

Regionale Auswirkungen des Globalen Wandels: Der Extremsommer 2018 in Nordostdeutschland

Ingo Heinrich, Daniel Balanzategui, Oliver Bens, Theresa Blume, Achim Brauer, Elisabeth Dietze, Pia Gottschalk, Andreas Güntner, Katharina Harfenmeister, Gerhard Helle, Christian Hohmann, Sibylle Itzerott, Knut Kaiser, Susanne Liebner, Bruno Merz, Sylvia Pinkerneil, Birgit Plessen, Torsten Sachs, Markus J. Schwab, Daniel Spengler, Claudia Vallentin, Christian Wille

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

The main focus of the TERENO Northeastern German Lowland Observatory (TERENO-Northeast) is the regional impact of Global Change. Since 2011, the observatory has recorded changes in the geo-, hydro-, bio- and atmosphere at six main study sites. The year 2018, particularly in northeast Germany, was record-breaking in regard to dryness and heat. The mean temperature in Mecklenburg-Vorpommern was 2 °C above the long-term average and precipitation was very low at 440 mm (normally around 600 mm). The extreme summer of 2018 was a special opportunity for TERENO-Northeast to measure the regional effects of climate change. One of the consequences was the large number of forest fires, with one major fire destroying around 400 hectares. Other extreme reactions of the ecosystems were shown in TERENO-Northeast. For example, for the first time since its rewetting, Polder Zarnekov fell dry, with unpredictable consequences for the greenhouse gas exchanges. The forest ecosystems of Müritz National Park, on the other hand, survived the extreme summer surprisingly well, partly because the months before the drought were relatively damp. The research activities of TERENO-Northeast form an important basis to develop realistic options for improved adaptation strategies to the ongoing global change with its particular region-specific effects and challenges.



Welche regionalen Auswirkungen hat der Globale Wandel? Diese Frage steht im Fokus des TERENO-Observatoriums Nordostdeutsches Tiefland (TERENO-Nordost). TERENO steht für Terrestrial Environmental Observatories, einem Verbund aus vier Observatorien im Rahmen einer Langzeitaktivität der Helmholtz-Gemeinschaft. Das Nordostdeutsche Tiefland wurde als eine für Deutschland repräsentative Region ausgewählt, die sich durch eine hohe Vulnerabilität durch den Globalen Wandel auszeichnet. Seit 2011 werden in TERENO-Nordost, das vom Deutschen GeoForschungs-Zentrum GFZ betrieben wird, zeitlich hochaufgelöste Messdaten gesammelt, um Veränderungen in der Geo-, Hydro-, Bio- und unteren Atmosphäre an ausgesuchten Standorten in enger Kooperation mit regionalen Partnern in Nordostdeutschland zu erfassen (Bens *et al.*, 2012). Dies ermöglicht es, anstelle von Modelldaten reale Daten zu nutzen, um Wirkungszusammenhänge besser zu verstehen. TERENO-Nordost leistet so einen wichtigen Beitrag, um wissenschaftliche Entscheidungsfindungen für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen an die Auswirkungen des Klima- und Landschaftswandels auf regionaler Ebene zu ermöglichen. Das Nordostdeutsche Tiefland ist eine gewässerreiche Region, die aber im nationalen Vergleich wenig Niederschlag erhält und oft in weiten Gebieten eine negative Wasserbilanz aufweist. Es zählt zu den am stärksten vom Klimawandel betroffenen Regionen Deutschlands. So wurden in Nordostdeutschland seit den 1980er Jahren großflächig sinkende Grundwasser- und Seespiegel registriert (Germer *et al.*, 2011). Dieser Abwärtstrend dauerte bis 2009 an, um sich dann durch sehr hohe Niederschlagssummen in den zwei Folgejahren scheinbar umzukehren (Kaiser *et al.*, 2014). Die bisher im Observatorium bemessenen Jahre von 2012 bis 2017 erwiesen sich meteorologisch eher als durchschnittlich. Das Jahr 2018 brach dann hinsichtlich Trockenheit, Temperaturen und Bewölkungsgrad alle bisherigen Rekorde. Mit 10,2 °C lag die Jahresmitteltemperatur in Mecklenburg-Vorpommern 2 °C über dem langjährigen Mittel und in Brandenburg mit 10,9 °C sogar um 2,2 °C darüber. Und während die Jahresniederschlagssumme in Mecklenburg-Vorpommern mit 440 mm (Langjähriges Mittel: 595 mm) schon sehr niedrig lag, waren es in Brandenburg weniger als 390 mm (Langjähriges Mittel: 557 mm). Außerdem meldete Mecklenburg-Vorpommern mit beinahe 2085 Stunden (Langjähriges Mittel: 1648 Stunden) einen neuen Sonnenscheinrekord. Brandenburg war mit über 2180 Stunden (Langjähriges Mittel:

1634 Stunden) bundesweit sogar Spitzenreiter. Das Jahr 2018 begann mit einem ungewöhnlich milden und sehr niederschlagsreichen Januar. Im Februar und März zeigte sich der Winter noch einmal kurz mit zwei markanten Kaltlufteinbrüchen. Anfang April schaltete das Wetter dann aber innerhalb weniger Tage von Winter auf Sommer um (DWD, 2018).

Für die Land- und Forstwirtschaft in der Region wird das Jahr 2018 wohl als „katastrophal“ in Erinnerung bleiben. Die extreme Dürre wird auch in den Beobachtungsdaten von TERENO-Nordost deutlich. Die Beobachtungen stammen von den sechs Hauptstandorten des Observatoriums in Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg (Heinrich *et al.*, 2018). An diesen Standorten wird der Einfluss des Klima- und Landnutzungswandels auf terrestrische und aquatische Ökosysteme untersucht. TERENO-Nordost dient dem Monitoring, der Analyse und der Vorhersage von sich ändernden Umweltbedingungen. Die komplexen Zusammenhänge und Rückkopplungsmechanismen innerhalb und zwischen den verschiedenen Teilen der terrestrischen und aquatischen Systeme erfordern einen interdisziplinären Forschungsansatz. Wichtige Systemvariablen, die im Rahmen von TERENO-Nordost observiert werden, sind u. a. Transport- und Austauschprozesse von Wasser und Materie im System Grundwasser-Boden-Vegetation-Atmosphäre, Einflüsse auf das Baumwachstum und langfristige Veränderungen des Aufbaus und der Arbeitsweise von Mikroorganismen. In diesem Zusammenhang ist die Kombination aus Monitoring von aktuellen Prozessen und der Prozessrekonstruktion aus Geoarchiven als ein besonderes Merkmal von TERENO-Nordost hervorzuheben (Heinrich *et al.*, 2018).

Der Blick auf den Sommer 2018 aus dem All

Satellitenbilddaten ermöglichen es, die starke Trockenheit des Sommers 2018 flächenhaft in Bezug zu vorherigen Jahren zu setzen. Für die Analysen werden die Daten des europäischen Sentinel-2-Satellitensystems genutzt. Sentinel-2 besteht aus einer Konstellation zweier baugleicher Erdbeobachtungssatelliten, welche die Erdoberfläche in elf spektralen Kanälen mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 m alle fünf Tage aufnehmen. Zur Veranschaulichung der meteorologisch bedingten Unterschiede der Jahre 2015 bis 2018 werden die flächenhaften Bilddaten für Anfang Juli mit am Boden gemessenen Daten des Klima- und Umweltmessnetzes am TERENO-Messnetz DEMMIN (Durable Environmental Multidisciplinary Monitoring Information Network) in Verbindung gesetzt.

Die gemittelten Klimadaten aus 43 Messstationen zu Temperatur, Niederschlag, modellierter Evapotranspiration (ETp) und Temperatursummen der phänologischen Entwicklung (Wachstumsgradtage) zeigen für die Zeitreihe seit 2005 deutliche Unterschiede (Abb. 1).

Links: Polder Zarnekow im Sommer 2018 (Aufnahmedatum: 29. August 2018), Foto während einer Drohnenüberfliegung durch Mathias Zöllner

Left: Polder Zarnekow in the summer of 2018 (date of picture taken: 29 August 2018), picture from drone flight by Mathias Zöllner



Kontakt: I. Heinrich
(ingo.heinrich@gfz-potsdam.de)

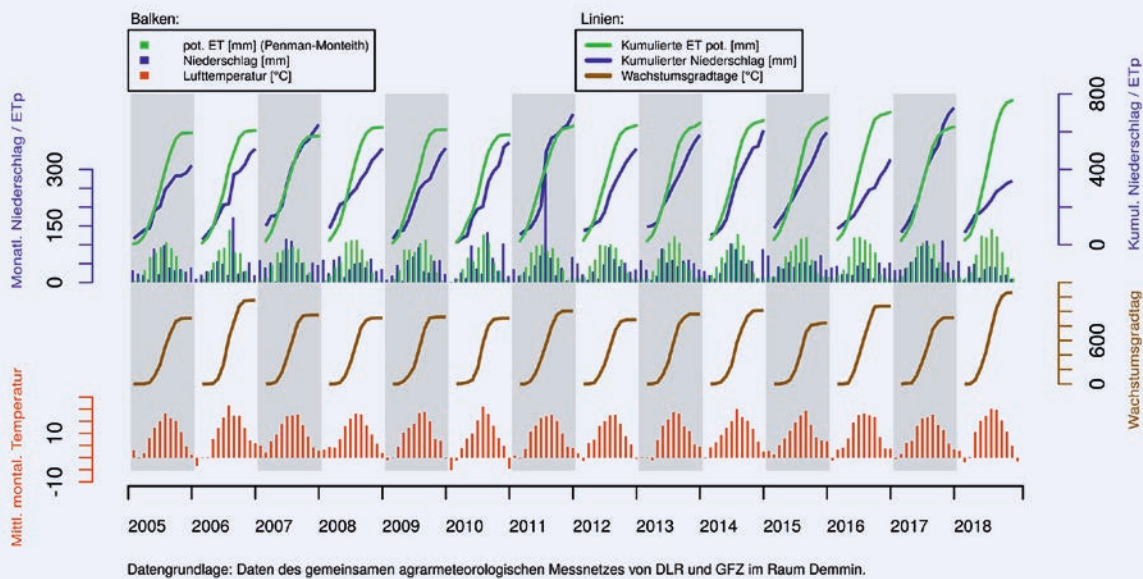


Abb. 1: Mittlere Temperatur-, Niederschlags-, Evaporations- und Temperatursummendaten des Messnetzes DEMMIN der Jahre 2005 bis 2018

Fig. 1: Mean values of temperature, evaporation and growing degree days at TERENO site DEMMIN for the years 2005 to 2018

Vegetationsentwicklung und Ertrag bei Winterweizen

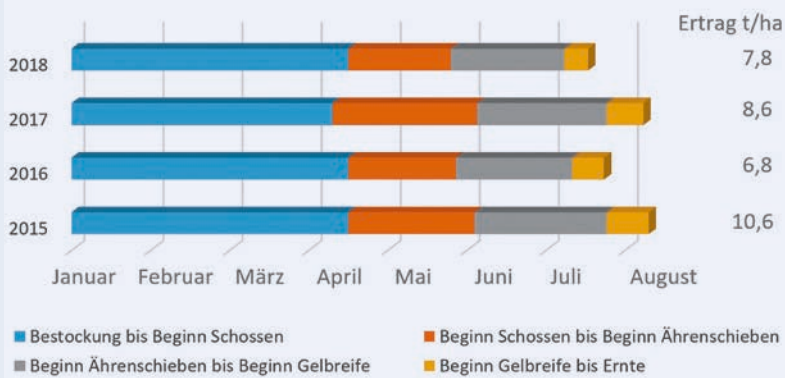
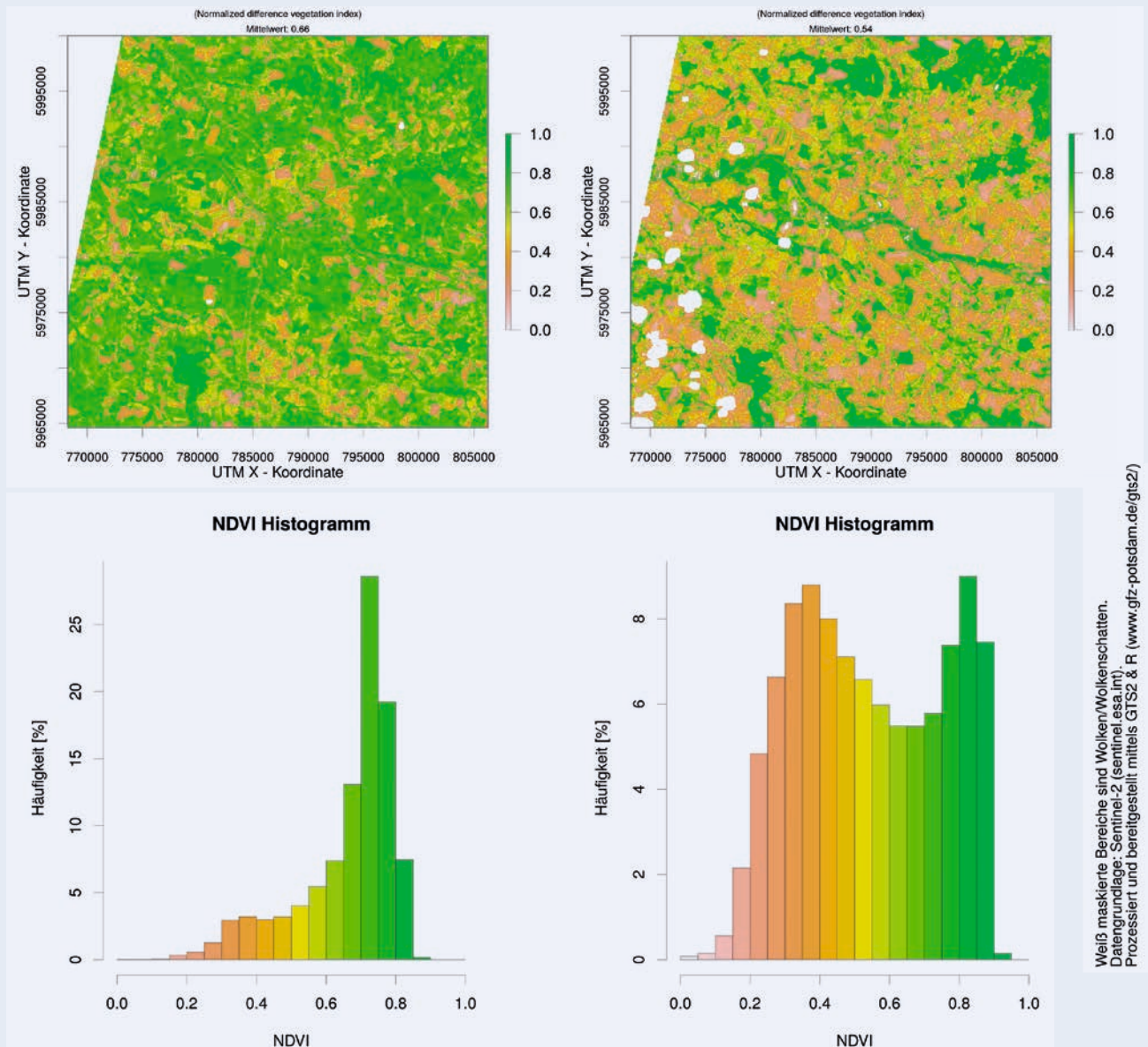


Abb. 2: Phänologische Entwicklung von Winterweizen der Jahre 2015 bis 2018 der Beobachtungsstation Dargun im Messnetz DEMMIN

Fig. 2: Phenological development of winter wheat for the years 2015 to 2018 at observation site Dargun at TERENO site DEMMIN

Die Jahre 2011 und 2017 fallen durch deutlich überdurchschnittliche Niederschlagssummen auf (698 und 712 mm im Vergleich zum langjährigen Mittel der nächstgelegenen Wetterstation Greifswald mit 601 mm), für 2017 erreicht der Niederschlag sogar die Summe der potenziellen Verdunstung. 2006 und 2016 sind durch sehr hohe Temperatursummen gekennzeichnet (1164 und 1073 °C). Besonders wenig Niederschlag fällt in den Jahren 2012 und 2016 (464 bzw. 425 mm) sowie 2018 (380 mm). Der geringe Niederschlag ist 2018 mit der im Vergleich höchsten Temperatursumme (1263 °C) verknüpft. Dagegen wurde im Jahr 2015 mit 852 °C der niedrigste Wert ermittelt.

Während 2018 bis Ende April die Niederschläge noch dem langjährigen Mittel (Station Greifswald) entsprachen, lagen sie Ende Juni mit 198 mm bereits 80 mm darunter. Die Temperatursumme hatte sich von Januar bis März normal entwickelt, aber dann im Verlauf von April, Mai und Juni auf stark überdurchschnittliche 432 °C gesteigert. Eine vergleichbare Entwicklung ist auch für das Jahr 2016 zu beobachten (189 mm und 378 °C für Ende Juni). Im Gegensatz dazu stehen die Jahre 2015 und 2017, welche sich durch wesentlich höhere Niederschlagssummen auszeichneten (258 mm in 2015 und 310 mm in 2017, jeweils bis Ende Juni). Diese Differenzen der Witterungsbedingungen führen zu deutlichen Unterschieden in der phänologischen Entwicklung der Pflanzen.



Beispielsweise beginnt das Schossen des Winterweizens (Abb. 2) jeweils Mitte April nahezu zeitgleich. Bereits zum Zeitpunkt des Ährenschiebens sind jedoch zwischen den Jahren 2016/2018 (Ende Mai) und 2015/2017 (Anfang Juni) Entwicklungsunterschiede von bis zu einer Woche erkennbar, weil die Temperatursummen (Wachstumsgradtage) um 100 °C und die Niederschlagssummen in dem Zeitraum um 70 mm differieren. Bis zur Ernte wächst diese Diskrepanz auf rund zwei Wochen an. Die unterschiedlichen Wachstumsbedingungen für landwirtschaftliche Kulturen zeigen sich für die vier Jahre auch im Ertrag bei Winterweizen in der Region. Während 2015 mit 10,6 t/ha eine Rekordernte erzielt wurde, fällt sie mit 8,6 t/ha für 2017 wegen der hohen Niederschläge und

7,8 t/ha für 2018 wegen der geringen Niederschläge etwas (2017) bzw. deutlich (2018) unterdurchschnittlich aus. Bemerkenswert ist, dass 2016 noch erheblich weniger Weizen geerntet werden konnte (6,8 t/ha), ein Zeichen dafür, dass damals die Feldfrüchte nicht wie 2018 von einem überdurchschnittlich feuchten Vorjahr profitieren konnten.

Die Satellitenbilddaten des Sentinel-2-Systems zeigen in einem Landschaftsausschnitt des TERENO-Messnetzes DEMMIN den starken Unterschied der Vegetationsentwicklung der Jahre 2015 und 2018 flächenhaft jeweils für Anfang Juli (Abb. 3). Der aus den Daten abgeleitete Vegetationsindex „Normalized Difference

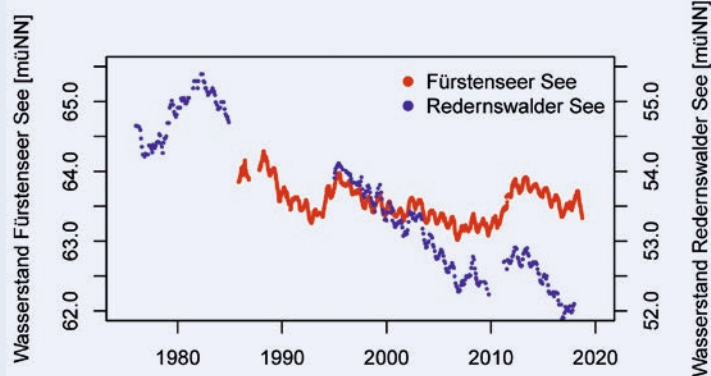


Abb. 4: Seespiegelschwankungen in den letzten Jahrzehnten für den Großen Füstenseer See im Müritz-Nationalpark und für den Redernswalder See im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin

Fig. 4: Lake level dynamics for Lake Großer Füstenseer See (Müritz National Park) and Lake Redernswalder See (Biosphere Reserve Schorfheide-Chorin)

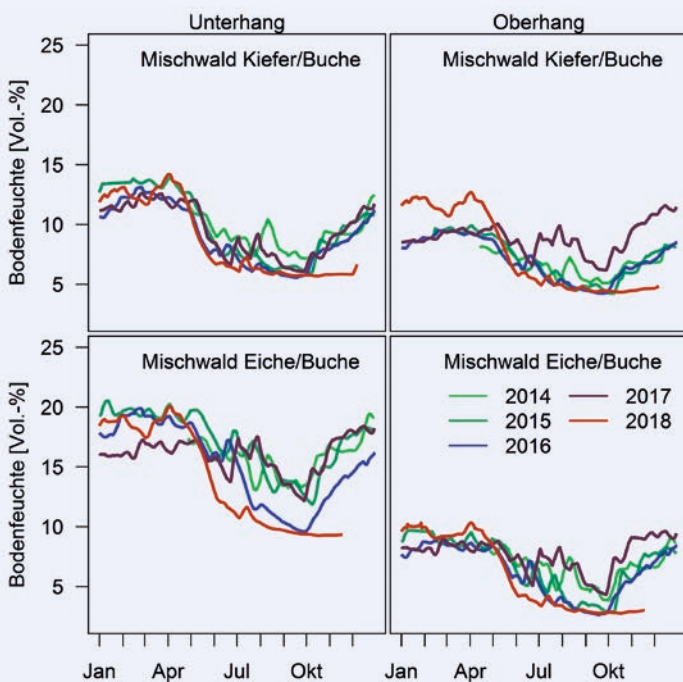


Abb. 5: Jährlicher Verlauf der mittleren Bodenfeuchte an vier Messpunkten am Standort Hinnensee im Müritz-Nationalpark (2014 bis 2018)

Fig. 5: Annual mean soil moisture dynamics for the years 2014-2018 at four monitoring locations around Lake Hinnensee, Müritz National Park

Vegetation Index“ (NDVI), welcher ein Maß für die Vitalität von Vegetationsbeständen ist, verdeutlicht flächenhaft die phänologischen Entwicklungsunterschiede im gesamten Gebiet. Die grünen Farbtöne zeigen vitale Vegetation an, wohingegen braune Bereiche bereits in der Reife und damit trockenere Vegetationsbestände repräsentieren. Die Daten zeigen für das Jahr 2015 größtenteils noch sehr vitale Vegetation, wobei die Ernte der Gerste bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht begonnen hat. Im Gegensatz dazu sind große Flächen des Datensatzes des Jahres 2018 bereits durch trockene Vegetation geprägt, hervorgerufen durch geringere Niederschläge und höhere Temperatursummen. Nur die Grünländer der Auen und Felder mit Sommerfrüchten, wie Zuckerrüben und Mais, sind noch vital. Zudem sind bereits viele Schläge abgeerntet. Der Unterschied zwischen den Jahren wird auch durch die Balkendiagramme verdeutlicht. Im Jahr 2015 dominieren bei einem Mittelwert von 0,66 grüne Farbtöne (einpipfliges Balkendiagramm), während in 2018 Gelb und Orange die Darstellung des NDVI (Mittelwert 0,54) beherrschen. Das zweigipflige Balkendiagramm wird von dem Gipfel bei niedrigen Werten dominiert.

Veränderungen im Wasserhaushalt und Baumwachstum

Ein periodisch defizitärer Landschaftswasserhaushalt in Nordostdeutschland war für das GFZ der Anlass, 2009/2010 am Großen Füstenseer See-Hinnensee hydrologische, dendroökologische und seegeschichtliche Untersuchungen im Rahmen von TERENO-Nordost zu beginnen (Kaiser et al., 2012). Der Wasserspiegel des Füstenseer Sees wird aber bereits seit längerem gemessen. Auffällig ist von 1995 bis 2010 ein negativer Seespiegeltrend mit einer maximalen Seespiegelabsenkung von etwa 1 m, was Uferlinienverschiebungen und Strandbildungen zur Folge hatte. Diese führten zu einer starken (Naturschutz-)behördlichen, öffentlichen und wissenschaftlichen Wahrnehmung. Ab dem Herbst 2010 stieg der Wasserspiegel wieder an, um dann seit 2013 wieder zu fallen. Er lag im Herbst 2018 bei nur 28 cm über dem historischen Minimum von 2006 (Abb. 4). Das Jahr 2018 zeigt einen besonders starken Abfall. Die abfallenden Trends des Füstenseer Sees sind zwar deutlich zu erkennen. Sie sind aber relativ gedämpft, wie insbesondere im Vergleich mit dem im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin gelegenen Redernswalder See deutlich wird, der sehr viel steilere Abfälle zu verzeichnen hat (Kaiser et al., 2015).

Auch die Bodenfeuchtedaten am Standort Hinnensee, einem Teilbecken des Großen Füstenseer Sees, zeigen die besondere Dynamik des Jahres 2018 (Abb. 5): bis April zunächst nass bis überdurchschnittlich nass, danach folgte eine starke und kontinuierliche Austrocknung, die, anders als in normalen Jahren, kaum durch die normalerweise auftretenden gelegentlichen Sommerregen unterbrochen wurde. Ab Anfang Juni wurde das physikalisch begründete Minimum der Bodenfeuchte erreicht. Dieses Minimum wurde auch schon in vorherigen Jahren erreicht, allerdings immer nur für kurze Zeiträume und nicht langfristig wie 2018. Da das durch die Sommerregenereignisse zur Verfügung

gestellte Wasser normalerweise direkt durch den Waldbestand aufgenommen wird, war zu erwarten, dass die Bäume 2018 besonders unter einem Mangel litten. Dies sollte zu allererst für Bäume gelten, die weiter oben am Hang (rechte Spalte) angesiedelt sind, da diese grundwasserfernen Standorte trockener sind als die Standorte direkt am See, wo der Abstand zum Grundwasser nur zwischen 0,5 und 4 m beträgt (linke Spalte).

Die mit Punktdendrometern (Abb. 6) kontinuierlich gemessenen Wachstumsdaten der Baumarten Buche, Eiche und Kiefer zeigen jedoch unterschiedliche Reaktionen auf die extremen Verhältnisse des Jahres 2018 (Abb. 7).

Während die Buche mit erstaunlich gutem Wachstum besonders an dem grundwasserfernen Standort überrascht, zeigen die beiden anderen Baumarten starke Wachstumseinbrüche. Das ist deshalb so überraschend, weil Buchen als wenig trockenresistent gelten (Scharnweber et al., 2011). Eine Erklärung könnte darin liegen, dass die Buchen noch von der vorhandenen Restfeuchte im Boden profitieren und so einen normalen Jahrring formen konnten, bevor die extreme Trockenheit Anfang Juni einsetzte. Die Diagramme in Abb. 7 zeigen auch deutlich, dass das Wachstum der Buchen früher im Jahr einsetzte und auch endete. Die Wachstumskurve verläuft allerdings steiler als in den Jahren zuvor, d. h. trotz kürzerer Wachstumsperiode konnten die Buchen wegen des schnelleren Wachstums einen normalen Jahrring produzieren. Für Eichen und Kiefern setzt das Wachstum zu ähnlichen Zeiten ein, wie bei den Buchen, wobei es bei den Eichen früher endete und bei den Kiefern langsamer verlief und dementsprechend die Jahrringe 2018 schmaler ausfielen. Für alle drei Baumarten bleibt abzuwarten, wie sich der extrem trockene Sommer auf den Verlauf des Jahrrings 2019 auswirken wird. Es ist zu vermuten, dass der Trockenstress in 2018 zu einer Unterversorgung der Bäume geführt hat. Daraus resultiert, dass die fehlenden Reserven im Frühjahr 2019 zu einer Wachstumsverzögerung führen werden, weil die Bäume nach der Winterruhe erst neue Photosyntheseprodukte bilden müssen, mit denen dann die Holzzellen des Jahrrings 2019 produziert werden können. Die Baumschäden durch das extreme Jahr 2018 scheinen aber begrenzt und wahrscheinlich durch den zu Beginn noch feuchten Boden gemildert gewesen zu sein.

Auswirkungen auf die Wiedervernässung von Mooren und deren Treibhausgasbilanz

Landwirtschaft auf drainierten Moorböden verursacht 4,5 % der bundesweiten CO₂-Emissionen und mehr als 30 % der landesweiten CO₂-Emissionen in Mecklenburg-Vorpommern. Die Wiedervernässung von ehemals drainierten Moorstandorten ist eine Managementmaßnahme des Natur- und Klimaschutzes, um natürliche Moorfunktionen wie die Puffer- und Filterkapazität (zur Gewässerreinigung), die Kohlenstoffspeicherung (zum Klimaschutz) und die Habitatvielfalt (für Biodiversitäts- und Artenschutz) wiederherzustellen.

Seit Mai 2013 werden im Rahmen von TERENO-Nordost auf dem in 2004/2005 wiedervernässten Niedermoorstandort Zarnekow



Abb. 6: Punktdendrometer, hier installiert an einer Eiche, messen ununterbrochen seit 2012 halbstündig das Dickenwachstum von 36 Bäumen im Müritz-Nationalpark. (Foto: I. Heinrich, GFZ)

Fig. 6: Point dendrometers, installed on an oak tree, have been measuring the stem growth of 36 trees on a half-hourly basis since 2012 in Müritz National Park.

im Peenetal kontinuierlich Treibhausgasflüsse (CO₂ und CH₄) mit Hilfe der Eddy-Kovarianz-Technik bestimmt, um die Entwicklung der Kohlenstoffquellen- bzw. -senkendynamik zu untersuchen und gegebenenfalls Handlungsoptionen zur Optimierung des Managements geben zu können.

Die Kohlenstoffdynamik hängt dabei von zahlreichen interagierenden Faktoren ab wie z. B. der Landnutzungsgeschichte, der Hydrologie, dem Wasserstandmanagement und nicht zuletzt vom Wetter und Klima. So hatten die extremen meteorologischen Bedingungen des Sommers 2018 vielfältige und bereits kurzfristig sichtbare Auswirkungen auf den Polder Zarnekow. Wie schon im ebenfalls sehr niederschlagsarmen Jahr 2016 fiel beispielsweise der im Rahmen von TERENO intensiv untersuchte und üblicherweise durch Überstau und eutrophes Flachwasser gekennzeichnete Polder vollständig trocken (Abb. 8). Beginnend bei einem Pegel höchststand von etwa 120 cm (Mitte April) sank der Wasserspiegel kontinuierlich bis zur weitgehenden Austrocknung Mitte August und dem vollständigen Verlust des Oberflächenwassers (Mitte September). Am 13. Oktober 2018 begann abrupt der erneute Überstau der Fläche, gefolgt von einem starken Anstieg des Wasserstands in den letzten Oktobertagen. Diese vorübergehenden Austrocknungsphasen begünstigten offenbar die sprunghafte Ausbreitung der vor allem aus Rohrkolben bestehenden Randvegetation, die allein seit der Vegetationsperiode 2016 um etwa 40 m in die Wasserfläche hineingewachsen ist und 2018 besonders stark zunahm. Diese zunehmende Kolonisation mit Rohrkolben könnte einen positiven Rückkopplungseffekt auf die Evapotranspiration und damit einen negativen Effekt auf die künftigen Wasserstände im Polder auslösen. Seit Ende September/Anfang Oktober 2018 konnte zudem eine vollständige Begrünung der zuvor weitgehend vegetationsfreien, trockengefallenen Fläche beobachtet werden. Ob und wie sich diese Vegetationsdynamik – neben den sofortigen Auswirkungen auf Photosynthese und Respiration – nach dem winterlichem Absterben der Biomasse

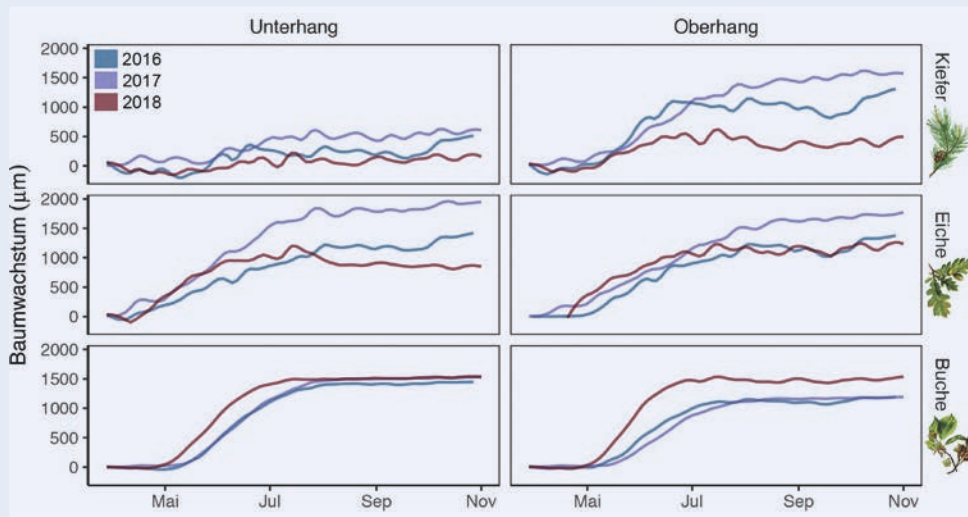


Abb. 7: Jährlicher Wachstumsverlauf der Baumarten Kiefer, Eiche und Buche (von oben nach unten) am Standort Hinnensee (2016 bis 2018)

Fig. 7: Annual course of growth of pine, oak and beech (from top to bottom) at site Hinnensee (2016 to 2018)

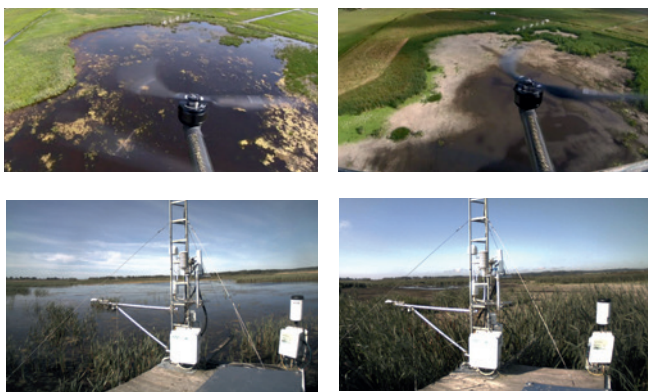


Abb. 8: Vegetations- und Wasserstandsentwicklung am Polder Zarnekow am 23. Mai 2018 (links) und am 5. September 2018 (rechts) (Fotos: Institut f. Flugführung, TU Braunschweig und GFZ)

Fig. 8: Vegetation and water level dynamics at the polder Zarnekow on 23 May 2018 (left) and on 5 Sep. 2018 (right)

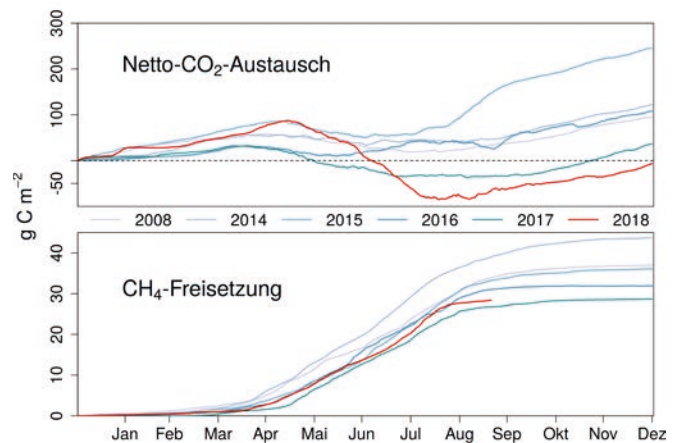


Abb. 9: Netto-CO₂-Austausch (oben) und Methanfreisetzung (unten) in 2018 am Polder Zarnekow im Vergleich zu den Vorjahren

Fig. 9: Net-CO₂-exchange (top) and methane emissions (bottom) in 2018 at polder Zarnekow in comparison to previous years

auf die langfristigen Stoffflüsse auswirken wird, ist eine der wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich aus dem Dürrejahr 2018 ergeben. Entscheidend für die langfristig folgende Entwicklung der Treibhausgasflüsse wird sein, wie mikrobielle Gemeinschaften auf das temporäre Austrocknen des Polders und die sprunghafte Begrünung reagiert haben und wie nachhaltig diese Änderungen sind. Die Wiedervernässung des zuvor drainierten und landwirtschaftlich genutzten Durchströmungsmoors hatte die Gruppe der Methan bildenden Archaeen (einzellige Organismen) vor allem gegenüber Methan oxidierenden Bakterien deutlich begünstigt (Wen *et al.*, 2018). Die Dürre 2018 könnte zu einem Verschieben innerhalb beider Gruppen geführt haben, so dass sich der Prozess der Methanoxidation trotz erneutem Wasserspiegelanstieg nachhaltig etabliert haben könnte. Erste Ergebnisse aus Probenahmekampagnen im Herbst 2018 deuten an, dass die Methangehalte im Torfkörper leicht zurückgegangen sind. Die kurzfristigen Auswirkungen auf Wärme- und Stoffflüsse im Untersuchungsgebiet sind Gegenstand bereits laufender Analysen. Neben einem im Vergleich zu den Vorjahren deutlich stärkeren Anstieg der CO₂-Freisetzung durch Respiration konnte – konsistent mit der Ausbreitung der Vegetation – ab Mitte Mai ein noch stärkerer Anstieg der Photosyntheseleistung beobachtet werden,

so dass der Polder seit Anfang Juni eine deutliche CO₂-Senke darstellte. Diese außergewöhnliche Produktivität kompensierte bis Jahresende die Respiration vollständig, sodass das Jahr 2018 das erste Jahr seit der Wiedervernässung 2004/2005 war, in dem der Polder in der Jahresbilanz eine Netto-CO₂-Senke darstellte. Unabhängig von den meteorologischen Bedingungen des Jahres 2018 scheint hingegen die Freisetzung von Kohlenstoff durch Methan weiterhin einem bereits seit einigen Jahren zu beobachtenden abnehmenden Trend zu folgen (Abb. 9).

Jahreszeitliche Effekte und Extremjahre in Seewasserisotopen

Seit 2012 wird der Tiefe See bei Neu-Gaarz in Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen von TERENO-Nordost durch das GFZ umfassend mittels Langzeitmonitoring und Geoarchiven untersucht. Der Tiefe See besitzt infolge seiner jahresweise geschichteten (warvierten) Sedimente eines der wenigen Archive, das für eine zeitlich hochaufgelöste Paläoklimarekonstruktion seit dem Ende der letzten nordischen Eiszeit geeignet ist. Das Monitoring ist Voraussetzung, um den Einfluss sich ändernder Umweltbedingungen auf den See und die in ihm gebildeten sowie abgelagerten Sediment zu

verstehen. Diese Erkenntnisse werden dann zur Interpretation der Sedimentkerne genutzt, um klimarelevante Veränderungen besser erkennen und rekonstruieren zu können.

Das Monitoring umfasst die sensorbasierte Erfassung physikalischer Parameter in der Wassersäule durch kontinuierlich messende Sensoren (Wassertemperatur), die monatliche Probennahme und chemische Analyse des Seewassers sowie die Beobachtung der saisonalen Sedimentbildung in Sedimentfallen in verschiedenen Wassertiefen. Meteorologische Daten werden mit einer Wetterstation, die auf einer Plattform an der tiefsten Stelle auf dem See installiert wurde, seit 2015 einschließlich eines monatlich beprobten Regenwassersammlers, erfasst. Die stabilen Isotopenverhältnisse des Wassers ($\delta^{18}\text{O}$ und δD) geben Auskunft über den Wasserkreislauf und spiegeln den Einfluss von Regen-, Oberflächen- und Grundwasser sowie von Verdunstungsprozessen wider. Die Kenntnisse der Kontrollmechanismen der Isotopenverhältnisse des Seewassers sind eine Voraussetzung für die Rekonstruktion des vergangenen Klimas anhand von $\delta^{18}\text{O}$ -Werten in Karbonaten aus Sedimentkernen oder δD -Werten von Pflanzenwachs (Leng und Marshall, 2004). Die stabilen Isotopenverhältnisse des Wassers werden im Wasserisotopenlabor der GFZ-Sektion „Klimadynamik und Landschaftsentwicklung“ analysiert.

Das trockene Jahr 2018 war im Untersuchungszeitraum im Vergleich zum feuchten Jahr 2017 und dem Durchschnittsjahr 2016 durch Extrembedingungen gekennzeichnet (Abb. 10 und 11). Im Jahr 2018 war der Niederschlag um rund 200 mm niedriger als der Jahresdurchschnitt, und die Wassertemperatur erreichte im Sommer 2018 mit 26 °C Höchstwerte im Vergleich zu maximal 23 °C in den vorherigen Jahren. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des Oberflächenwassers (sog. Epilimnion) liegen normalerweise bei etwa -5 ‰ im Winter und steigen mit zunehmender Verdunstung und Temperatur im Sommer auf -4 ‰ an. Im Sommer 2018 wurden die höchsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit fast -3 ‰ erreicht. Dieser Anstieg im $\delta^{18}\text{O}$ entspricht einem hohen Verdunstungsverlust des Oberflächenwassers und korreliert mit der Abnahme des Seepiegels um rund 80 cm.

Die Übertragung der Erkenntnisse aus dem Monitoring auf die Ergebnisse hochauflösender Untersuchungen der Sedimentkerne mit mikrofaziellen und geochemischen/isotopengeochemischen Methoden wird für die verbesserte Abschätzung der zukünftigen Klimaentwicklung benötigt. Zum Erkennen regionaler und überregionaler Muster von lang- und kurzfristigen Klimaschwankungen zwischen atlantisch und eher kontinental geprägtem Klima wird ein vergleichbares Monitoring zusammen mit Partnern von der Polnischen Akademie der Wissenschaften an Seen im nördlichen Polen an gleichfalls warvierten Seen in ähnlicher geologischer Position durchgeführt.

Veränderte Feuer- und Waldbranddynamik

Im Gebiet von TERENO-Nordost war und ist der Faktor Feuer ein wichtiger Umweltfaktor, der durch eine am GFZ erstellte Rekonstruktion der Feuerdynamik für etwa die letzten 11 000 Jahre näher beleuchtet wurde (Dietze et al., 2018). Die Daten verdeutlichen, dass eine hohe Feueraktivität in den letzten Jahrtausenden eng



Abb. 10: Blick auf das Ostufer des Tiefen Sees im Mai (oben) und November (unten) 2018. Die weiße Linie kennzeichnet die ungefähre ursprüngliche Uferlinie. (Fotos: S. Pinkerneil, GFZ)

Fig. 10: View on the eastern shore of Lake Tiefer See in May (top) and November (bottom) 2018. The white line marks the approximate original shore line.

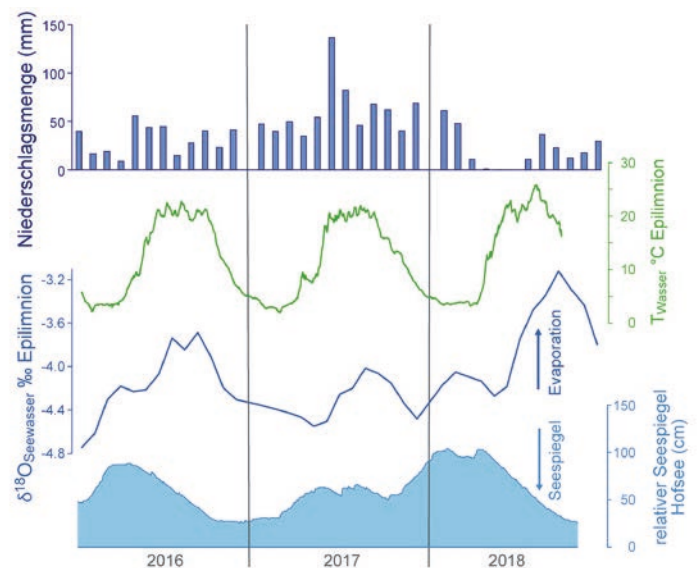


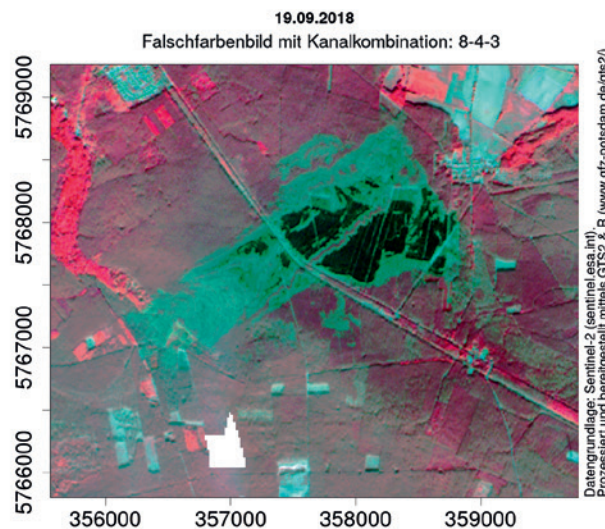
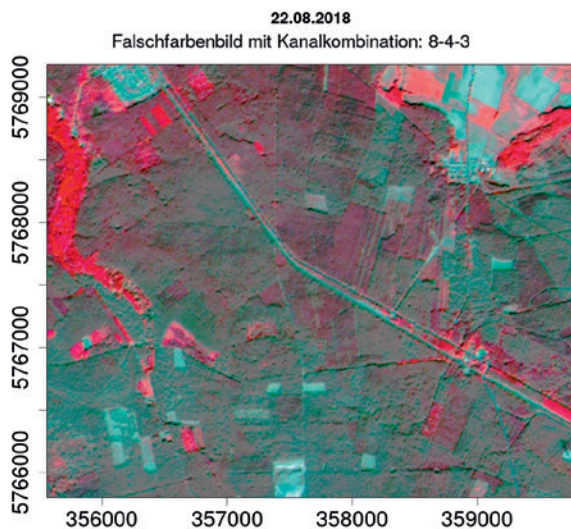
Abb. 11: Sauerstoffisotopenwerte ($\delta^{18}\text{O}$) des Epilimnion-Seewassers (Oberflächenwasser) am Standort Tiefer See im Vergleich zum Seespiegel des hydrologisch verbundenen Hofsees, der Wassertemperatur des Epilimnions im Tiefen See und der Niederschlagsmenge von 2016 bis 2018

Fig. 11: Oxygen isotope values ($\delta^{18}\text{O}$) of the epilimnic lake water (lake surface water) at lake Tiefer See compared to the relative lake level of the hydrological connected lake Hofsee, the epilimnic water temperature at lake Tiefer See and the precipitation amount over the period 2016 to 2018



Abb. 12: Waldbrände in Brandenburg. Oben: Statistik der Waldbrandflächen (1998-2018; Daten: Landesforst Brandenburg) vor dem Hintergrund einer Schrägluftbildaufnahme des etwa 400 ha großen Waldbrandes bei Treuenbrietzen südwestlich von Berlin im August 2018 (Foto: Jens Berger). Unten: Satellitenaufnahmen dieser Waldbrandfläche unmittelbar vor (links) und nach dem Brand (rechts)

Fig. 12: Forest fires in Brandenburg. Top: Forest area burnt during the period 1998-2018 (data: Landesforst Brandenburg) on top of an aerial photo showing the fire that burnt around 400 ha near Treuenbrietzen southwest of Berlin in August 2018. Below: Satellite images of the same burnt area shortly before (left) and after (right) of the fire



mit menschlicher Landnutzung gekoppelt war. Dabei wurde Feuer auf verschiedene Weise in den ehemals weit verbreiteten Laubmischwäldern als Werkzeug zur Landnutzung verwendet. Blitzschläge verursachten hingegen nur in sehr trockenen Sommern natürliche Waldbrände. Mit der industriellen Revolution im 18./19. Jahrhundert setzte die Forstwirtschaft jedoch vermehrt auf leicht entflammare Kiefernmonokulturen zur Holzversorgung und baute die natürlichen, wenig brennbaren Laubmischwälder um. Die aktive Feuernutzung sowie spontane Feuer wurden mit Brandschutzmaßnahmen weitgehend aus der Landschaft verbannt. Diese Maßnahmen waren bisher sehr erfolgreich. Allerdings häufen sich im Zuge des Klimawandels die extrem trockenen Sommer und damit auch die Waldbrände, wie z. B. die großflächigen Feuer in den Wäldern Brandenburgs des Sommers 2018 infolge der ausgeprägten Trockenheit (Abb. 12, Trockenjahr 2003: rund 600 ha, Trockenjahr 2018: rund 1660 ha). Unter extremen Bedingungen scheinen die getroffenen Maßnahmen offenbar noch nicht wirksam genug zu sein. Insbesondere ist ein vorbeugender Schutz vor Bränden durch den Waldumbau hin zu einem höheren Laubholzanteil und die vermehrte Pflanzung von Waldbrandriegeln naheliegend.

Denn Waldbrände bedeuten nicht nur ökonomische Einbußen in der Forstwirtschaft, sie stellen auch Risiken für Siedlungen und Infrastrukturen dar und beeinflussen längerfristig die Erholungsfunktionen der Wälder. Auch die natürlichen Stoffumsätze und Ökosystemfunktionen in den Wäldern werden zumeist für Jahre bis Jahrzehnte nachteilig verändert. Durch Modifikationen der Waldstrukturen, der Albedo und der Oberflächenstrukturen der verbrannten Waldflächen kommt es zu längerfristigen Veränderungen wichtiger Größen wie z. B. Niederschlagsinfiltration, Schneeakkumulation und Grundwasserneubildung im Vergleich zu intakten Wäldern. Häufen sich Waldbrände, kann somit auch die Regulierungsfunktion der Wälder in den Wasser-, Energie- und Stoffkreisläufen verändert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Extremsommer 2018 war für TERENO-Nordost eine besondere Möglichkeit, die regionalen Auswirkungen von Klimaänderungen zu messen. Die Wetterlage hat tiefe Spuren in der Landschaft Nordostdeutschlands hinterlassen. Eine der Folgen waren viele

Waldbrände. Ein Großbrand vernichtete südwestlich von Berlin allein etwa 400 ha Wald. An den Standorten von TERENO-Nordost zeigten sich teilweise extreme Reaktionen der Ökosysteme. So fiel der Polder Zarnekow bei Demmin zum ersten Mal seit seiner Wiedervernässung trocken, mit noch nicht abzusehenden Folgen für die mikrobiellen Gemeinschaften und den Gasaustausch. Die Wälder im Müritz-Nationalpark hingegen haben den Extremsommer relativ gut überstanden, auch weil die Monate vor der großen Trockenheit überdurchschnittlich feucht waren. Besonders die Buchen waren in der Lage, die im Frühjahr noch vorhandene hohe Bodenfeuchte für ein gutes Dickenwachstum zu nutzen. Die Messdaten des Folgejahres 2019 für die verschiedenen Monitoringstandorte werden wichtige Aufschlüsse geben, wie die Langzeitwirkungen eines solchen Extremjahres ausfallen.

In Zukunft wird TERENO-Nordost zusammen mit dem neuen modularen Erdsystemobservatorium der Helmholtz-Gemeinschaft MOSES (Modular Observation Solutions for Earth Systems) bei extremen Wettersituationen noch besser ereignisbezogen und räumlich flexibel Umweltdaten für besonders betroffene Gebiete erheben, um Wechselwirkungen zwischen kurzfristigen Ereignissen (MOSES) und langfristigen Trends (TERENO) für ausgewählte Landschaftsbereiche zu untersuchen. Die so gewonnenen Umweltdaten bilden eine Grundlage für prognosefähige Systemanalysen, um beispielsweise die Einflüsse von Klima- und Landnutzungsänderungen auf die langfristige Verfügbarkeit und Qualität von Wasser- und Bodenressourcen zu verbessern. Aus diesen Erkenntnissen können Handlungsoptionen im Zuge einer verbesserten Anpassung an den Klima- und Landschaftswandel mit seinen jeweils regionalspezifischen Auswirkungen und Herausforderungen abgeleitet werden.

Literatur

- Bens, O., Schwank, M., Blume, T., Brauer, A., Güntner, A., Heinrich, I., Helle, G., Itzerott, S., Kaiser, K., Sachs, T., Hüttl, R. F. J. (2012): TERENO: eine Monitoring- und Forschungsplattform zur Erfassung langfristiger Auswirkungen des Globalen Wandels auf regionaler Ebene. - *System Erde*, 2, 1, pp. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.01.13>
- Dietze, E., Theuerkauf, M., Bloom, K., Brauer, A., Dörfler, W., Feeser, I., Feurdean, A., Gedminien, L., Giesecke, T., Jahns, S., Karpi ska-Kołaczek, M., Kołaczek, P., Lamentowicz, M., Latałowa, M., Marcisz, K., Obremska, M., P dziszewska, A., Poska, A., Rehfeld, K., Stan ikait , M., Stivrins, N., wi ta-Musznicka, J., Szal, M., Vassiljev, J., Veski, S., Wacnik, A., Weisbrodt, D., Wiethold, J., Vannièrè, B., Stowi ski, M. (2018): Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. - *Quaternary Science Reviews*, 201, pp. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.005>
- Dietze, E., Slowinski, M., Zawiska, I., Veh, G., Brauer, A. (2016): Multiple drivers of Holocene lake level changes at a lowland lake in northeastern Germany. - *Boreas*, 45, 4, pp. 828–845. DOI: <https://doi.org/10.1111/bor.12190>
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2018): Deutschlandwetter im Jahr 2018, verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2018/20181228_deutschlandwetter_jahr2018_news.html [letzter Zugriff: 15.03.2019]
- Germer, S., Kaiser, K., Bens, O., Hüttl, R. F. J. (2011): Water Balance Changes and Responses of Ecosystems and Society in the Berlin-Brandenburg Region - a Review. - *Die Erde*, 142, 1-2, pp. 65–95.
- Heinrich, I., Balanzategui, D., Bens, O., Blasch, G., Blume, T., Böttcher, F., Borg, E., Brademann, B., Brauer, A., Conrad, C., Dietze, E., Dräger, N., Fiener, P., Gerke, H. H., Güntner, A., Heine, I., Helle, G., Herbrich, M., Harfenmeister, K., Heußner, K.-U., Hohmann, C., Itzerott, S., Jurasinski, G., Kaiser, K., Kappler, C., Koebisch, F., Liebner, S., Lischeid, G., Merz, B., Missling, K. D., Morgner, M., Pinkerneil, S., Plessen, B., Raab, T., Ruhtz, T., Sachs, T., Sommer, M., Spengler, D., Stender, V., Stüve, P., Wilken, F. (2018): Interdisciplinary Geo-ecological Research across Time Scales in the Northeast German Lowland Observatory (TERENO-NE). - *Vadose Zone Journal*, 17, 1, 180116. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2018.06.0116>
- Kaiser, K., Germer, S., Küster, M., Lorenz, S., Stüve, P., Bens, O. (2012): Seespiegelschwankungen in Nordostdeutschland: Beobachtung und Rekonstruktion. - *System Erde*, 2, 1, pp. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.2312/GFZ.syserde.02.01.12>
- Kaiser, K., Koch, P. J., Mauersberger, R., Stüve, P., Dreibrodt, J., Bens, O. (2014): Detection and attribution of lake-level dynamics in north-eastern central Europe in recent decades. - *Regional Environmental Change*, 14, 4, pp. 1587–1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0600-5>
- Kaiser, K., Heinrich, I., Heine, I., Natkhin, M., Dannowski, R., Lischeid, G., Schneider, T., Henkel, J., Küster, M., Heussner, K.-U., Bens, O., Chmielewski, J. (2015): Multi-decadal lake-level dynamics in north-eastern Germany as derived by a combination of gauging, proxy-data and modeling. - *Journal of Hydrology*, 529, Pt. 2, pp. 584–599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.057>
- Leng, M. J., Marshall, J. D. (2004): Paleoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. – In: *Quaternary Science Reviews*, 23, 7-8, pp. 811–831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.012>
- Scharnweber, T., Manthey, M., Criegee, C., Bauwe, A., Schröder, C., Wilkening, M. (2011): Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. – In: *Forest Ecology and Management*, 262, 6, pp. 947–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.026>
- Wen, X., Unger, V., Jurasinski, G., Koebisch, F., Horn, F., Rehder, G., Sachs, T., Zak, D., Lischeid, G., Knorr, K.-H., Böttcher, M. E., Winkel, M., Bodelier, P. L. E., Liebner, S. (2018): Predominance of methanogens over methanotrophs in rewetted fens characterized by high methane emissions. - *Biogeosciences*, 15, pp. 6519–6536. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-15-6519-2018>