit D_{r_i} am Tag i [mm] und D_{r_{i-1}} am Ende des Vortages i-1 [mm]. P_i ist der Niederschlag am Tag i [mm], T_{act_i} am Tag i [mm], I_i die Interzeptionsverdunstung am Tag i [mm]. D_{p_i} der Wasserverlust aus der Wurzelzone durch Perkolations am Tag i [mm].

$$DP_i = P_i - I_i + I_{r_i} - T_{act_i} - D_{r_{i-1}} - E_{act_i}, \text{ mit } DP_i \geq 0$$

mit I_{r_i} [mm], der Bewässerung am Tag i. Die Interzeptionsverdunstung wurde nach von Hoyningen-Huene (1983) und Braden (1985) berechnet. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in Drastig et al. (2012) und Prochnow et al. (2012) verfügbar.

Die tatsächliche Evapotranspiration [mm] wird schließlich berechnet über:

$$ET_{act} = E_{act} + T_{act}$$

Für die Bewertung der Güte der Modellierungsergebnisse wurden modellierte ET_{act}-Werte mit Messwerten für

die ETact auf Basis von Lysimetermessungen der Weimarer Region in Thüringen (Mitteldeutschland) für die Kulturen Sommergerste, Winterweizen und Kartoffeln (Roth et al. 2005) und in Hessen (Mitteldeutschland) verglichen. Der visuelle Eindruck zeigte, dass die Werte der modellierten ETact in den Jahren 1983–1995 und den untersuchten Kulturen gut mit den mittleren beobachteten Daten aus Lysimetermessungen korrespondierten (Drastig et al. 2016a).

Untersuchung der Auswirkung der landwirtschaftlichen Wassernutzung auf die Grundwasserstände

Die Untersuchung der Auswirkung der landwirtschaftlichen Wassernutzung auf den Wasserhaushalt wurde mithilfe von Regressionen, Trendanalysen und visueller Einschätzung durchgeführt.

Lineare Regression I, Zeitraum: Vegetationsperioden 2017–2020: Der Einfluss des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs auf den Wasserhaushalt im Polder Scheidgraben auf das Grundwasser wurde anhand der aufsummierten Komponenten des landwirtschaftlichen Wasserhaushalts (ETact, Eact, Tact) für die Vegetationsperioden der Jahre 2017–2020 untersucht. Herangezogen wurden vier Werte der Grundwasserganglinien am jeweils 1. Oktober der vier modellierten Jahre. Für die Analyse des Zusammenhangs zwischen diesen Werten und den Grundwasserständen der einzelnen GWM wurde das Bestimmtheitsmaß (R^2) berechnet.

Lineare Regression II, Zeitraum: 1999–2022: Weiterhin wurden die Referenzevapotranspiration (ET_0) und der Niederschlag (N) für den Zeitraum 1999–2022 am Nordende des Polders in der Nähe der GWM „Neustadt Birkenweg“ basierend auf täglicher Auflösung in aufsummierter wöchentlicher und jährlicher Auflösung herangezogen. Hierbei wurde – für die wöchentlichen Werte – mit dem am nächstgelegenen Datum der entsprechenden Grundwassermessung und für die jährlichen Werte mit dem letzten Messwert Ende Dezember des jeweiligen Jahres verglichen. Für die Analyse des Zusammenhangs zwischen diesen Werten und den Grundwasserständen der einzelnen GWM wurde das Bestimmtheitsmaß (R^2) berechnet.

Trendanalyse des LfU: Die Trends der GWM wurden vom LfU untersucht – für diese Studie wurden die dort publizierten Werte herangezogen. Für die Messstellen wurden die Trends der aus den Einzelwerten ermittelten mittleren Jahresgrundwasserstände mittels linearer Regression berechnet und mithilfe eines T-Tests auf Signifikanz geprüft. Für diese Analysen mussten 30-jährige Messreihen vorhanden sein, wobei maximal zwei aufeinanderfolgende Fehljahre auftreten dürfen (LfU 2022a, b). Für die Messstellen „Friesack, an der Kirche neu“, „Friesack, Bahnüber-

führung“ und „Neustadt, Birkenweg“ liegt kein Trend vor, da die Beobachtungsreihen kürzer als 30 Jahre waren.

Visuelle Analyse, Zeitraum: Vegetationsperiode 2017–2019: Zur Untersuchung der Einflussnahme der berechneten Wasserhaushaltskomponenten auf die kurzfristige Dynamik der Grundwasserstände wurden Grundwasserganglinien des LfU der kumulierten täglichen Referenzevapotranspiration (ET_0) und den kumulierten täglichen Niederschläge (N) westlich des Polders in der Nähe der GWM Pegel Dreetz, 3 km südöstl. gegenübergestellt. Die Grundwassermessstelle befindet sich westlich des Polders. Dieser Pegel wurde gewählt, da hier ein Trend berechnet werden konnte und er sich im Grundwasserkörper Rhin befindet, wie auch der größte Teil des untersuchten Polders. Es wurden dabei jeweils die Vegetationsperioden im feuchten Jahr 2017 und in den zwei extrem trockenen Jahren 2018 und 2019 untersucht.

Berechnung Wassernutzungsindex

Für die Aufstellung der GWN im Gebiet Polder Scheidgraben, wurden die schlagweise verfügbaren Ergebnisse der Modellierung mit dem AgroHyd-Farmmodel im Zeitraum zwischen 2017–2020 herangezogen. Damit wurden Bilanzgrößen zur Ermittlung des Grundwasserdargebots, des nutzbaren Grundwasserdargebots und des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs bereitgestellt. Aus den Ergebnissen lässt sich bestimmen, ob „Überschüsse bzw. Defizite im Wasserhaushalt“ abgebildet sind (Köstner et al. 2007). Übersteigen die Werte der Evapotranspiration in der beobachteten Region die des Niederschlags, so lässt sich dieser als Defizitstandort beschreiben. Wenn zudem durch den kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser der Wassermangel nicht ausgeglichen werden kann, liegt „potenziell Trockenstress und somit ein hoher Bewässerungsbedarf“ vor (Steidl et al. 2015). Die Sickerwasserbildung berechnet als Niederschlag (+Bewässerung) – ETact wurde hier als GWN angenommen. Die Verdunstung entspricht hierbei der aufsummierten tatsächliche Evapotranspiration, die für jeden einzelnen Schlag modelliert wurde. Entsprechend der WRRL wurde für die Berechnung des nutzbaren Grundwasserdargebots ein ökologischer Mindestabfluss von 30 % der GWN abgezogen (LUGV 2014b). Die ebenfalls für jeden einzelnen Schlag aufsummierte aktuelle Transpiration entsprach dem landwirtschaftlichen Wasserbedarf. Diese umfasste transpiriertes Niederschlagswasser und transpiriertes Bewässerungswasser aus Oberflächenwasser und Grundwasser. Der Bewässerungswassereinsatz wurde als landwirtschaftliche Wasserentnahme angenommen.

Der Wassernutzungsindex wurde über das Verhältnis jährliche landwirtschaftliche Wasserentnahme zum jährlichen nutzbaren Grundwasserdargebot berechnet. Der so berechnete Wassernutzungsindex entspricht somit einem

Tab. 4 Relevante Kenngrößen für das Wassermanagement im Polder Scheidgraben. ETact=tatsächliche Evapotranspiration, GWN=Sickerwasserbildung (N – ETact) angenommen als Grundwasserneubildung**Table 4** Relevant parameters for water management in the Scheidgraben polder. ETact= actual evapotranspiration, GWN=percolation (N – ETact) assumed as groundwater recharge

Zeitraum	2017 ^a	2018 ^a	2019 ^a	2020 ^a
<i>[mm]</i>				
Niederschlag	909	681	560	761
ETact	868	733	600	670
Landwirtschaftlicher Wasserbedarf (Tact)	630	508	424	478
Evaporation (Eact)	238	225	176	192
GWN ^c	41	-52	-40	91
Landwirtschaftliche Wasserentnahme: Bewässerung ^b	8	22	11	13
Fläche [km ²]	17,7	18,0	18,0	17,2
<i>[Mio m³]</i>				
Niederschlag	16,1	12,3	10,1	13,1
ETact	15,4	13,2	10,8	11,5
Landwirtschaftlicher Wasserbedarf (Tact)	11,2	9,1	7,6	8,2
Evaporation (Eact)	4,2	4,1	3,2	3,3
GWN ^c	0,7	-0,9	-0,7	1,6
Nutzbares Grundwasserdargebot ^d	0,5	-0,7	-0,5	1,1
Landwirtschaftliche Wasserentnahme: Bewässerung ^b	0,1	0,4	0,2	0,2
Wassernutzungsindex ^e [%]	28 %	>> 40 %	>> 40 %	19,8 %

^a Erntejahr Hauptfrüchte, Bezugszeitraum ,Vegetationsperiode Kulturen+ vorherige Brache‘^b genehmigte GW-Menge^c Zeitraum ,Vegetationsperiode Kulturen+ vorherige Brache‘^d GWN – ökol. Mindestabfluss^e Landwirtschaftliche Wasserentnahme/nutzbares Grundwasserdargebot

Demand-to-availability (DTA) ratio (Nilsalab et al. 2018; Smakhtin et al. 2004; Mila i Canals et al. 2009). „Demand“ umfasst dabei auch den ökologischen Wasserbedarf (Environmental water requirements, EWR) und das durch Menschen entfernte Wasser (Human water consumption, HWC). Trinkwasserentnahmen wurden dabei nicht berücksichtigt – der berechnete Wassernutzungsindex bezieht sich nur auf die landwirtschaftlichen Entnahmen. Trinkwasserentnahmen über den Wasserversorger Wasser- und Abwasserverband „Dosse“ wurden nicht berücksichtigt, da es diese im Bereich des Polders nicht gab. Auch das Wasser in den pflanzlichen landwirtschaftlichen Produkten wurde in der Bilanz vernachlässigt, da der Anteil verschwindend gering ist.

Ergebnisse

Landwirtschaftlicher Wasserhaushalt im Polder Scheidgraben

Im Polder Scheidgraben wurden GWN für die einzelnen Jahre des Beobachtungszeitraums berechnet: Im Zeitraum 2017–2020 betrug die ETact zwischen 600–868 mm, davon entfielen 71–73 % auf die tatsächliche Transpiration. Der Niederschlag variierte zwischen 560 und 909 mm. Es

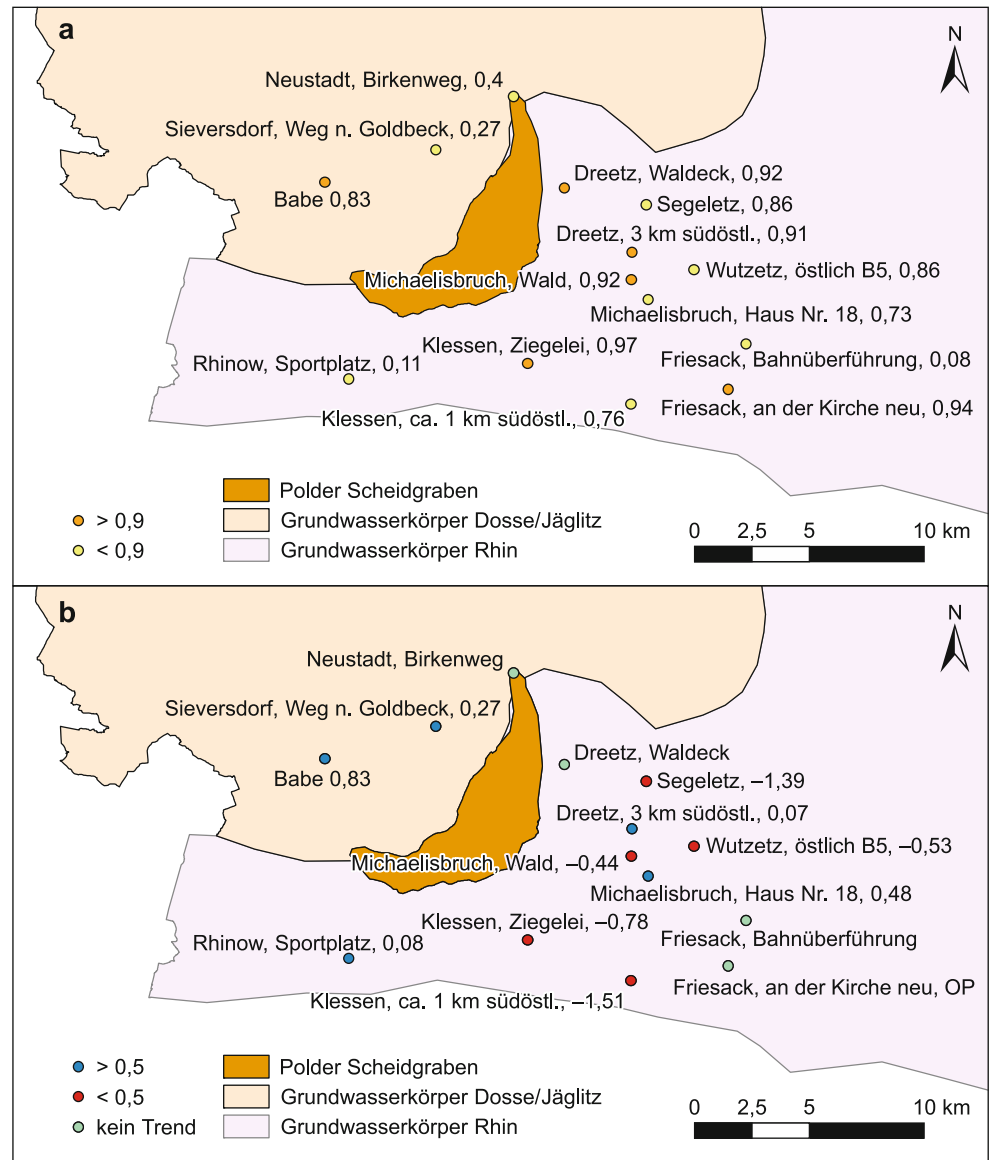
wurden zwischen 8 mm (2017) und 22 mm (2018) für die landwirtschaftliche Bewässerung eingesetzt. Nach der hier durchgeführten Modellierung mit dem AgroHyd-Farmmodell sind Defizitjahre in den beiden Dürre Jahren 2018 und 2019 zu erkennen. Der Wasserhaushalt schwankt abhängig von den Extremwetterereignissen, wie dem niederschlagsreichen Jahr 2017 im Vergleich mit den beiden trockenen Jahren deutlich. Das Verhältnis der landwirtschaftlichen Wasserentnahme zum nutzbaren Grundwasserdargebot ist im Jahr 2020 <20 % (Tab. 4). Hier ist die Wassernutzung entsprechend der WRRL als nachhaltig zu bezeichnen. In den Jahren 2017, 2018 und 2019 ergibt das Verhältnis landwirtschaftliche Wasserentnahme zum nutzbaren Grundwasserdargebot einen Wassernutzungsindex >20 %. Die Wassernutzung ist hier entsprechend der WRRL als nicht nachhaltig zu bezeichnen. In Tab. 4 wird das nutzbare Grundwasserdargebot, die landwirtschaftliche Wasserentnahme und der landwirtschaftliche Wasserbedarf mit Hilfe des AgroHyd-Farmmodells im Polder Scheidgraben dargestellt.

Einfluss auf das Grundwasser

Der Einfluss des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs im Polder Scheidgraben auf die Entwicklung der Grundwasserstände wird im Folgenden dargestellt. Die Grundwas-

Abb. 3 a Bestimmtheitsmaß (R^2) für den Zusammenhang zwischen aufsummierter, aktueller Transpiration im Polder Scheidgraben mit den Grundwasserständen der einzelnen Grundwassermessstellen (GWM) jeweils am Ende der Vegetationsperiode am 1. Oktober der vier Untersuchungsjahre; **b** Trends der untersuchten GWM

Fig. 3 a Coefficient of determination (R^2) for the correlation between the summed actual transpiration in the Scheidgraben polder and the groundwater levels of the individual gauges at the end of the vegetation period on October 1 of the four years under investigation; **b** Trends of the gauges investigated



serganglinien spiegeln die mittleren Werte der Wasserhaushaltsberechnungen im Polder Scheidgraben in den Grundwasserständen mit hoher Güte wider (Tab. 7). Der N, die ETact, die Tact (Abb. 3a) und die Eact der Vegetationsperiode in den vier Jahren zeigten bei sechs Pegeln einen Zusammenhang mit $R^2 > 0,9$. Auch die Messstellen „Neustadt, Birkenweg“, „Rhinow, Sportplatz“ und „Friesack, Bahnüberführung“ wiesen keinen bedeutenden Zusammenhang mit allen modellierten Wasserhaushaltsgrößen auf. Die letzten beiden GWM befinden sich in der näheren Umgebung des Polders Scheidgraben, „Neustadt, Birkenweg“ liegt aber möglicherweise nicht in der Strömungsrichtung des Grundwassers im Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz. Leider liegen gerade für die in der Nähe des Polders gelegenen GWM „Neustadt, Birkenweg“ und „Dreetz, Waldeck“ keine Trendanalysen vor, da die

Messreihen keine ausreichende Dauer für eine Auswertung aufweisen. Folgende Messstellen im Bereich des Grundwasserkörpers Rhin zeigen einen negativen Trend: „Dreetz, Waldeck“, „Klessen, ca. 1 km südöstl.“, „Klessen, Ziegelei“, „Michaelisbruch, Wald“, „Segeletz“ und „Wutzetz, östlich B5“. Drei GWM im Bereich des Grundwasserkörpers Rhin, zeigten positive Trends: „Dreetz, 3 km südöstl.“, „Michaelisbruch, Haus Nr. 18“ und „Rhinow, Sportplatz“. Im Bereich des Grundwasserkörpers Dosse/Jäglitz lässt sich kein Abwärtstrend erkennen: Messstellen „Babe“ und „Sieversdorf, Weg nahe Goldbeck“ (LfU 2022a) (Abb. 3b).

Die Korrelationen mit kumulierten Bilanzen zeigten folgendes Bild: Die Grundwasserganglinien spiegeln die kumulierten Werte ETact, Tact und Eact der Wasserhaushaltsberechnungen im Polder Scheidgraben in den Grundwasserständen in Dreetz Waldeck und Klessen, Ziegelei mit hoher

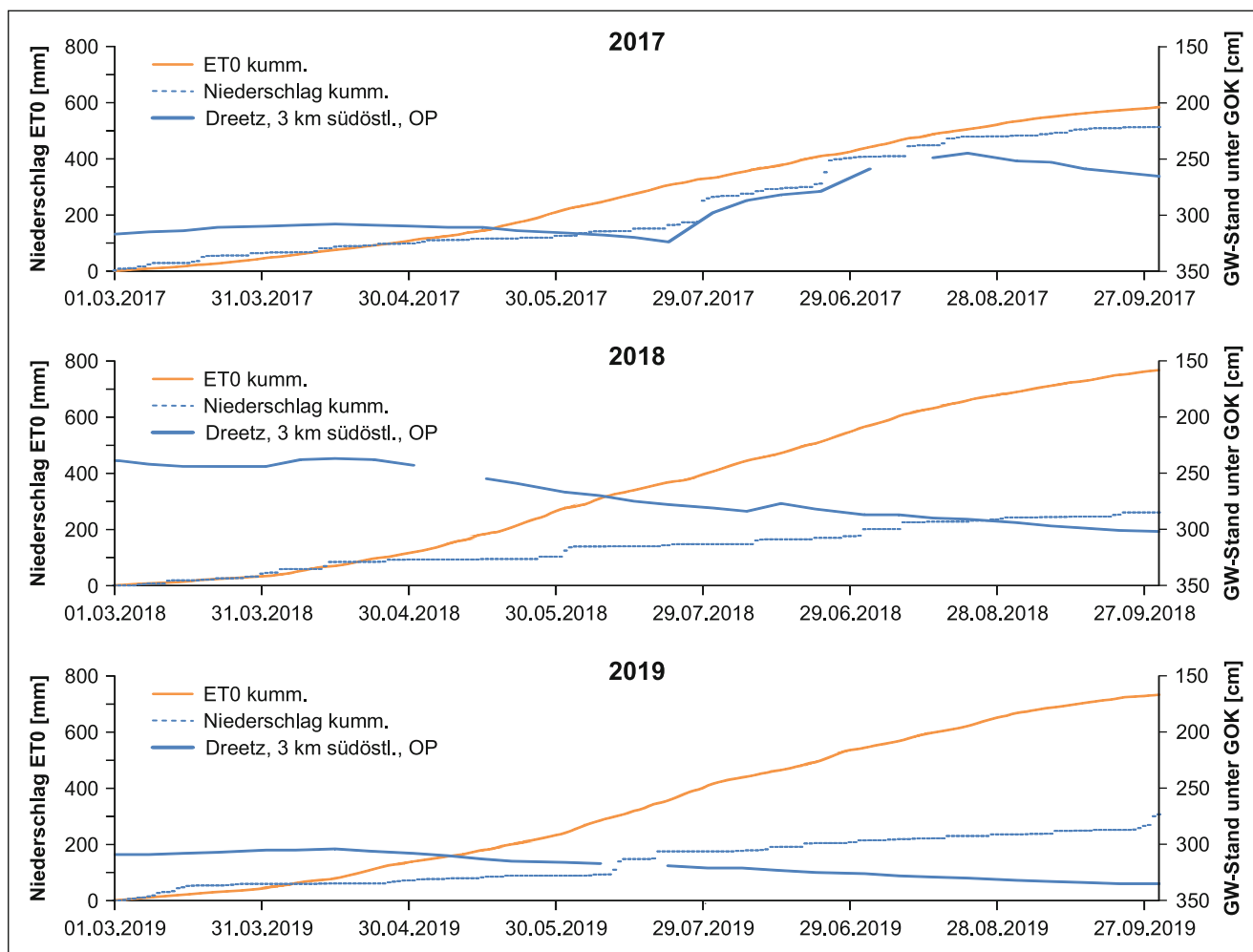


Abb. 4 Grundwasserstände unter Geländeoberkante (uGOK) an Grundwassermessstelle „Pegel Dreetz, 3 km südöstl.“, Wasserhaushaltskomponenten kumulierte Referenzevapotranspiration (kum. ET0) und kumulierter Niederschlag (kum. N) für die Jahre **a** 2017, **b** 2018, **c** 2019
Fig. 4 Groundwater levels below ground surface (uGOK) at the „Dreetz gauging station 3 km südöstl.“, water budget components of cumulative reference evapotranspiration (kum. ET0) and cumulative precipitation (kum. N) for years **a** 2017, **b** 2018, **c** 2019

Güte wider. Weitere Korrelationen mit $R^2 > 0,9$ zeigten die kumulierten Werte des Niederschlags mit Pegel „Klassen, ca. 1 km südöstlich“. Die kumulierten Werte der ETact zeigten einen engen Zusammenhang mit den Pegeln „Dreetz, 3 km südöstlich“ und „Segeletz“. Die kumulierten Werte der Tact zeigten einen engen Zusammenhang mit Pegel „Friesack, an der Kirche neu“.

Die berechneten Wasserhaushaltskomponenten ET0 und N modelliert für das Nordende des Polders in der Nähe der GWM Pegel „Dreetz, 3 km südöstlich“ spiegeln sich in der Dynamik der Grundwasserstände der Vegetationsperiode der drei extremen Untersuchungsjahre 2017–2019 wider (Abb. 4). Im feuchten Jahr 2017 spiegelt sich N in der Ganglinie direkt wider. Besonders gut sichtbar ist dies ab Juli 2017 – die Ganglinie steigt infolge der Niederschlagsereignisse stark an. Ab Ende August 2017 überlagert der Einfluss der ET0 diesen Effekt. Der Grundwasserspiegel sinkt trotz anhaltender leichter Niederschläge im gleichen Maß

wie die steigende ET0 auf 260 cm unter Geländeoberkante (uGOK) ab (Abb. 4a). In den trockenen Jahren 2018 und 2019 (Abb. 4b, c) sind die Niederschläge in den Ganglinien nahezu nicht erkennbar. Eine Ausnahme bilden die marginalen Effekte der Niederschlagsereignisse im April und im Juli 2018, die eine leichte Erhöhung der Ganglinie bedingen. Die ET0 in den beiden trockenen Jahren zeichnet sich im abnehmenden Grundwasserstand direkt ab. Im Jahr 2018 erfolgt eine Abnahme des Grundwasserstandes bereits im März von 270 auf 300 cm uGOK. Im Jahr 2019 liegt der Grundwasserstand im März bei unter 300 cm uGOK, die winterlichen Niederschläge haben den Grundwasserkörper nicht wieder aufgefüllt. Im Laufe des Jahres nimmt der Grundwasserstand bis auf 330 cm uGOK ab.

Diskussion

Erträge und landwirtschaftlicher Wasserhaushalt im Polder Scheidgraben

Für die niederschlagsarmen Jahre 2018 und 2019 werden während der Bezugszeiträume negative GWN berechnet. Das Jahr 2018 war bundesweit – seit Beginn der Aufzeichnung – eines der trockensten Jahre (DWD 2019). Auch im Scheidgraben sind 2019 die Niederschlagswerte auf den landwirtschaftlichen Schlägen besonders niedrig und die Verdunstung ist höher als der Niederschlag. Das im Boden bereits gespeicherte niederschlagsbürtige Wasser der letzten Jahre kann, bis zu einem gewissen Punkt, den Wasserbedarf ausgleichen. Theoretisch reicht in den trockenen Jahren das niederschlagsbürtige Wasser allerdings nicht für die im Polder Scheidgraben angebauten Kulturen aus – die aktuelle Evapotranspiration ist höher als der Niederschlag. Dennoch fallen im Scheidgraben die Ernteerträge einiger Kulturen besonders in diesen beiden Dürre Jahren höher aus als im Durchschnitt Brandenburgs. Der Silomaisertrag liegt im Scheidgraben bei 290 dt/ha. Im Vergleich zu Brandenburg mit 100 dt/ha macht das einen Unterschied von 190 dt/ha. Bei Kartoffeln und Körnermais liegen die Erträge jeweils ca. 50 dt/ha höher. Kartoffeln erzielten Erträge von 307 dt/ha und Körnermais 95 dt/ha. In Brandenburg lagen sie bei Kartoffeln nur bei 250 dt/ha, bei Körnermais bei 50 dt/ha. Dass die Erträge im trockenen Jahr 2018 dennoch höher ausfallen als im Durchschnitt Brandenburgs kann durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst worden sein. 2019 sind die Erträge im Scheidgraben ebenfalls höher als im Durchschnitt Brandenburgs. Eine Ausnahme bildet der Anbau von Kartoffeln. Dieser liegt mit 250 dt/ha rund 48 dt/ha unter dem Ertrag von Brandenburg mit 299 dt/ha. Besonders bei Silomais sind große Unterschiede zu erkennen – die Silomaiserträge weichen mit 350 dt/ha von denen in Brandenburg mit rund 160 dt/ha positiv ab. Die Erträge der Wiesen fallen mit 88 dt/ha doppelt so hoch aus wie in Brandenburg. Ebenfalls sind bei den Erträgen aller angebauten Getreidekulturen im Scheidgraben höhere Ernten als auf Bundeslandebene zu verzeichnen. Zu nennen ist hierbei besonders Winterroggen, welcher mit 122 dt/ha um 83 dt/ha positiv von dem Ertrag in Brandenburg abweicht. Die positiven Unterschiede könnten darin begründet sein, dass es sich bei dem Polder um einen grundwassernahen Standort handelt. Eine Besonderheit des Standortwasserhaushalts von Niedermooren ist, dass die Verdunstung unter den Bedingungen oberflächennahen Grundwassers potenziell, entweder direkt oder indirekt infolge von Kapillaraufstieg erfolgt (Miegel et al. 2016). Für diese Art von Standorten ist die Bilanzierung der Verhältnisse auf Schlägebene besonders anspruchsvoll und für viele Fragen, von der Bewässerung bis hin zur Wiedervernässung von Niedermooren,

aktuell von großer Bedeutung. Aus den modellierten Wasserflüssen lässt sich schließen, dass unter den extrem trockenen Bedingungen der Jahre 2018 und 2019 der landwirtschaftliche Wasserhaushalt im Untersuchungsgebiet Polder Scheidgraben defizitär ist.

Im normalen Jahr 2020 sind keine starken Abweichungen zu den Erträgen in Brandenburg zu erkennen (Statistik Berlin-Brandenburg 2018, 2019, 2020). Im feuchten Jahr 2017 sind vor allem im Anbau von Kartoffeln, mit 263 dt/ha, Defizite von 119 dt/ha im Vergleich zu Brandenburg mit 382 dt/ha zu erkennen. Der Ertrag von Körnermais lag in Brandenburg bei 88 dt/ha. Somit weichen die Erträge im Polder mit 78 dt/ha um knapp 10 dt/ha negativ ab. Auch bei den Weide- und Wiesenerträgen gab es Differenzen. Diese sind aber nur als gering einzustufen. Die negativen Abweichungen können auf die niederschlagsreichen Monate Juni und Juli zurückzuführen sein. Ende Juni 2017 kam es aufgrund von langanhaltenden Starkniederschlägen in weiten Teilen Brandenburgs zu Überschwemmungen (DWD 2019), so auch in Teilen des Scheidgrabens. Laut Befragung der Landwirte im Scheidgraben kam es aufgrund der Überschwemmungen und fehlender Abflussmöglichkeiten teilweise zu Totalausfällen der Ernten. Betroffen war besonders die Ernte von Kartoffeln und der Spätschnitt von Grünland. Es gab hingegen auch positive Abweichungen. Der Ertrag von Sommerweizen war im Scheidgraben mit 67 dt/ha mehr als doppelt so hoch wie im Durchschnitt Brandenburgs mit 31 dt/ha.

Einfluss der landwirtschaftlichen Nutzung auf das Grundwasser

Im Süden des Untersuchungsgebiets Polder Scheidgraben bestehen die Böden überwiegend aus landwirtschaftlich genutzten Niedermoorflächen. Der Wasserhaushalt der meisten Feuchtgebiete ist heutzutage einer Regulation unterworfen. In vielen Fällen wird damit der Austrocknung Vorschub geleistet, auch damit werden die Auswirkungen des Klimawandels verschärft (Wattendorf et al. 2010). Auch wenn die Grundwasserganglinien die mittleren Werte der landwirtschaftlichen Wasserhaushaltsberechnungen im Polder Scheidgraben der vier Untersuchungsjahre in den Grundwasserständen mit hoher Güte widerspiegeln, scheint eine direkte Einflussnahme der dort angebauten Kulturen auf die Wasserstände der untersuchten Pegel nicht sehr wahrscheinlich. Es kann nur eine uneinheitliche Auswirkung der Wassernutzung im Polder Scheidgraben auf die Absenkung der Grundwasserstände festgestellt werden: 55 % der Grundwasserganglinien zeigen einen negativen Trend, 45 % der Grundwasserganglinien einen positiven Trend. Es scheint sich eher um die Abbildung des Klimas und wasserwirtschaftlicher Regulationen auf regionaler Ebene zu handeln. Naturgemäß ist die horizontale Komponente der

Grundwasserströmung im Moor sehr viel stärker ausgeprägt als die vertikale, und entsprechend ist die horizontale Fließgeschwindigkeit viel größer als die vertikale. Dies erschwert die Identifizierung eines Zusammenhanges zwischen der Zusickerung des infiltrierten Niederschlagswassers und dem Grundwasser (Houben et al. 2001). Weiterhin wird das Grundwasser, welches in einem der vier Betriebe für die Bewässerung eingesetzt wird, aus dem 2. GWL entnommen. Die Informationen der Grundwassermessstellen beziehen sich auf den 1. unbedeckten GWL.

Bei der Auswertung der langfristig erhobenen Grundwasserstände kann keine eindeutige Auswirkung der Wassernutzung im Polder Scheidgraben auf die Absenkung der Grundwasserstände festgestellt werden. Differenziert nach den Grundwasserkörpern Rhin und Dosse/Jäglitz zeigt sich folgendes Bild: Im Grundwasserkörper Rhin zeigen 67% einen negativen Trend und 33% der GWM einen positiven Trend; im Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz zeigen alle Pegel einen positiven Trend. Eine Überbeanspruchung der Ressource Wasser im Polder Scheidgraben und Umgebung durch die landwirtschaftliche Wasserentnahme ist möglicherweise zu befürchten. In der vorliegenden Studie entspricht der landwirtschaftliche Wasserbedarf der aufsummierten tatsächlichen Transpiration, die für jeden einzelnen Schlag modelliert wurde. Diese umfasst transpiriertes Niederschlagswasser und transpiriertes Bewässerungswasser aus Oberflächenwasser und Grundwasser. Das Transpirationswasser wird als produktives Wasser angesehen, Evaporation als nicht produktiv genutztes Wasser. Zielsetzung in der Landwirtschaft muss es sein, den Anteil des produktiven Wassers, durch landwirtschaftliche Managementmaßnahmen auf den einzelnen Schlägen zu steigern. Nur wenn dies auch in den Bilanzierungen reflektiert wird, kann eine Bewertung und Planung in dieser Richtung durchgeführt werden. Transpiration und Evaporation werden in der hier vorgestellten Modellierung nach der „Dual crop coefficient“-Methode über die Modellierung voneinander unterschieden. Die Bewertung von Managementmaßnahmen kann so über die Trennung der Wasserflüsse Evaporation und Transpiration erfolgen. Im Polder Scheidgraben wurde circa ein Drittel der Evapotranspiration (27–29%) unproduktiv – als reine Evaporation – verdunstet. Die hier verwendeten Bewässerungstechniken „Beregnung“ und „Staubewässerung“ könnten möglicherweise effizienter gestaltet werden. Effizientere Bewässerungsverfahren und die Bewässerungssteuerung können die Verdunstungsverluste reduzieren und gleichzeitig den Wasserbedarf der Pflanzen decken sowie die Ertragsmenge und -qualität verbessern. Baroni et al. (2019) zeigen, dass Bewässerungssteuersysteme nützlich sind, um die gesamte Wasserentnahme und die Anpassungsstrategien der Landwirte an saisonale Veränderungen der Umwelt- und Landwirtschaftsbedingungen zu unterstützen. Nach Schimmelpfennig et al. (2018) entspre-

chen die in Deutschland eingesetzten Bewässerungstechniken nicht allen Anforderungen an eine effiziente Technik. Vor allem mit Blick auf den energetischen Aufwand und die Wasserverteilgenauigkeit besteht Verbesserungspotenzial der vorherrschenden Techniken. Hier im Polder könnten die Techniken möglicherweise verbessert werden. Zu den ackerbaulichen Maßnahmen, die eine verbesserte Ausnutzung des Niederschlagswassers und auch des Bewässerungswassers ermöglichen können, zählen nach Drastig et al. (2011) unter anderem:

- Fruchtfolgen und Zwischenfrüchte optimieren; Bodenbearbeitung: insbesondere Aufrauen der Oberfläche bzw. Aufbrechen von Krusten, um eine bessere Infiltration des Niederschlagswassers zu ermöglichen.
- Hohe Bestandsdichte: Ziel ist eine schnelle und lückenlose Bodenbedeckung und tiefe Durchwurzelung.
- Möglichst früh und zügig sähen, Saatgut eventuell vorkleimen, um einer Frühjahrstrockenheit zu begegnen.
- Humuswirtschaft: Ausbringen organischer Substanz, Mulchen, um die Evaporation von der Bodenoberfläche zu vermindern. Wahl trockenheitstoleranter Sorten bzw. von Sorten mit hoher Transpirationseffizienz.

Um wirksam zu werden, sollten diese Maßnahmen im gesamten landwirtschaftlichen Betriebssystem zur Anwendung kommen, gegebenenfalls ergänzt durch Maßnahmen zu einem verbesserten Wassermanagement in der Tierhaltung.

Vom Gesichtspunkt der Erhaltung der Artenvielfalt her zeigte sich, dass das Vorkommen epigäischer Spinnen durch starke Regenfälle oder Überschwemmungen bei der Bewässerung negativer beeinflusst wurde als durch den Einsatz bestimmter Insektizide, einschließlich systemischer Mittel (Radkova et al. 2019). Andererseits berichten verschiedene Autoren von einer hohen Wirbellosenvielfalt in Überschwemmungsgebieten (Peck et al. 2004). Weiterhin können Feuchtgebiete eine wichtige Rolle bei der Erhaltung verschiedener Vögel spielen (Herring et al. 2019). Walmsley und Cerdà (2017) zeigten, dass die Umstellung von Überflutungs- auf Tropfbewässerung negative Auswirkungen auf Regenwürmer haben kann, was zu einer Verringerung der Infiltrationskapazität des Bodens führen kann. Die Überflutungsbewässerung könnte also einen Beitrag zur Erhaltung der Artenvielfalt im Polder Scheidgraben leisten. Die Bedeutung der Überflutungsbewässerung für Feuchtgebietsarten müsste allerdings stärker auch für die lokalen Klima- und Bodenbedingungen untersucht werden, um in die künftigen Bewässerungspläne einbezogen werden zu können. Möglicherweise sollte die Wassermenge zur Deckung des Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft die Überflutung der wertvollen Überschwemmungsgebiete berücksichtigen, um die Integrität des Ökosystems zu erhalten.

Unsicherheiten

AgroHyd-Farmmodel

Die Modellierung der ET₀ beruht auf Klimadaten der nahegelegenen Wetterstationen. Um die Güte der Modellierung der ET₀ mit dem AgroHyd-Farmmodel zu verbessern, müssten die Klimadaten direkt auf den landwirtschaftlichen Schlägen gemessen und in die Modellierung eingespeist werden. Der Grund für die Unsicherheit der Modellierung der tatsächlichen Transpiration T_{act} ist, dass die gleichen Pflanzenparameter für verschiedene Sorten und auch für auch verschiedene Managementmaßnahmen, z. B. für verschiedene Düngungsstufe verwendet werden. Eine Kalibrierung mit der T_{act}, die über mindestens eine Vegetationsperiode gemessen wird, oder die Verwendung verbesserter spezifischer Pflanzenparameter (K_{cb}) und die Einbeziehung von Algorithmen, die die Managementmaßnahmen abbilden, könnten die Unsicherheit der modellierten Werte erheblich reduzieren. Auch die fehlende Berücksichtigung des kapillaren Aufstiegs vergrößert die Unsicherheiten der Modellierung. Bei den flurnahen Flurabständen von 0–80 cm und Wurzeltiefen um 50 cm kann kapillarer Aufstieg eine wichtige Rolle spielen.

Landwirtschaftlicher Wasserhaushalt

Es handelt sich bei der Berechnung der GWN um einen stark vereinfachten Ansatz, da Daten von nur vier Jahren einbezogen werden. In der Praxis werden zur Abschätzung des nutzbaren Grundwasserangebots im Rahmen von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen in der Regel mittlere langjährige Grundwasserneubildungsraten (> 30 Jahre) herangezogen. Diese überschätzen aber unter sich wandelnden Klimabedingungen für mehrjährige Trockenperioden die realen Bedingungen, was in einer Übernutzung des Angebots resultieren kann. Die modellierten Wasserflüsse ET_{act} und T_{act} im Polder Scheidgraben beziehen sich auf die Acker- und Sonderkulturen sowie Grünland während der Brachen und der Vegetationszeiträume. Um eine vollständige Bilanz aufzustellen, müssen ebenfalls mögliche Entnahmen durch Wasserwerke und sonstige Entnahmen im Polder mit einbezogen werden.

Fazit

Die extremen Witterungsbedingungen in Brandenburg in den Jahren 2017, 2018 und 2019 haben gezeigt, dass die bestehende Infrastruktur zur Wasserversorgung hinsichtlich Dürreperioden nicht ausreichend an die extremen Bedingungen angepasst ist. Um Ertragsrückgänge zu vermeiden, führt die zunehmende Trockenheit zu einem steigenden Be-

wässerungsbedarf in der Landwirtschaft (Fliß et al. 2021). Die Entwicklung eines integrierten Wasserressourcenmanagements unter Berücksichtigung der Zunahmen und Verstärkung von Extremereignissen, Niedrigwasser- bzw. Dürreperioden, unter Beachtung der Interessen der Nutzer und Akteure sowie der Ökologie stellt eine große Herausforderung für Entscheidungsträger dar. Es erscheint sinnvoll, nach Wegen zu suchen, die Wasserressourcen künftig so zu bewirtschaftet, dass unter den verschiedenen Gesichtspunkten Wasserhaushalt, Artenvielfalt und Ökonomie nachhaltig gehandelt wird. Aus Sicht der Landwirtschaft dürfte im Vordergrund stehen, dass der positive Beitrag zur Grundwasserneubildung stärker gesehen wird und dass die Erfordernisse der Landwirtschaft in Hinsicht auf die Bewässerung verbessert werden. Hier muss die Erhöhung der Bewässerungseffizienz im Vordergrund stehen (Michel und Sourell 2014), sofern nicht die Überflutungsbewässerung die Integrität des Ökosystems erhält. Einzubeziehen ist bei einer Bewertung weiterhin, dass in vielen Gebieten der Welt das Abholzen der einheimischen Vegetation und Bepflanzung mit Nutzpflanzen, die in der Regel ein flacheres Wurzelsystem haben als die natürliche Vegetation, welche sie ersetzen, zu erheblichen Veränderungen im Wasserhaushalt, einschließlich der Grundwasserneubildung führt. Je nach betrachteter Klimazone führt dies in der Regel zu einem Anstieg der Grundwasserneubildungsrate (Scanlon et al. 2007; Han et al. 2017). Weiterhin kann der Zufluss aus der Bewässerung in das Grundwasser die Erschöpfung des oberflächennahen Grundwassers abmildern. Dies wird allerdings durch eine Verdichtung der ungesättigten Zone erschwert. Dies kann den Anteil der potenziellen Anreicherung, der zu einer tatsächlichen Anreicherung wird, verringern und zu neuen Risiken für die Wasserqualität, wie z. B. Nitratverunreinigung, führen (Han et al. 2017). Landwirtschaftliche Nutzung kann also zu einer erhöhten Grundwasserneubildung führen. Bei diesem Zusammenhang muss natürlich beachtet werden, dass das Bewässerungswasser aus einem System entnommen wurde. Nach WRRL (EU 2000) darf dabei das genutzte (Grund-)Wasser nur der GWN abzüglich eines ökologischen Mindestabflusses entsprechen.

Eine Einschränkung der Wasserentnahmeerlaubnisse in Deutschland würde einen zu starken Anpassungsdruck auf die Betriebe ausüben und zu einer Extensivierung der Produktion führen. Die Auswirkungen dieser Anpassungsmaßnahme würden nicht nur für die Landwirtschaft, sondern auch auf den vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen spürbar werden (Michel und Sourell 2014). Die Aufmerksamkeit muss dementsprechend eher auf sparsame und effiziente Techniken und ein optimiertes Bewässerungsmanagement mit einer reduzierten unproduktiven Evaporation gelenkt werden (Michel und Sourell 2014). Je nach Wahl der Bewässerungstechnik und -steuerung lässt sich – in Abhängigkeit von den Standortinformationen – die je-

weils optimale Wassergabe bestimmen und eine sparsame Verwendung der wertvollen und knappen Wasserressource erreichen. Um den Bewässerungswassereinsatz effizienter zu gestalten, müssen die Anteile des unproduktiven Wassers bei der Planung betrieblicher Managementmaßnahmen verringert werden.

Im Zeitraum 2017–2020 betrug die tatsächliche Evapotranspiration im Polder Scheidgraben zwischen 600 und 868 mm, davon entfielen 71–73 % auf die tatsächliche Transpiration. Der Niederschlag variierte zwischen 560 und 909 mm. Es wurden zwischen 8 und 22 mm für die landwirtschaftliche Bewässerung eingesetzt. Nach der hier durchgeführten Modellierung mit dem AgroHyd-Farmmodell sind Defizitjahre in den beiden Dürre Jahren 2018 und 2019 zu erkennen. Der Wasserhaushalt schwankt abhängig von den Extremwetterereignissen, wie dem niederschlagsreichen Jahr 2017 im Vergleich mit den beiden trockenen Jahren 2018 und 2019 deutlich. Die Betrachtung des Wasserhaushalts in einem weiteren räumlichen und zeitlichen Kontext zeigt folgendes Bild: Die Grundwasserganglinien spiegeln die kumulierten Werte der tatsächlichen Evapotranspiration, der tatsächlichen Transpiration und der tatsächlichen Evaporation der Wasserhaushaltsberechnungen im Polder Scheidgraben in den Jahren 2017–2020 an zwei GWM mit hoher Güte wider. Bei der Auswertung der langfristig vom LfU erhobenen Grundwasserstände kann allerdings keine eindeutige Auswirkung der Wassernutzung im Polder Scheidgraben auf die Entwicklung der Grundwasserstände festgestellt werden. 55 % der Grundwasserganglinien der hier herangezogenen GWM zeigen einen negativen Trend, 45 % der Grundwasserganglinien einen positiven Trend.

Für die Entwicklung eines integrierten Wasserressourcenmanagements gilt es in Zukunft die folgenden Punkte zu beachten:

- Die Bilanzierung des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs im Detail für einzelne landwirtschaftliche Schläge erlaubt einen Einblick in den Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion und in den lokalen landwirtschaftlichen Wasserhaushalt.
- Bereits bekannte, ackerbaulichen Maßnahmen können als Anpassungsstrategie von Vorteil sein, um das vorhandene Niederschlagswasser effizienter zu nutzen.
- In zukünftigen Arbeiten muss präziser erhoben werden, wieviel Wasser und wann Wasser zusätzlich, bspw. durch Einstau, auf die landwirtschaftlichen Flächen geleitet wird.
- Die Datengrundlage und Zugänglichkeit der genehmigten Bewässerungsmengen aus Grund- und Oberflächenwasser muss verbessert werden.

Anhang

Tab. 5 Allgemeine Informationen der vier landwirtschaftlichen Betriebe im Polder Scheidgraben im Untersuchungszeitraum 2017–2020

Table 5 General information on the four farms in the polder Scheidgraben, study period 2017–2020

Information	Kennzeichen
Klassifizierung	Spezialisierte Ackerbaubetriebe, Spezialisierter Gartenbaubetrieb, Pflanzenbau – Viehhaltungsbetriebe
Summe der bewirtschafteten Fläche der Betriebe	17,1 km ² ± 1,09
Bewässerungsmethoden	Beregnung mit mobilen Beregnungsmaschinen (nach DIN 19655, 2008) aus dem 2. Grundwasserleiter Oberflächenbewässerung (nach DIN 19655, 1996)

Tab. 6 Pflanzenkoeffizienten während der mittleren Entwicklungsphase (Kcb: pflanzenspezifischer Koeffizient, LAI: Blattflächenindex, Zr: Wurzeltiefe, p : Menge an verfügbarem Bodenwasser) und maximale Pflanzenhöhe (height) (nach Allen et al. 1998, Kutschera et al. 2009)

Table 6 Plant-specific parameters for crop-related modeling in the mid-season of the crop growth stage (Kcb: basal crop coefficient, LAI: leaf area index, Zr: effective rooting depth, p : evapotranspiration depletion factor) and maximum height

Kultur	K _{cb_mid}	LAI _{mid}	Z _{r_mid} [m]	p	Höhe [m]
Hafer	1,1	1,8	1,5	0,55	1,0
Karotte	0,95	2,4	1	0,35	0,3
Kartoffel	1,1	3,4	0,6	0,35	0,6
Körnermais	1,15	5,03	1,7	0,55	2,0
Silomais	1,15	3,8	1,7	0,55	2,0
Sojabohnen (für Lupine)	1,1	3,2	1,3	0,5	0,75
Sommergerste	1,1	1,8	1,5	0,55	1,0
Sommerweizen	1,1	1,8	1,5	0,55	1,0
Spargel (60 Tage)	0,9	3,3	1,8	0,45	0,7
Spargel (80 Tage)	0,9	2,7	1,8	0,45	0,7
Weide	0,67	2,06	1	0,6	0,23
Wintergerste	1,1	3,3	1,8	0,55	1,0
Winterraps	1,02	2	1,5	0,6	0,6
Winterroggen	1,1	3,3	1,8	0,55	1,0
Deutsches Weidelgras ^a	1,0	4,3	1	0,6	0,6
Deutsches Weidelgras ^b	1,0	4,3	1	0,6	0,6
Kleegras-Mischung mit Rotklee ^a	1,0	3,9	1	0,55	0,6
Kleegras-Mischung mit Rotklee ^b	1,0	3,9	1	0,55	0,6
Phacelia	1,0	3,5	1,5	0,45	0,95
Wintertriticale	1,1	2,7	1,8	0,55	1,0
Winterweizen	1,1	3,3	1,8	0,55	1,0
Brache	0,15	0,2	0,3	0,55	0,3

^a erster Schnitt

^b weitere Schnitte

Tab. 7 Trends der Grundwasserstände (Trend), Bestimmtheitsmaß (R2) für den Zusammenhang zwischen aufsummierten Komponenten des landwirtschaftlichen Wasserhaushalts im Polder Scheidgraben mit den Grundwasserständen der einzelnen Grundwassermessstellen (Werte der einzelnen Grundwassermessstellen am Ende der Vegetationsperiode, 1. Oktober). R2 wurde für den Zusammenhang zwischen Klimaparametern am Pegel „Neustadt, Birkenweg“ und Grundwasserständen der einzelnen Pegel berechnet. ETact: tatsächliche Evapotranspiration, Eact: tatsächliche Evaporation, Tact: tatsächliche Transpiration, N: Niederschlag, ETO: Referenzevapotranspiration; fett formatierte Zahlen zeigen einen Wert für ein $R^2 > 0,9$ an

Table 7 Trends of groundwater levels (trend), coefficient of determination (R2) for the correlation between summed components of the agricultural water balance in the Scheidgraben polder with the groundwater levels of individual observation wells (values at the end of the vegetation period on 1 October). R2 was calculated for the correlation between climatic parameters at the gauging station Neustadt Birkenweg and groundwater levels of the individual gauging stations. ETact: actual evapotranspiration, Eact: actual evaporation, Tact: actual transpiration, N: precipitation, ETO: reference evapotranspiration. Numbers highlighted in gray indicate a value for a $R^2 > 0.9$

Pegel	Trend	N	ETact	Tact	Eact	N (Neustadt Birkenweg)	N (Neustadt Birkenweg)	ET0 (Neustadt Birkenweg)
Zeitraum (maximale Anzahl Werte)	> 30 Jahre	Vegetationsperiode (4)	Vegetationsperiode (4)	Vegetationsperiode (4)	Vegetationsperiode (4)	Jährlich (22)	Wöchentlich (1168)	Wöchentlich (1168)
Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz								
Babe	0,52	0,84	0,74	0,83	0,42	0,39	0,01	0,17
Sieversdorf, Weg n. Goldbeck	0,27	0,78	0,17	0,27	0,00	0,01	0,10	0,09
Neustadt, Birkenweg	k.T.	0,35	0,31	0,40	0,08	0,58	0,06	0,01
Grundwasserkörper Rhin								
Michaelisbruch, Haus Nr. 18	0,48	0,79	0,64	0,73	0,32	0,00	0,04	0,18
Rhinow, Sportplatz	0,08	0,07	0,18	0,11	0,48	0,29	0,00	0,06
Dreetz, 3 km südöstl	0,07	0,58	0,93	0,91	0,88	0,60	0,01	0,00
Dreetz, Walddeck	0,00	0,59	0,95	0,92	0,91	0,54	0,01	0,01
Michaelisbruch, Wald	-0,44	0,64	0,90	0,92	0,71	0,36	0,01	0,10
Wutzetz, östlich B5	-0,53	0,62	0,81	0,86	0,58	0,69	0,01	0,11
Klessen, Ziegelei	-0,78	0,75 ^a	0,97^a	0,97^a	0,97^a	0,45	0,00	0,08
Segeletz	-1,39	0,50	0,90	0,86	0,89	0,46	0,00	0,02
Klessen, ca. 1 km süd-östl	-1,51	0,91	0,67	0,76	0,36	0,28	0,00	0,00
Friesack, an der Kirche neu	k.T.	0,79	0,89	0,94	0,64	0,80	0,01	0,05
Friesack, Bahnüberführung	k.T.	0,01	0,13	0,08	0,32	0,10	0,01	0,23

k.T. kein Trend

^a Zusammenhang mit Grundwasserstand Ende Dezember

Danksagung Wir bedanken uns bei Dr. B. Pfützner und Dr. B. Klöcking (Büro für Angewandte Hydrologie, BAH) sowie Herrn D. Geissler (Landkreis Ostprignitz-Ruppin) für die fachliche Beratung. Herrn G. Elftmann (Wasser- und Bodenverband Dosse-Jäglitz) danken wir für die Herstellung des Kontaktes mit den Betrieben. Besonderer Dank geht an die Leiter und Angestellten der landwirtschaftlichen Betriebe für die Bereitstellung der Daten, die Zeit und den Aufwand. Weiterhin bedanken uns bei den Gutachtern für die hilfreichen Kommentare und ausführlichen Anregungen zum Inhalt unseres Manuskripts.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

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

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

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

Literatur

- Alcamo, J., Henrich, T., Rösch, T.: World Water in 2025. Global Modeling and Scenario Analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. Kassel World Water Series Report 2. Centre for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany. (2000)
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, N.: Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage. In: FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bd. 56, S. 297. Rome (1998)
- Baroni, G., Drastig, K., Lichtenfeld, A.U., Jost, L., Claas, P.: Assessment of Irrigation Scheduling Systems in Germany: Survey of the Users and Comparative Study. *Irrig. Drain.* **68**(3), 520–530 (2019)
- Bednorz, F., Meinert, M., Hermsdorf, A.: Bilanzierung des Grundwasserangebotes für das Land Brandenburg als Grundlage für ein einheitliches Gis-basiertes Werkzeug im wasserrechtlichen Vollzug. In: AG Angewandte Geologie und AG Hydrogeologie (Hrsg.) Tagung der Fachsektion Hydrogeologie e. V., in der DGGV e.V. in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Bd. 28. (2022). 23.–25. März 2022
- Behboudian, M., Kerachian, R., Motlaghzadeh, K., Ashrafi, S.: Evaluating water resources management scenarios considering the hierarchical structure of decision-makers and ecosystem services-based criteria. *Sci. Total Environ.* **751**, 141759 (2021)
- Braden, H.: Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell für Wasser- und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete. In: Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Bd. 42, S. 294–299. (1985)
- DIN 4049-3: 1994: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Beuth Verlag, Berlin – Wien – Zürich
- DIN 19655: 1996: Bewässerung, Aufgaben, Grundlagen, Planung und Verfahren. Beuth Verlag, Berlin – Wien – Zürich (1996)
- DIN 19655: 2008 Bewässerung – Aufgaben, Grundlagen, Planung und Verfahren. Beuth Verlag, Berlin – Wien – Zürich (2008)
- Dörhöfer, G., Josopait, V.: Grundwasserneubildung und ihre Ermittlung – eine Anmerkung zum Beitrag von Hölting: Modellrechnungen zur Grundwasserneubildung. *Grundwasser* **2**(2), 77–80 (1997)
- Drastig, K., Prochnow, A., Baumecker, M., Berg, W., Brunsch, R.: Agricultural Watermanagement in Brandenburg. *Die Erde* **142**, 119–140 (2011)
- Drastig, K., Prochnow, A., Kraatz, S., Libra, J., Krauß, M., Döring, K., Müller, D., Hunstock, U.: Modeling the water demand on farms. *Adv. Geosci.* **32**, 9–13 (2012)
- Drastig, K., Kraatz, S., Libra, J., Prochnow, A., Hunstock, U.: Implementation of hydrological processes and agricultural management options into the ATB-Modeling Database to improve the water productivity at farm scale. *Agron. RES* **11**, 31–38 (2013)
- Drastig, K., Libra, J., Kraatz, S., Koch, H.: Relationship between irrigation water demand and yield of selected crops in Germany between 1902 and 2010: A modeling study. *Environ Earth Sci* **75**, 1–14 (2016a)
- Drastig, K., Prochnow, A., Libra, J., Koch, H., Rolinski, S.: Irrigation water demand of selected agricultural crops in Germany between 1902 and 2010. *Sci. Total Environ.* 1299–1314 (2016b)
- Drastig, K., Palhares, J.C.P., Karbach, K., Prochnow, A.: Farm water productivity in broiler production: case studies in Brazil. *J Clean Prod* **135**, 9–19 (2016c)
- Drastig, K., Quiñones, T.S., Zare, M., Dammer, K.-H., Prochnow, A.: Rainfall interception by winter rapeseed in Brandenburg (Germany) under various nitrogen fertilization treatments. *Agric For Meteorol* **268**, 308–317 (2019)
- Drastig, K., Flemming, I., Gusovius, H.-J., Herppich, W.B.: Study of water productivity of industrial hemp under hot and dry conditions in Brandenburg (Germany) in the Year 2018. *Water* **12**, 2982 (2020)
- Drastig, K., Kreidenweis, U., Meyer-Aurich, A., Ammon, C., Prochnow, A.: Case Study of Effects of Mineral N Fertilization Amounts on Water Productivity in Rainfed Winter Rapeseed Cultivation on a Sandy Soil in Brandenburg (Germany) over Three Years. *Water* **13**, 1958 (2021)
- DWD: Klimareport Brandenburg. Fakten bis zur Gegenwart – Erwartungen für die Zukunft. Deutscher Wetterdienst, Brandenburg (2019)
- DWD: Klima an ausgewählten Wetterstationen in Berlin und Brandenburg (2021). <https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvo/berlin-brandenburg.html>, Zugriffen: 17. Apr. 2021
- EU: Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (2000). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj?locale=de>, Zugriffen: 29. Juli 2021
- Eulenstein, F., Urbaniak, M., Chojnicki, B., Olejnik, J.: Influence of plant cover on the share of the soil heat flux in the heat balance of the active surface. *Int. Agrophys.* **19** (1), 31–36 (2005)
- Fliß, R., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kopp, B., Neumann, J., Posselt, M.: Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland. *Grundwasser* **26**(1), 33–45 (2021)
- Gömann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J.H., Frühauf, C., Hauschild, M., Kregel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.J., Müller, J., Mußhoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., Strohm, K.: Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report **30** (2015). <http://hdl.handle.net/10419/111497>, Zugriffen: 16. Nov. 2022

- Grünwald, U.: Wasserbilanzen der Region. Brandenburg, Berlin (2010)
- Gutzler, C., Helming, K., Balla, D., Dannowski, R., Deumlich, D., Glemnitz, M., Knierim, A., Mirschel, W., Nendel, C., Paul, C., Sieber, S., Stachow, U., Starick, A., Wieland, R., Wurbs, A., Zander, P.: Agricultural land use changes—a scenario-based sustainability impact assessment for Brandenburg. *Indic*, Bd. 48. *Ecol*, Germany, S. 505–517 (2015)
- Han, D., Currell, M.J., Cao, G., Hall, B.: Alterations to groundwater recharge due to anthropogenic landscape change. *J Hydrol* **554**, 545–557 (2017)
- Hennig, H., Hilgert, T.: Der Grundwasserhaushalt in Vorpommern – Seine anthropogene Prägung, Auswirkungen von Klimaänderungen und Anpassungsstrategien. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* **26**(1), 3–16 (2021)
- Herring, M.W., Robinson, W., Zander, K.K., Garnett, S.T.: Rice fields support the global stronghold for an endangered waterbird. *Agric Ecosyst Environ* **284**, 106599 (2019)
- Herrmann, F., Hübsch, L., Elbracht, J., Engel, N., Keller, L., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H., Wendland, F.: Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. *Hydrol. Wasserbewirtschaft*, Bd. 61., S. 245–261 (2017)
- Houben, G., Bäßler, N., Martiny, A., Langguth, H.R., Plüger, W.L.: Modellansätze zur langfristigen Entwicklung der Grundwasserqualität im Bourtanger Moor (Emsland). *Grundwasser* **6**(3), 103–112 (2001)
- Kadau, R.: Untersuchungen zu qualitätsbeeinflussenden, nachernte-physiologischen und phytopathologischen Prozessen bei Convenience-Produkten während der Kurzzeitlagerung am Beispiel von Spargel (*Asparagus officinalis* L.) (2005)
- Kliem, L., Georg, K.: Von Starkregen bis Trockenheit – Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Dessau-Roßlau, Germany (2017)
- Kopp, B., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kampf, J., Morhard, A., Neumann, J.: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen von 1951 bis 2015. *HyWa* **62**, 62–76 (2018)
- Köstner, B., Surke, M., Bernhofer, C.: Klimadiagnose der Region Berlin/Barnim/Uckermark/UECKER-RANDOW für den Zeitraum 1951 bis 2006 (2007)
- Kutschera, L., Lichtenegger, E., Sobotik, M.: Wurzelatlas der Kulturpflanzen gemäßigter Gebiete mit Arten des Feldgemüsebaues. DLG-Verlag (2009)
- Lahmer, W., Becker, A.: Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines mesoskaligen Einzugsgebietes, Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe. Springer, S. 315–318 (1998)
- LBGR: Hydrogeologischer Ost-West Schnitte: 13140_5850, 13140_5855, 13140_5860. Hydrogeologische Karte von Brandenburg. Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (1998). <https://geo.brandenburg.de/?page=Hydrogeologische-Karten>, Zugegriffen: 5. Okt. 2022
- LBGR: Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1: 300 000 (BÜK 300). Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg (2021). <https://geo.brandenburg.de/?page=Boden-Grundkarten>. Zugegriffen: 21.12.2022
- Leske, M.: Möglichkeiten der Blattflächenbestimmung bei *Asparagus officinalis* L. Beuth. University of Applied Sciences, Berlin (2011)
- LfU: Klimawandelmonitoring im Land Brandenburg – Basisbericht. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) Potsdam, Germany (2018)
- LfU: Steckbrief für den Grundwasserkörper Dosse/Jäglitz (DEGB_DEBB_HAV_DJ_1). Landesamt für Umwelt (LfU) (2021a)
- LfU: Steckbrief für den Grundwasserkörper Rhin (DEGB_DEBB_HAV_RH_1). Landesamt für Umwelt (LfU) (2021b)
- LfU: Trends einzelner Grundwassermessstellen (GWM) in Brandenburg. Landesamt für Umwelt (LfU) (2022a)
- LfU: Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper nach Europäischer Wasserrahmenrichtlinie im 3. Bewirtschaftungszeitraum Landesamt für Umwelt Brandenburg (LfU) (2022b). <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/wasser/grundwasser/umsetzung-wasserrahmenrichtlinie-grundwasser/mengenmaessiger-zustand-der-grundwasserkoeerper>, Zugegriffen: 16. Nov. 2022
- LUA: Gewässernetz des Landes Brandenburg, Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0. Landesamt für Umwelt Brandenburg, Brandenburg, Germany (2016). <https://geobroker.geobasis-bb.de/gbss.php?MODE=GetProductInformation&PRODUCTID=B9D461F1-99A1-4C10-97B4-9C36COBD40B9>, Zugegriffen: 29. Juli 2021
- LUGV: Managementplan für das Gebiet „Dosseniederung“ Landesinterne Melde Nr. 254, EU-Nr. DE 3139-301. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (LUGV), Potsdam, Germany (2014a). <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/natura-2000/managementplanung/ffh-dosseniederung/>, Zugegriffen: 29. Juli 2021
- LUGV: Die Wasserbilanzen der Grundwasserkörper im Land Brandenburg. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2014b). https://lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/lugv_fb142.pdf. Zugegriffen: 29. Juli 2021
- LUGV: Endbericht Gewässerentwicklungskonzept Dosse-Jäglitz, Bd. 2. Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg, Potsdam, Deutschland (2015)
- Michel, R., Sourell, H.: Bewässerung in der Landwirtschaft, Bd. 176. Erling Verlag, Clenze, Germany (2014)
- Miegel, K., Graeff, T., Selle, B., Salzmann, T., Franck, C., Bronstert, A.: Untersuchung eines renaturierten Niedermooses an der mecklenburgischen Ostseeküste–Teil I: Systembeschreibung und hydrologische Grundcharakterisierung. *HyWa* **60**(4), 242–258 (2016). https://doi.org/10.5675/HyWa_2016_4_1
- Mila i Canals, L.M., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., Clift, R.: Assessing freshwater use impacts in LCA: Part I—inventory modelling and characterisation factors for the main impact pathways. *Int J Life Cycle Assess* **14**, 28–42 (2009)
- MLUK: Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK), Potsdam (2021)
- MLUL: Datensammlung für die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, Potsdam, Germany (2016): <https://lflf.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Datensammlung-2021-web.pdf>, Zugegriffen 19.12.2022
- MUGV: Managementplanung Natura 2000 im Land Brandenburg Managementplan für das Gebiet „Dosse“ (2013). <https://lfu.brandenburg.de/lfu/de/aufgaben/natur/natura-2000/management-planung/ffh-dosse/>, Zugegriffen: 29. Juli 2021.
- Nilsalab, P., Gheewala, S.H., Pfister, S.: Method development for including environmental water requirement in the water stress index. *Water Resour Manag*. **32**, 1585–1598 (2018)
- Peck, D.E., Mcleod, D.M., Hewlett, J.P., Lovvorn, J.R.: Irrigation-dependent wetlands versus instream flow enhancement: economics of water transfers from agriculture to wildlife uses. *Environ* **34**, 842–855 (2004)
- Peth, D., Drastig, K., Prochnow, A.: Quantity- and quality-based farm water productivity in wine production: case studies in Germany. *Water* **9**, 88 (2017)

- Prochnow, A., Drastig, K., Klauss, H., Berg, W.: Water use indicators at farm scale: methodology and case study. *Food Energy Secur* **1**, 29–46 (2012)
- Radkova, M., Naumova, M., Stoichev, S., Kalushkov, P., Djilianov, D.: Biodiversity of epigeic spiders in conventional potato fields in South-western Bulgaria (Ten Years Later). *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, Bd. 72. (2019)
- Roth, D., Günther, R., Knoblauch, S., Michel, H.: Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen – Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation. *Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen*, Bd. 1. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena, Deutschland, S. 159 (2005)
- Scanlon, B.R., Jolly, I., Sophocleous, M., Zhang, L.: Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. *Water Resour. Res.* **43**(3), (2007) doi: 10.1029/2006WR005486
- Schimmelpfennig, S., Anter, J., Heidecke, C., Lange, S., Röttcher, K., Bittner, F.: Bewässerung in der Landwirtschaft. *Thünen Working Paper 85*, Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017. Suderburg (2018)
- Smakhtin, V., Revenga, C., Döll, P.: Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments. *International Water Management Institute (IWMI) report*, Bd. 24. Colombo, Sri Lanka (2004) <https://doi.org/10.3910/2009.391>
- Statista: Geschätzte Dürreschäden in der deutschen Landwirtschaft nach Bundesländern im Jahr 2018 (in Millionen Euro) (2018). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/897682/umfrage/geschaeetzte-duerreschaeden-in-der-landwirtschaft-in-deutschland-nach-bundeslaendern/>, Zugegriffen: 29. Juli 2021
- Statistik Berlin-Brandenburg: Statistisches Jahrbuch 2018 – Brandenburg. Berliner Wissenschaftsverlag, Berlin (2018)
- Statistik Berlin-Brandenburg: Statistisches Jahrbuch 2019 – Brandenburg. Berliner Wissenschaftsverlag, Berlin (2019)
- Statistik Berlin-Brandenburg: Statistisches Jahrbuch 2020 – Brandenburg. Berliner Wissenschaftsverlag, Berlin (2020). https://download.statistik-berlin-brandenburg.de/9e8efb180d4a9e16/35030de9226a/AfS_Jahrbuch_2020_BE.pdf, Zugegriffen: 26. Okt. 2021
- Steidl, J., Schubert, U., Schuler, J., Dietrich, O., Zander, P.: Wassermanagement in der Landwirtschaft. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 2813HS007 der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Projektträger Agrarforschung. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg, Deutschland (2015)
- TLLLR: Landessortenversuche in Thüringen, Blaue Lupine, Versuchsbericht 2019. Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Jena, Deutschland (2020)
- UBA: Indikatoren-Factsheet: Wassernutzungsindex. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland (2019). <https://www.umweltbundesamt.de/ww-r-1-das-indikator#ww-r-1-wassernutzungsindex>, Zugegriffen: 29. Juli 2021
- Von Hoyningen-Huene, J.: Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. *DVWK Schriften*, Bd. 57., S. 1–53 (1983)
- Walmsley, A., Cerdà, A.: Soil macrofauna and organic matter in irrigated orchards under Mediterranean climate. *Biol. Agric. Hortic* **33**, 247–257 (2017)
- Wattendorf, P., Niederberger, J., Ehrmann, O., Konold, W.: Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von Niedermooren in Baden-Württemberg. *HyWa* **54**, 293–303 (2010)

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