

Peter Wattendorf, Jörg Niederberger, Otto Ehrmann und Werner Konold

Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt von Niedermooren in Baden-Württemberg

Consequences of climate change on the water balance of fen peatlands in Baden-Wuerttemberg

Bei der Betrachtung und Analyse von Auswirkungen des Klimawandels auf hydrologische Prozesse liegen die Schwerpunkte auf Projektionen und Prognosen zukünftigen Abflussgeschehens, potentieller Hochwassergefährdungen und Grundwasserneubildung. Im naturschutzfachlichen Bereich wurde bislang sowohl auf nationaler als auch regionaler Ebene meist auf der Basis von Temperaturänderungen versucht, Verschiebungen von Artarealen zu prognostizieren und daraus die zukünftige Vegetation sowie Extinktionsrisiken für Arten aufgrund ihrer Temperaturpräferenzen abzuleiten (CHMIELEWSKI et al. 2005, POMPE et al. 2009). Weit weniger Beachtung wird bisher dem Standort als Gefüge aller auf die Vegetation einwirkender abiotischer Faktoren geschenkt. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass der Klimawandel neben der Erhöhung der Temperatur weitere Standortfaktoren verändert. Hier ist in erster Linie der Wasserhaushalt zu nennen (HERBST & HÖRMANN 1998). Niedermoore sind wie alle wasserbeeinflussten Biotope in ihrer Entstehung, Verbreitung, Ausprägung und ihrem ökologischen Wert eng an den regionalen oder lokalen Wasserhaushalt gebunden. Es wird deshalb angenommen, dass der Klimawandel diese Habitats und die in ihnen vorkommenden Artengemeinschaften tiefgreifend beeinflussen wird (IPCC 2001). Pflanzen der Feuchtgebiete sind aufgrund ihrer Anpasstheit an bestimmte Wasserhaushaltsregime unter der speziellen Faktorenkombination aus Temperatur, Niederschlag und Verdunstung besonders vulnerabel gegenüber Klimaänderungen (DAWSON et al. 2003). Mit Hilfe modellierter Wasserhaushaltsszenarien wird am Beispiel zweier Niedermoor-Naturschutzgebiete in Baden-Württemberg, dem „Erlenbruch Lichteler Landturm“ und dem „Birkenweiher“, gezeigt, wie sich Klimaänderungen auf Wasserhaushalt, Standorteigenschaften und Vegetation auswirken können.

Schlagwörter: Klimawandel, Niedermoor, Standorteigenschaften, Vulnerabilität, Wasserhaushalt

Considerations and analyses of the consequences of climate change on hydrological processes focus on projections and predictions of the future runoff behaviour, potential risk of flooding, and groundwater recharge. Nature conservationists have tried both at national and regional levels to predict – mainly from changes in air temperature – shifts in species ranges and derive the extinction risks of species from their temperature preferences (CHMIELEWSKI et al. 2005, POMPE et al. 2009). Much less attention was granted to the site as an aggregate of all abiotic factors influencing vegetation. However, it must be presumed that climate change will alter – next to temperature – other site factors as well; in the first instance the water balance at the site (HERBST & HÖRMANN 1998). Fens, like all other water-influenced biotopes, depend in their emergence, distribution, form, and their ecological valuation closely on the regional and local water balance. That is why one expects that climate change will profoundly influence these habitats and their species communities (IPCC 2001). Because of their adaptation to a certain water-balance regime under a specific combination of the factors „temperature“, „precipitation“, and „evaporation“, plants are particularly vulnerable by climate change (DAWSON et al. 2003). This paper uses modelled water-balance scenarios of two nature reserves in Baden-Wuerttemberg, the alder-carr „Erlenbruch Lichteler Landturm“ and the fen „Birkenweiher“ to examine how climate changes may affect the water balance, the site characteristics, and the vegetation.

Keywords: Climate change, fen, site characteristics, vulnerability, water balance

1 Ausgangslage

Aussagen über Einflüsse des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt konkreter Standorte benötigen räumlich hoch aufgelöste Projektionen der zu erwartenden regionalen Klimaänderungen in Südwestdeutschland. Im Gemeinschaftsprojekt KLIWA der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie des DWD wurden Szenarien für regionale Klimaänderungen im Zeithorizont 2021 bis 2050 berechnet. Die statistisch-dynamische Modellierung nach der Meteo-Research-Methode (MR-Modell, ENKE & SPEKAT 1997) stellt plausible Ausgangswerte für regionalisierte Projektionen der Klimaveränderung zur Verfügung (KLIWA 2006). Der Regionalisierungsansatz basiert auf globalen ECHAM4-Modellierungen sowie dem hinsichtlich seiner Auswirkungen auf die prognostizierten globalen Lufttemperaturen im mittleren Bereich angesiedelten und von KLIWA (2006) für Europa als plausibel angesehenen SRES-Emissionsszenario B2 nach IPCC (2000).

Obwohl der Wasserhaushalt allgemein als wichtiger Standortfaktor angesehen wird, gibt es keine flächendeckenden Messwerte von Grundwasserständen und Bodenwassergehalten. Ökologische Untersuchungen sind meist auf kurze Zeiträume von wenigen Jahren beschränkt und messen selten mehr als den oberflächennahen Grundwasserstand. Deshalb fehlt es an langen Datenreihen, welche die ganze Bandbreite der Auswirkungen von Wetter und Witterung auf den Wasserhaushalt konkreter Standorte abbilden können, wie sie zum Beispiel die Jahre 2002 mit weit überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen und 2003 mit einem außergewöhnlichen trocken-warmen „Jahrhundertssommer“ repräsentieren. Die einzige praktikable Möglichkeit zur Betrachtung des Wasserhaushalts beliebiger Standorte über längere Zeiträume hinweg ist deshalb der Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen. Modelle können nicht nur den Wasserhaushalt der Vergangenheit berechnen, sie ermöglichen darüber hinaus auch Projektionen in die Zukunft. Wasserhaushaltsmodelle können aber nicht mit Klimadaten oder Klimaprojektionen arbeiten, sondern es müssen zeitlich hoch aufgelöste Wetterdaten (Tageswerte) zur Verfügung stehen.

2 Untersuchungsgebiete

Die Wasserhaushaltsbetrachtungen der beiden Niedermoor-Naturschutzgebiete „Erlenbruch Lichteler Landturm“ im Tauberland und „Birkenweiher“ im Bodenseebecken (Abb. 1) wurden im Rahmen des Forschungsprogramms „Herausforderung Klimawandel“ des Landes Baden-Württemberg¹ realisiert. Im Teilprojekt „Auswirkungen des Klimawandels auf Biotope Baden-Württembergs“ wurden neben den beiden genannten Niedermooren zehn weitere nicht grundwasserbeeinflusste Biotope betrachtet, die für die jeweilige Region und das Land typisch und repräsentativ sind und besondere naturschutzfachliche oder landschaftspflegerische Werte beinhalten.

Für die Wasserhaushaltsmodellierung wurden Gebiete mit heute unterschiedlichem Klima ausgewählt, die nach den regionalisierten Projektionen (KLIWA 2006) außerdem unterschiedlich von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein sollen. Ein weiteres Auswahlkriterium für die beiden Niedermoor-Untersuchungsgebiete war ein möglichst naturnaher Wasserhaushalt mit einer überschaubaren Anzahl von Einflussfaktoren und Regulationsmechanismen, der Auswirkungen des Klimas weitgehend ungefiltert wiedergeben würde. Die Gebiete sollten deshalb beispielsweise nicht von Fließgewässern gespeist sein.

Das Naturschutzgebiet „Erlenbruchwald beim Lichteler Landturm“ liegt in Nordostwürttemberg (Abb. 1) wenige Kilometer südlich von Creglingen. Im Naturraum der südlichen Tauberplatten und der gesamten relativ niederschlagsarmen Hohenloher Ebene (s. Abb. 2 und 5) ist dieser Biototyp sehr selten (BAUR

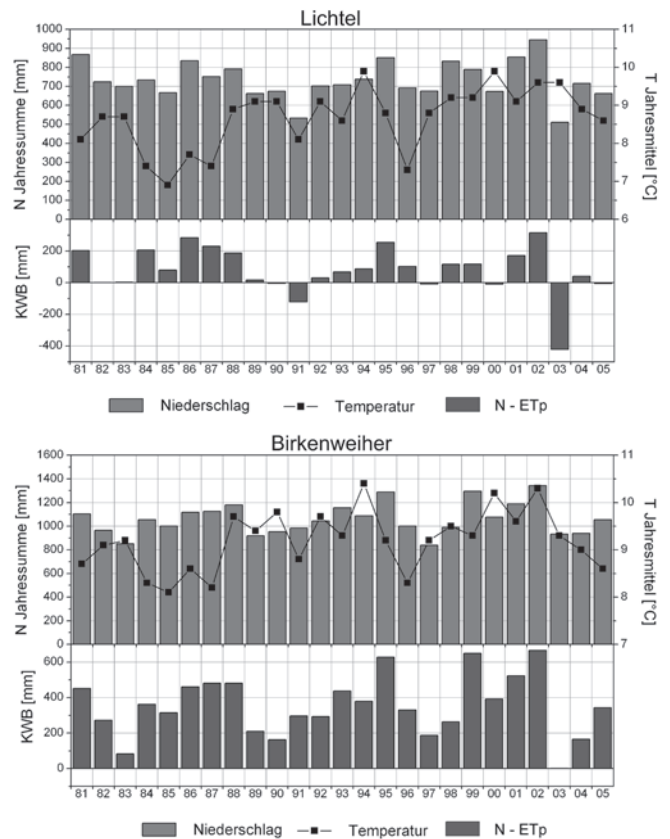


Abbildung 2 Niederschlag (Jahressummen), Temperatur (Jahresmittel) und klimatische Wasserbilanz (= Niederschlag - potentielle Evapotranspiration) der Untersuchungsgebiete Lichtel und Birkenweiher im Istzenario. Die Grafiken sind unterschiedlich skaliert. *Precipitation (annual sum), temperature (annual mean) and climatic water balance (= precipitation - potential evapotranspiration) in the investigation areas Lichtel and Birkenweiher, as-is scenario. (Graphs on different scales)*

1965). Dementsprechend groß ist die Bedeutung des Naturschutzgebietes, beispielsweise als vegetationsgeschichtliches Dokument (RP STUTTGART 2002).

Das Gebiet liegt auf einer mit Mischwald bestockten Anhöhe im Übergang zwischen Oberem Muschelkalk und Unterem Keuper auf circa 450 m Höhe. In einer von Tonschichten im Untergrund abgedichteten Doline staut sich lateral zuströmendes Wasser auf, so dass sich der nur 0,55 ha große Erlenbruch entwickeln konnte. Die Kuppenlage bedingt ein Einzugsgebiet von nur insgesamt 5,6 ha Größe, das damit absolut gesehen zwar sehr klein ist, aber die zehnfache Fläche des Erlenbruchs einnimmt (s. Abb. 6). Die Höhendifferenz im Einzugsgebiet beträgt weniger als 5 m. Pollenanalytische Untersuchungen der bis zu 1,7 m mächtigen Seggentorfschicht des Erlenbruchs belegen eine Entwicklungszeit von rund 8.000 Jahren mit sehr seltenen durchgängigen Pollenspektren (RP STUTTGART 2002). Die andauernd staunassen Verhältnisse verhindern, dass sich außer Erlen (*Alnus glutinosa*, *A. incana*) und Birken (*Betula pendula*, *B. pubescens*) andere Baumarten etablieren konnten (Abb. 3). Die Krautschicht besteht überwiegend aus Seggen (z.B. *Carex elongata*) und Torfmoosen, insgesamt ist der Biotop eher arm an Pflanzenarten.

Das Naturschutzgebiet „Birkenweiher“ liegt im Westallgäuer Hügelland zwischen Tettang und Laimnau auf ungefähr 510 m



Abbildung 1 Lage der Untersuchungsgebiete Erlenbruch Lichtel und Birkenweiher in Baden-Württemberg *Position of the investigation areas Erlenbruch Lichtel and Birkenweiher in Baden-Wuerttemberg*

¹ <http://www.herausforderung-klimawandel-bw.de>

**Abbildung 3**

Naturschutzgebiet „Erlenbruchwald beim Lichteler Landturm“ im Juli 2007
Nature reserve „Alder carr forest at the Lichteler Landturm“ in July 2007

Meereshöhe und nimmt eine Fläche von 12,9 ha ein. Das teilweise als Streuwiese genutzte Niedermoor liegt als waldwiesenartige Insel in seinem vollständig bewaldeten Einzugsgebiet von 27,2 ha Größe. Ein Grabensystem durchzieht das Gelände und bündelt sich zu einem kleinen Bach, der den Birkenweiher zentral entwässert. Der Wasserhaushalt und die relative Nährstoffarmut des Gebiets bestimmen überwiegend die Ausprägung der Vegetationsdecke. Als floristische Besonderheiten sind Pflanzen der Niedermoore, Kleinseggenriede und Pfeifengras-Streuwiesen hervorzuheben, beispielsweise Schwalbenwurz-Enzian (*Gentiana asclepiadea*), Echte Sumpfwurz (*Parnassia palustris*), Alpen-Wollgras (*Trichophorum alpinum*), Sumpf-Lappenfarn (*Thelypteris palustris*) sowie eine Reihe von Orchideenarten (KIEFER 2007). Das Niedermoor ist ein bedeutendes Habitat für seltene Schmetterlings- und Heuschreckenarten (RP TÜBINGEN 2006).

Das Gebiet unterliegt einem strengen Schutzregime einschließlich Betretungs- und Entwässerungsverbot und wird maschinell gepflegt. Die Pflege der ehemaligen Streuwiese orientiert sich an der Vegetation: Wo Neophyten wie Indisches Springkraut (*Impatiens glandulifera*) oder Goldrute (*Solidago gigantea*) aufkommen, wird früh gemäht, ansonsten spät im Jahr (RP TÜBINGEN 2006).

3 Vorgehensweise und Methoden

Grundlegende Idee der Untersuchung war es, den rezenten Wasserhaushalt der Gebiete als Istzustand exemplarisch einem Zukunftsszenario gegenüberzustellen, um klimawandelinduzierte Veränderungen beispielhaft zu quantifizieren. Da keine Messwerte zum Bodenwasserhaushalt der beiden Untersuchungsgebiete vorliegen, wurden sowohl der Istzustand als auch das Zukunftsszenario modelliert.

Als Grundlage für aussagekräftige Wasserhaushaltsmodellierungen wurden möglichst lange Wetterdatenreihen angesehen, um eine größtmögliche Bandbreite des Wettergeschehens abzubilden. Als Kompromiss zwischen Anspruch und Datenverfügbarkeit konnte der Zeitraum 1980 bis 2005 mit Wetterdaten folgender Untersuchungsgebiete nahe liegender DWD-Stationen abgedeckt werden: Für das Einzugsgebiet Lichtel (450 m ü. NN) standen Daten folgender Stationen zur Verfügung: Würzburg (268 m ü. NN, Globalstrahlung), Schrozberg-Spielbach (456 m ü.

**Abbildung 4**

Niedermoor-Naturschutzgebiet „Birkenweiher“ im Juli 2007
Nature reserve „Birkenweiher“ in July 2007

NN, Distanz 4 km, Niederschlag) und Rothenburg o.T. (412 m ü. NN, Lufttemperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit). Für das Gebiet Birkenweiher konnten Daten von Konstanz (443 m ü. NN, Globalstrahlung), Langenargen (399 m ü. NN, Distanz 7 km, Niederschlag) und Eriskirch-Mariabrunn (408 m ü. NN, Lufttemperatur, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit)² verwendet werden. Auf Grund des im Vergleich zur geringen Größe der Einzugsgebiete großen Abstandes der Stationen wurde auf eine manuelle Korrektur der Niederschlags- und Klimadaten innerhalb der Einzugsgebiete verzichtet. Die Wetterdaten der DWD-Stationen wurden anhand des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WABOA 2007) auf ihre Aussagekraft für die Untersuchungsgebiete kontrolliert.

Vegetations- und Landnutzungsdaten der Einzugsgebiete wurden im Zuge von Begehungen erhoben. Die teilweise unpublizierten Bodendaten des Einzugsgebietes des NSG Birkenweiher wurden dankenswerterweise vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (RP Freiburg, Referat 93 Landesbodenkunde, Dr. Wolfgang Fleck) zur Verfügung gestellt. Flächendeckende Bodendaten des Einzugsgebietes des NSG Lichtel wurden im Sommer 2007 von der Arbeitsgruppe selbst erhoben.

Der Wasserhaushalt der Niedermoore und ihrer Einzugsgebiete wurde mit dem Modell WASim-ETH Version II mit angekoppeltem Multi-Layer-2D-Grundwassermodell berechnet. Dieses Modell kann mit frei wählbarer zeitlicher und räumlicher Auflösung alle Komponenten des Wasserhaushalts für eine konkrete Raumeinheit modellieren (SCHULLA 1997, SCHULLA 2006). Es benötigt als Eingangsdatensatz die Topographie zur Ermittlung der Fließwege sowie der Regionalisierung der meteorologischen Eingangsdaten und eventueller Strahlungs-, Niederschlags-, oder Temperaturkorrekturen. Als meteorologische Eingangsdaten wurden Tageswerte von Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, relativer Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit herangezogen. Da die meteorologischen Eingangsdaten als Tageswerte zur Verfügung standen, wurde als Zeitschritt für die Modellierung ebenfalls ein Tag gewählt.

² Datenlücken wurden hier mit Werten der Station Sigmarszell-Zeisertsweiher (507 m ü. NN) ergänzt.

Die Modellierungen wurden mit dem auf der Richards-Gleichung basierendem WASim-Bodenmodul gerechnet. Es ermöglicht die Einbindung eines zweidimensionalen Grundwassermodells, in dem die Fließbewegungen der gesättigten Zone modelliert werden können (SCHULLA 2006). Das Modell berechnet die potentielle Evapotranspiration mit dem Penman-Monteith-Ansatz (MONTEITH 1975). Das Bodenmodul ermöglicht es, die reale Verdunstung (ETa) anhand der Saugspannung des Bodens gegenüber der potentiellen Verdunstung zu reduzieren. Neben einer Reduktion aufgrund zu geringer Bodenfeuchte wird auch der reduzierende Einfluss von zu hoher Bodenfeuchte durch anaerobe Verhältnisse – wichtig in Niedermooren – berücksichtigt. Über die Definition des Vegetationstyps gehen zusätzlich pflanzen-spezifische Grenzsugspannungen in die Berechnungen ein. Dies hat den Vorteil, dass die ETa realitätsnah sowohl von den Bodeneigenschaften als auch von der Art der Vegetation beeinflusst werden kann.

Aus einer Bodentabelle mit den Bodenarten des Einzugsgebietes und ihrer räumlichen Verteilung können dann gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) und van-Genuchten-Parameter abgeleitet werden (TEEPE et al. 2003, AG Boden 2005, SCHWÄRZEL et al. 2006). Für die Parametrisierung der Niedermoorflächen wurden die von WaSim-ETH bereitgestellten Standardwerte übernommen.

Weiterhin sind flächendeckende Landnutzungs- und Vegetationsdaten sowie ein digitales Geländemodell des Einzugsgebietes erforderlich. Da in Baden-Württemberg digitale Geländemodelle aus Airborne Laser Scanning-Daten in unterschiedlichen Rasterweiten ab 1 m zur Verfügung stehen, war es möglich, an der jeweiligen Fragestellung orientierte Auflösungen zu verwenden (SCHELLBERG et al. 2010): Im Wasserhaushaltsmodell WASim-ETH wurde ein Geländemodell mit 10 m Rasterweite verwendet, um den Umfang der Ausgabedaten überschaubar zu halten. Die Laserscanning-Bodenpunkte erzeugten in den bewaldeten Einzugsgebieten bei dieser Auflösung ein hinreichend genaues Höhenraster der Bodenoberfläche. Bei der Auswertung, beispielsweise zur grafischen Darstellung des Reliefs im Erlenbruch Lichtel selbst (s. Abb. 8), wurde jedoch ein detaillierteres Geländemodell mit Rasterweite von 1 m verwendet.

Die Wasserhaushaltsmodellierungen erfolgten in zwei Arbeitsschritten: Für den Istzustand oder das Nullszenario, im Folgenden Sz0 genannt, wurde der Wasserhaushalt von 1980/1981 bis 2005 modelliert³. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die klimatischen Bedingungen im Betrachtungszeitraum.

Tabelle 1
Regionalisierte Klimatrends für die Untersuchungsgebiete aus KLIWA (2006) und daraus ermittelte Korrekturfaktoren für die Berechnung der Tageswerte des Zukunftsszenarios; Sommer = Mai–Oktober, Winter = November–April
Trends of regional climatic change (KLIWA 2006) in the investigation areas and derivational factors to calculate daily meteorological data for the future scenario, summer = May–October, winter = November–April.

Gebiet Klimaänderung	Δ Niederschlag [%]		Δ Temperatur [°C]	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Erlenbruch Lichtel				
regionale Projektion (KLIWA 2006)	-5 bis -10	+20 bis +30	+1,2 bis +1,3	+2,0 bis +2,5
Zukunftsszenario: Korrektur um	-7,5	+25	+1,3	+2,5
Niedermoor Birkenweiher				
regionale Projektion (KLIWA 2006)	-5 bis -10	+10 bis +20	+1,3 bis +1,4	+2,0 bis +2,5
Zukunftsszenario: Korrektur um	-7,5	+15	+1,4	+2,5

Zur Modellierung der Einflüsse eines veränderten Klimas auf den Wasserhaushalt wurden die Tageswerte von mittlerer Lufttemperatur, Niederschlag und relativer Luftfeuchte des Zeitraums 1980 bis 2005 der oben genannten DWD-Stationen um den Wert der regionalisierten Klimaprojektionen für Sommer- und Winterhalbjahr in KLIWA (2006) korrigiert (s. Tab. 1). Die korrigierten Tageswerte dienen als Eingangsdaten für die Modellierung des Zukunftsszenarios (Sz1) über 26 Jahre im Zeithorizont nach 2021. Boden- und Vegetationsdaten des Istzustandes blieben bei der Modellierung des Zukunftsszenarios unverändert.

Da die Naturschutzgebiete Lichtel und Birkenweiher nicht mit Pegeln ausgestattet sind, stehen keine Abflussdaten zur Modellvalidierung zur Verfügung. Es gibt jedoch Daten und Beobachtungen, die eine Plausibilitätskontrolle der Modellergebnisse ermöglichen. So wird im Niedermoor NSG Birkenweiher im Laufe des Jahres mit Maschinen der Bewuchs gemäht. Dazu muss der Wasserspiegel so weit absinken, dass die Niedermoorfläche ohne größere Bodenschäden befahrbar ist, nach BLANKENBURG et al. (2001) mindestens 25 bis 35 cm unter Flur. Andererseits dürfen in Niedermooren die Grundwasserstände nicht dauerhaft oberflächenfern sein. Langjährigen eigenen Beobachtungen zufolge trocknet der Erlenbruch des NSG Lichtel in durchschnittlichen und niederschlagsreichen Jahren im Sommer nicht vollständig aus. In niederschlagsarmen Jahren dagegen kann er über einige Wochen trocken fallen. 2003 war dies sogar für mehrere Monate der Fall. Weiterhin ist die Größenordnung der Abflüsse aus beiden Gebieten als Stichprobe durch Geländeerhebungen im Sommer 2007 bekannt.

Die Vorgehensweise der Modellierung geht methodisch in einigen Punkten absichtlich oder gezwungenermaßen unkonventionelle Wege, deren Ursachen und Beweggründe deshalb kurz diskutiert werden.

Eine Interpolation der Wetterdaten zur genauen Anpassung der Daten der DWD-Stationen an die Untersuchungsgebiete war nicht möglich, denn hierzu lagen keine langjährigen Vergleichswerte anderer Stationen vor. Es konnte lediglich der oben beschriebene Abgleich mit den Daten des WABOA durchgeführt werden. Innerhalb der Einzugsgebiete jedoch wurden Gradienten für Strahlung, Niederschlag und Temperatur aufgrund der Topografie modellintern berechnet (s.o.), allerdings ergeben sich

3 Für Birkenweiher liegen erst ab 1981 Wetterdaten vor. Ausgewertet wurden nur die Datenreihen von 1981 (Lichtel) bzw. 1982 (Birkenweiher) bis 2005, da das Modell eine Vorlaufphase zum Einstellen der Wasserhaushaltsbilanzen benötigt.

bei der geringen Flächengröße nur geringfügige Unterschiede. Die Genauigkeit der Ergebnisse der vergleichenden Betrachtung bleibt in jedem Fall davon unberührt, denn mögliche Abweichungen gehen in beide Szenarienrechnungen gleichermaßen ein, so dass die hier diskutierten Unterschiede unverändert bleiben.

Klimaprojektionen werden meist auf der Basis mehrerer SRES-Szenarien berechnet. Dies war in unserem Fall jedoch nicht möglich, da aus KLIWA (2006) nur regionalisierte Projektionen auf Grundlage des B2-Szenarios vorlagen. Es erscheint aber legitim, sich auf dieses als wahrscheinlich erachtete Emissionsszenario zu beschränken, zumal Unterschiede zwischen den SRES-Szenarien erst gegen Ende des Betrachtungszeitraumes 2021 bis 2050 wirklich zum Tragen kommen sollen.

Die Generierung von lokalen „zukünftigen Wetterdaten“ durch Zu- oder Abschläge auf reale Wetterdaten der Vergangenheit entspricht nicht der gängigen meteorologischen Praxis, Wetterdaten mit Klimamodellen zu simulieren. Zum Vergleich möglicher Auswirkungen auf reale Standortbedingungen wird der von uns gewählte Weg trotzdem für sinnvoller erachtet, um aus den regionalisierten Klimaprojektionen konkrete Wasserhaushaltssituationen (beispielsweise Trockenphasen) der Standorte entstehen zu lassen, die in der direkten Gegenüberstellung mit dem Istzustand die relativen Unterschiede (be)greifbar und quantifizierbar machen („was-wäre-wenn“). Die nach gängiger meteorologischer Methodik mit Hilfe von regionalisierten Klimamodellen (z.B. REMO) generierten Wetterdaten des 21. Jahrhunderts bieten diese Möglichkeit nicht. Hier müssten zum Vergleich sowohl die realen als auch die modellierten Wetterdaten statistisch aufgearbeitet, d.h. zu Klimadaten gemacht werden. Der konkrete Situationsbezug ginge dabei wieder verloren.

Von Nachteil kann aber die relative Statik des von uns angewendeten Verfahrens angesehen werden, denn bei der Berechnung der Wetterdaten für das Zukunftsszenario musste die Zunahme von Extremereignissen wie Trockenphasen oder Starkniederschlägen unberücksichtigt bleiben, da diese bislang nicht mit hinreichender Genauigkeit quantifiziert werden konnten. Weiterhin konnten nicht alle Wetterelemente bei der Generierung der Wetterdaten des Zukunftsszenarios berücksichtigt werden, denn es lagen zum Zeitpunkt der Modellierung keine KLIWA-Projektionen zur Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung vor. Aus der Literatur geht jedoch hervor (z.B. UBA 2008), dass für die Windgeschwindigkeit im 21. Jahrhundert keine einheitlichen Trends erwartet werden und zudem die projizierten Änderungen sehr gering sind.

4 Ergebnisse

4.1 Auswirkungen des Klimawandels auf Niederschlag und Verdunstung

Niederschlag und Verdunstung sind die wichtigsten Steuergrößen des Wasserhaushalts. In Baden-Württemberg bestehen bezüglich der Niederschlagsmengen ausgeprägte regionale Unterschiede, auch in den beiden Untersuchungsgebieten unterscheiden sich die mittleren Jahresniederschläge deutlich (Abb. 2 und 5). So gehört der Nordosten Württembergs mit dem Erlenbruch Lichtel (s. Abb. 1) zu den eher niederschlagsarmen Gebieten des Landes, das Jahresmittel 1980–2005 betrug hier 732 mm. Im Gegensatz dazu ist das Alpenvorland von hohen Niederschlagsmengen geprägt. Für den Birkenweiher im Südosten des Landes war 1981–2005 (Sz0) ein mittlerer Jahresnieder-

schlag von 1.060 mm zu verzeichnen (Abb. 5). Im Zukunftsszenario Sz1 ergeben sich durch das oben beschriebene Berechnungsverfahren deutlich höhere mittlere Jahresniederschläge in Lichtel (791 mm) und geringfügig höhere im Birkenweiher (1.070 mm). Die mittlere Lufttemperatur betrug im Zeitraum 1980–2005 für den Erlenbruch Lichtel 8,6 °C und für das NSG Birkenweiher 9,2 °C. Im Zukunftsszenario betragen diese Werte für Lichtel 10,5 °C und für Birkenweiher 11,1 °C.

Die projizierten Veränderungen der Niederschlagsverteilung (KLIWA 2006) mit einer Verlagerung ins Winterhalbjahr (Tab. 1) führen in den Beispielgebieten zu unterschiedlichen Niederschlagsregimes im Zukunftsszenario (Abb. 5). Während in Lichtel 1980–2005 mit 53 % geringfügig höhere Anteile im Sommerhalbjahr (Winter 47 %) zu verzeichnen waren, kehrt sich das Verhältnis im Zukunftsszenario um: Im Mittel ergibt sich ein Überschuss an Winterniederschlägen (Sommer 45 %, Winter 55 %). Im Gebiet Birkenweiher sinkt der hohe Anteil des Sommerniederschlags von 62 % (Winter 38 %) auf 57 % (Winter 43 %) im Zukunftsszenario ab. In Birkenweiher steht demnach einerseits insgesamt mehr Wasser als in Lichtel zur Verfügung und zusätzlich ist die Verteilung wegen des Übergewichts der Sommerniederschläge günstiger für die kontinuierliche Wasserversorgung des Niedermoors. Für die Sommerhalbjahre des Zukunftsszenarios ergeben sich in Lichtel 357 mm und in Birkenweiher 612 mm durchschnittlicher Niederschlag.

Durch die Erhöhung der Lufttemperatur in Folge der Klimaerwärmung steigt auch die Verdunstung in beiden Einzugsgebieten an. In Lichtel bleibt aber sowohl im Istzustand als auch im Zukunftsszenario die reale Evapotranspiration ETa deutlich hinter der potentiellen Evapotranspiration ETp zurück. Der Gebietsniederschlag und der Bodengewässerspeicher können den Wasserbedarf bei ungehinderter Verdunstung vor allem im Sommer nicht decken. Die potentielle Verdunstung erreicht im Istzustand durchschnittlich 654 mm/a, die reale 606 mm/a. Der langjährige klimatische Wasserbilanzüberschuss, die Differenz aus Niederschlag und potentieller Verdunstung (s. auch Abb. 2), beträgt

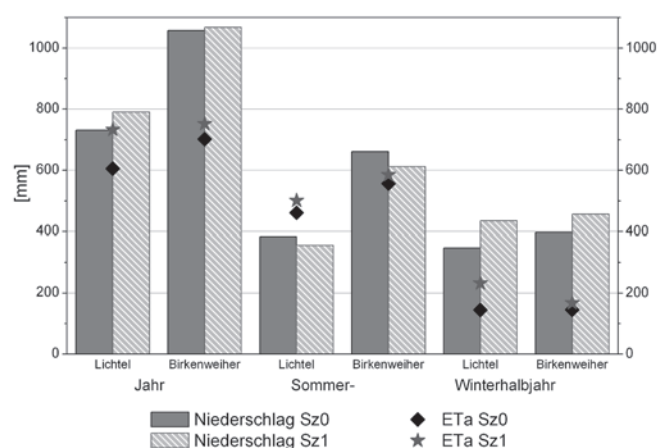


Abbildung 5

Mittlere Jahressummen von Niederschlag und realer Verdunstung (ETa) sowie Anteile von Sommer- und Winterniederschlag im Istzustand (Sz0) und im Zukunftsszenario (Sz1).

Mean annual sums of precipitation and actual evaporation (ETa) and portions of summer and winter precipitation at the as-is state (Sz0) and at the future scenario (Sz1).

bereits heute im Mittel nur 78 mm/a. Aus diesem Grund sind im Nordosten Württembergs Moore selten und das NSG Lichtel ist eine regionale Rarität. Im Zukunftsszenario ergeben sich durchschnittlich circa 790 mm Jahresniederschlag, die mittlere potentielle Verdunstung beträgt 920 mm/a, die reale Evapotranspiration 733 mm/a. Die Differenz zwischen realer und potentieller Verdunstung ist nach dieser Rechnung im Zukunftsszenario vergrößert, der Wasserhaushalt des NSG Lichtel demnach noch angespannter. Gegenüber dem heutigen geringen klimatischen Wasserbilanzüberschuss in Sz0 beträgt das Defizit in Sz1 -130 mm/a. Dies wäre eine völlig neue Situation in Baden-Württemberg, denn bisher kommen im langjährigen Mittel negative klimatische Wasserhaushaltsbilanzen im Land überhaupt nicht vor (WABOA 2007).

Im Gebiet Birkenweiher beträgt der mittlere klimatische Wasserbilanzüberschuss im Istzustand 349 mm/a und im Zukunftsszenario 304 mm/a. Auf Grund der sehr guten Wasserversorgung erreicht gegenwärtig die mittlere reale Evapotranspiration mit 702 mm/a 99 % der potentiellen Evapotranspiration (709 mm/a). Diese Relation bleibt auch im Zukunftsszenario erhalten, hier beträgt die mittlere reale Evapotranspiration 752 mm/a und die jährliche potentielle Evapotranspiration 763 mm. Weder für die potentielle noch für die reale Verdunstung des NSG Birkenweiher ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen Istzustand und Zukunftsszenario. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich die Reihen des NSG Lichtel signifikant voneinander (Mann-Whitney U-Test: α 0,001).

4.2 Wasserhaushalt des NSG Erlenbruch Lichtel

Klassische Erlenbrüche finden sich in Mitteleuropa meist am Rand von Auen, in den Verlandungszonen von Stillgewässern und – wie im Beispiel des Erlenbruchs Lichtel – in stauwasserführenden Geländesenken. Hier bedingt lateral zuströmendes Grund- und Bodenwasser lang anhaltende stauwasserphasen. Schwankungen des Wasserspiegels betragen selten mehr als 1 m (ELLENBERG 1986). Nur wenige heimische Baumarten kommen mit diesen Standortbedingungen zurecht und auch die Schwarzerle bildet unter solchen suboptimalen Bedingungen nur lichte Bestände aus (WILMANN 1998).

Da Wasserüberstau das charakteristische Merkmal von Erlenbrüchen ist, konzentriert sich die folgende Wasserhaushaltsbetrachtung auf Stauhöhe und Überstaudauer im Erlenbruch Lichtel. Dieser Erlenbruch besitzt keinen natürlichen Abfluss. Die ursprünglich abflusslose und diffus entwässernde Senke wurde mit einem Entwässerungsgraben (großer Pfeil in Abb. 6) versehen, der die maximal mögliche Stauhöhe auf durchschnittlich 26 cm in der tiefsten Rasterzelle (10 x 10 m Größe) des Erlenbruchs begrenzt (Abb. 7 und 8). Der Erlenbruch gliedert sich morphologisch in eine flache Randzone und einen tieferen zentralen Teil. Gemittelt über die gesamte Fläche beträgt die maximal mögliche Stauhöhe 10,9 cm.

In Abbildung 7 ist der Jahresgang der Überstauhöhe am tiefsten Punkt des Erlenbruchs für den Istzustand und für das Zukunftsszenario dargestellt. Beide Kurven zeigen einen ausgeprägten Jahresgang mit charakteristischen sommerlichen Niedrigwasserständen, sie unterscheiden sich allerdings unter anderem in der Amplitude. Im Istzustand ist der Erlenbruch in Jahren mit zumindest durchschnittlichen Niederschlagsmengen (Abb. 2) im Winter zeitweise bis

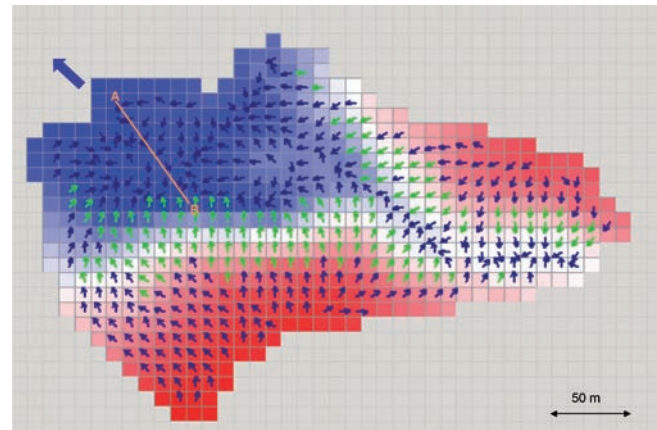


Abbildung 6

Erlenbruch Lichtel. Die Farben der Rasterzellen markieren die Geländehöhe (rot > weiß > hellblau > dunkelblau), die Pfeilrichtung gibt die Potentialrichtung zur nächsten Rasterzelle an; großer Pfeil: Entwässerungsgraben, Schnitt A-B: siehe Abbildung 8; Kartengrundlage: DGM © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), Az: 17005778

Alder carr forest Lichtel and its catchment: the colours of the grid cells indicate the terrain elevation (red > white > blue > dark blue), the arrow indicates the potential flow direction into the next grid cell; bold arrow: drainage ditch, terrain transect A-B: see Figure 8, map basis: DGM © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), Az: 17005778

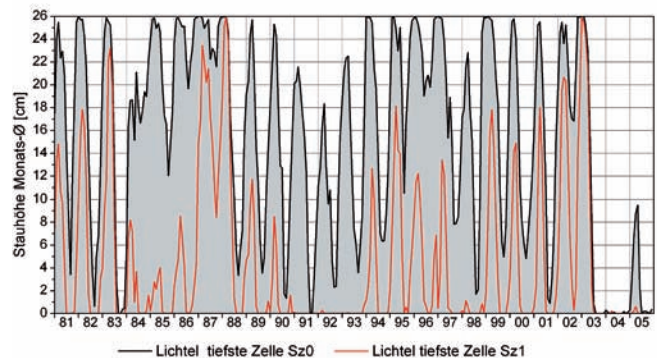


Abbildung 7

Monatsmittel der Stauhöhe in der tiefsten Rasterzelle des Erlenbruchs Lichtel im Istzustand 1981 bis 2005 (Sz0) und Zukunftsszenario Sz1; die Zeitreihen unterschieden sich signifikant (Signifikanzniveau α : 0,001, Mann-Whitney U-Test).

Mean monthly waterlogging level in the deepest grid cell in the alder carr forest for as-is state 1981 to 2005 (Sz0) and future scenario (Sz1); time series differ significantly (significance level α : 0.001, Mann-Whitney U-Test).

zur maximal möglichen Höhe überstaut. Unter anhaltend niederschlagsarmen Bedingungen kann kurzzeitig auch die tiefste Stelle des Erlenbruchs austrocknen. Mit Ausnahme der Jahre 2003 und 2004 lag bei solchen Witterungsereignissen die tiefste Rasterzelle und damit der gesamte Erlenbruch jedoch höchstens zwei Monate lang trocken. Dem Absinken des Wasserstandes im Sommer folgte im Istzustand regelmäßig der herbstliche Wiederanstieg mit winterlichem Überstau. Erst der „Jahrhundertssommer“ 2003 änderte dieses Regime, denn nach der vollständigen Austrocknung des Erlenbruchs im Juli 2003 reichten die Niederschläge des Jahres 2004 nicht aus, um den Wasserspeicher der Böden im Einzugsgebiet und im Erlenbruch wieder aufzufüllen.

Die höhere reale Evapotranspiration und verminderte Sommerniederschläge im Zukunftsszenario (Sz1) bewirken eine insgesamt stärkere Austrocknung des Erlenbruchs. Die maximale Einstauhöhe wird im Zukunftsszenario lediglich noch zwei Mal für nur kurze Zeit erreicht (Abb. 7). Die Einstauhöhe am tiefsten Punkt des Erlenbruchs und im Betrachtungszeitraum geht von 15,5 cm im Istzustand auf 4,5 cm im Zukunftsszenario zurück. Ein sommerlicher Überstau der gesamten Fläche findet im Zukunftsszenario nur noch in Ausnahmefällen statt. Während in der tiefsten Rasterzelle von 1981–2005 im Mittel aller Winterhalbjahre eine Stauhöhe von 18,9 cm zu verzeichnen war, wurden hier für das Zukunftsszenario nur noch 6,2 cm berechnet.

Das auf Grundlage des Digitalen Geländemodells in 1-m-Auflösung erstellte Höhenprofil durch den Erlenbruch zeigt, wie sich die im Zukunftsszenario berechnete Absenkung der mittleren Stauhöhe auf die überstaute Fläche auswirkt (Abb. 8). Während im langjährigen Mittel heute lediglich die höchsten Stellen des Erlenbruchs über dem Wasserspiegel liegen, ergibt sich im Zukunftsszenario nur noch ein Einstau der sehr tief gelegenen Stellen. Die maximal mögliche Wasserstandshöhe von durchschnittlich circa 26 cm in der tiefsten Rasterzelle, bei der fast die gesamte Fläche des Erlenbruchs überstaut ist, wird im Istzustand an über 900 Tagen erreicht, im Zukunftsszenario jedoch nur noch an 63 Tagen.

4.3 Wasserhaushalt des Niedermoors NSG Birkenweiher

In Abbildung 9 sind die Topografie sowie die auf Grund der Geländemorphologie auftretenden Potentiale der Abflussrichtung im Einzugsgebiet Birkenweiher dargestellt. Das flache, pfannenartige Relief des Niedermoors ist gut zu erkennen.

Die teilweise Entwässerung durch das Grabensystem lässt im NSG Birkenweiher keinen flächendeckenden und anhaltenden Überstau wie in Lichtel zu. Prägender Standortfaktor im Hinblick auf den Wasserhaushalt ist im Gebiet deshalb das Grundwasser. Abbildung 10 zeigt die Lage der wassergesättigten Bodenzone im Istzustand und im Zukunftsszenario gemittelt über die gesamte Niedermoorfläche des NSG Birkenweiher. Es ist in beiden Szenarien eine ausgeprägte jahreszeitliche Amplitude zu erkennen, regelmäßig

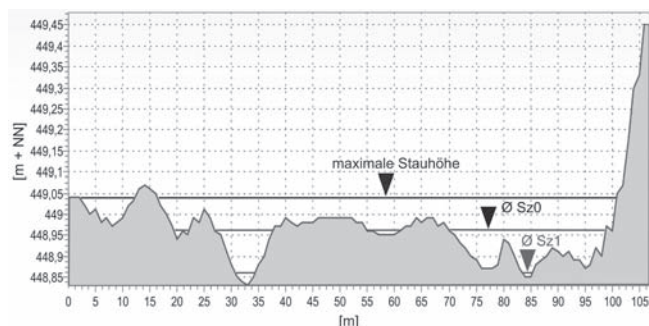


Abbildung 8
Höhenprofil des Erlenbruchs Lichtel (Schnitt A-B, siehe Abbildung 6) und maximale Einstauhöhe sowie Stauhöhen am tiefsten Punkt im Istzustand Sz0 und Zukunftsszenario Sz1
Topographic profile through the centre of the alder carr forest Lichtel (terrain transect A-B, see Figure 6) with maximum water storage level and waterlogging level of the lowest cell in the as-is scenario (Sz0) and in the future scenario (Sz1).

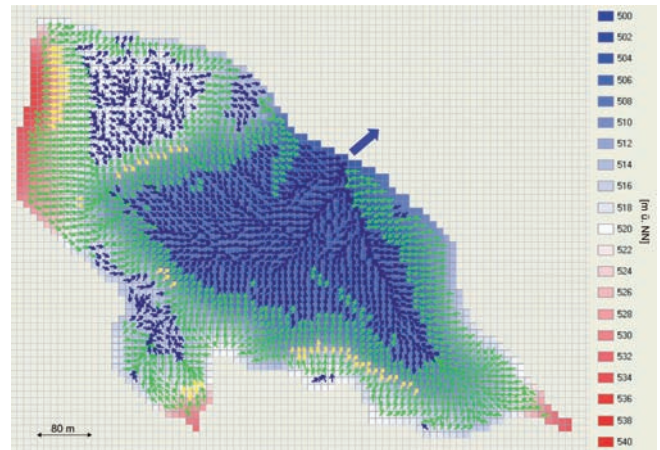


Abbildung 9
Niedermoor Birkenweiher. Die Farben der Rasterzellen markieren die Geländehöhe (rot > weiß > hellblau > dunkelblau), die Pfeilrichtung gibt die Potentialrichtung zur nächsten Rasterzelle an; großer Pfeil: Gebietsentwässerung; Kartengrundlage: DGM © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), Az: 17005778
Fen Birkenweiher; the colours of the grid cells indicate the terrain elevation (red > white > blue > dark blue), the arrow indicates the potential flow direction into the next grid cell; arrow colour indicates the flow velocity (yellow > light green > dark green > blue); bold arrow: drainage ditch; map basis: DGM © Landesvermessungsamt Baden-Württemberg (www.lv-bw.de), Az: 17005778

steigt das Grundwasserniveau im Winter fast bis zur Bodenoberfläche und fällt zum Sommer hin wieder ab. Im Istzustand bewegt sich der Flurabstand der gesättigten Bodenzone zwischen wenigen Zentimetern und -1,6 m Tiefe. In feuchten Jahren (Beispiel 1988) sinkt er auch im Sommer nur auf 40 cm unter Flur. Wie für ein Niedermoor zu erwarten ist, liegt der mittlere Grundwasserstand sehr hoch: Der mittlere Jahresdurchschnittswert für die gesamte Moorfläche beträgt im Istzustand -38 cm, im Sommerhalbjahr -57 cm und im Winter -18 cm. Im Zukunftsszenario erreicht die gesättigte Bodenzone nicht die Höhe des Istzustandes. Der höchste Grundwasserstand kommt nicht über -10 cm hinaus, der niedrigste Stand fällt bis auf -1,8 m. Der mittlere Grundwasserspiegel liegt mit -54 cm noch oberflächennah, aber 16 cm tiefer als im Istzustand. Die mittleren Grundwasserstände im Sommerhalbjahr fallen im Zukunftsszenario auf -76 cm, im Winterhalbjahr auf -32 cm. Abbildung 10 lässt auch erkennen, dass die Amplitude des Grundwassersgangs in beiden Szenarien ähnlich groß ist: Die Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Grundwasserstand beträgt im Mittel 91 cm im Istzustand und 99 cm im Szenario 1. Der projizierte regionale Anstieg der winterlichen Niederschlagsmengen um 10–20 % kann im Zukunftsszenario in Jahren mit hohen Winterniederschlägen kurzzeitig zu einem höheren winterlichen Niveau der gesättigten Bodenzone als im Istzustand führen. Für die Vegetation wären solche geringfügig höheren Wasserstände allerdings ohne Bedeutung, denn sie erreichen oder überschreiten nicht die üblichen winterlichen Grundwasserstände anderer Jahre.

Auch die Häufigkeitsverteilung der Grundwasserstände im Sommerhalbjahr (Abb. 11) belegt eine Verlagerung um eine bis zwei Dezimeterstufen in die Tiefe: Im Istzustand sind sommerliche Grundwasserstände zwischen 40 cm und 60 cm am häufigsten, im Zukunftsszenario sind es die Stufen 60–70 cm und 100–120 cm. Wie bereits erwähnt, erreicht im Zukunftsszenario die wassergesättigte Bodenzone nicht mehr die Tiefenstufe bis

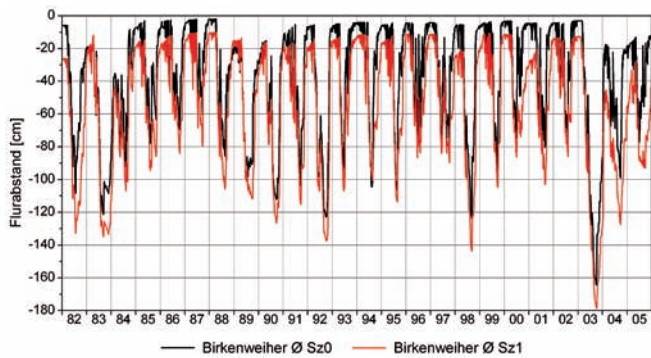


Abbildung 10

Mittlere Lage der wassergesättigten Bodenzone unter der Niedermoorfläche des Birkenweiher im Zeitraum 1982 bis 2005, rote Linie: Istzustand (Sz0), schwarze Linie: Zukunftsszenario (Sz1). Die Zeitreihen unterscheiden sich signifikant (α 0,001, nichtparametrischer Mann-Whitney-U-Test). *Mean level of the saturated soil zone below the fen Birkenweiher from 1982 to 2005; red line: as-is state 1981 to 2005 (Sz0), black line: future scenario (Sz1); the time series differ significantly (significance level α 0.001, Mann-Whitney U-Test).*

10 cm unter Flur. Eine anhaltende völlige Wassersättigung des Hauptwurzelraumes der Grünlandpflanzen würde in diesem Fall nicht mehr eintreten.

5 Konsequenzen für die Untersuchungsgebiete

Die Wasserhaushaltsmodellierungen weisen darauf hin, dass die bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts projizierten Klimaänderungen den Wasserhaushalt beider Untersuchungsgebiete beeinflussen würden. Allerdings zeigen sich deutliche regionale Unterschiede: So ist der einem trockeneren Klima unterworfenen Erlenbruch Lichtel stärker betroffen als das Niedermoor Birkenweiher. Die klimatische Situation im Voralpenland mit insgesamt hohen Niederschlagsmengen und hohem Wasserbilanzüberschuss wirkt den Verlusten durch die Temperaturerhöhung und der damit einhergehenden höheren Evapotranspiration dämpfend entgegen. Es ist anzunehmen, dass auch die Relation

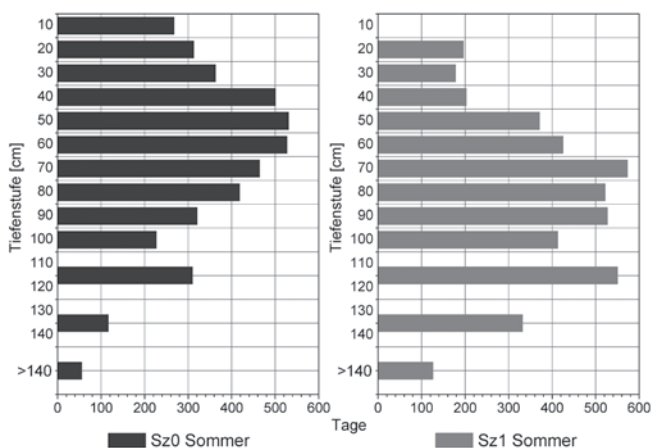


Abbildung 11

Häufigkeit des Grundwasserstandes in 10-cm-Stufen, gemittelt für das gesamte Niedermoor Birkenweiher während der Sommerhalbjahre 1982 bis 2005 im Istzustand Sz0 und im Zukunftsszenario Sz1 *Frequency of groundwater levels in 10 cm steps, averaged over the whole fen Birkenweiher during the summer half-years 1982 to 2005 for the as-is state (Sz0) and the future scenario (Sz1)*

der Flächengrößen von Feuchtgebiet gegenüber Einzugsgebiet die Sensibilität der Feuchtgebiete für Klimaänderungen beeinflusst. Während in Lichtel das Einzugsgebiet mehr als zehnmals größer ist als der Erlenbruch selbst, wird das Niedermoor Birkenweiher von einem nur gut doppelt so großen Einzugsgebiet gespeist. Diese weite Relation ist im relativ trockenen Klima der Hohenloher Ebene wohl eine der Voraussetzungen, überhaupt ein ausschließlich von Regen und oberflächennahem Grundwasser gespeistes Moor entstehen zu lassen. Auswirkungen des Klimas und des Klimawandels konzentrieren sich im Erlenbruch Lichtel deshalb aber auch weit stärker als im Niedermoor Birkenweiher.

Die im Zukunftsszenario berechnete mittlere Überstauhöhe im NSG Lichtel erreicht nur noch kleine, tief gelegene Flächen des Erlenbruchs. In einem solchen Fall ist auch die Wassersättigung der nicht überstauten Bereiche reduziert und im Sommer trockenet der Moorboden häufiger, länger und tiefer aus. Stärkere Austrocknung des Torfkörpers steigert die Mineralisierung der organischen Substanz und führt zu höheren Nährstoffumsätzen und Eutrophierung. In diesem Prozess wandelt sich das Moor von der Stoffsenke zur Stoffquelle (SUCCOW 2001), denn es werden nicht nur der zuvor gebundene Stickstoff und Phosphor freigesetzt, sondern verstärkt auch klimarelevante Gase wie Kohlendioxid und Lachgas (FREEMAN et al. 1993).

Eutrophierung und verstärkter Torfabbau verändern die Standortbedingungen eines Erlenbruchs gravierend, was nicht ohne Auswirkungen auf die Vegetation bleiben kann. Der Schwarzerle an Wuchskraft überlegene Baumarten mit geringerer Toleranz gegenüber Staunässe könnten sich zumindest in höher gelegenen Bereichen etablieren. Die autochthone Vegetation der Krautschicht des Erlenbruchs aus Seggen und Torfmoosen wäre mit wuchsstärkeren Konkurrenten konfrontiert und würde auf lange Sicht von aufkommendem Strauch- und Staudenbewuchs verdrängt. Zwar wären hiervon im Fall des Erlenbruchs Lichtel keine seltenen oder geschützten Pflanzenarten betroffen, aber der besondere Charakter des Biotops „Erlenbruch“ und ein wertvoller, in den Gäulandschaften der Hohenloher Ebene äußerst seltener Baustein der Biodiversität gingen verloren.

Im Fall des Erlenbruchs Lichtel können die tiefgreifenden Wasserhaushaltsänderungen eine intensive Torfmineralisation und zunehmende Bioturbation durch einwandernde und sich ausbreitende Bodenfauna (Regenwürmer) nach sich ziehen, welche die ursprüngliche Torflagerung weitgehend zerstören. Das Pollenarchiv und damit die Funktion des Moores als überregional bedeutendes repräsentatives landschafts- und waldgeschichtliches Dokument (RP STUTTGART 2002) gingen verloren. Dies wäre für die moorarme Region Nordwürttemberg und den angrenzenden bayerischen Raum ein unersetzlicher Verlust.

Wenngleich die Wasserhaushaltsmodellierung weniger gravierende Auswirkungen des Klimawandels im Einzugsgebiet des NSG Birkenweiher berechnete, so ist auch hier die Tendenz eindeutig: Im Zukunftsszenario ist es wärmer und trockener und die Grundwasserstände im Niedermoor liegen niedriger. Ein Absinken des Wasserspiegels kann starke Setzungen des Torfkörpers auslösen (WHITTINGTON & PRICE 2006). Da aber schon im Istzustand der Grundwassergang im Birkenweiher durch wiederkehrende sommerliche Tiefstände geprägt ist, sollten hierdurch keine gravieren-

den Auswirkungen auf das kleinräumige Relief der Moorbodenoberfläche ausgehen.

Bereits heute ist die Nasswiesenvegetation im Naturschutzgebiet Birkenweiher stellenweise von Austrocknung beeinträchtigt. Das Aufkommen hochwüchsiger nitrophytischer Stauden bereitet schon jetzt Probleme. Mit gezieltem Management wird seit Jahren versucht, diese Arten zurückzudrängen. Ein häufiger und länger anhaltend niedriger Grundwasserspiegel und die damit verbundenen geringeren Wassergehalte im Boden würden auch hier zu einer besseren Belüftung des Wurzelraums vor allem höher gelegener Stellen führen. Das hätte zur Folge, dass sich dort vermehrt auch nicht stauwassertolerante Arten ansiedeln könnten. Auch im Birkenweiher wäre dann mit zunehmender Mineralisation des Niedermoor torfs und Nährstofffreisetzung zu rechnen. Hiervon würden wiederum ubiquistische Hochstaudenarten stärker als die angestammte und schützenswerte Vegetation der Streuwiesen und Kleinseggenriede profitieren. Ein Wandel der Vegetation zu trockneren Pfeifengraswiesen, nitrophytischen Staudenfluren und höherem Gehölzanteil ist bei stärkerer Austrocknung des Moores wahrscheinlich. Veränderungen des Wasserhaushalts, wie in unserem Zukunftsszenario berechnet, würden vermutlich das rezente, vom Relief geprägte Mosaik von Vegetationseinheiten weit stärker differenzieren. Größere Arealanteile von hochwüchsigen Staudenfluren und Gebüschern würden die derzeitige offene „Waldwiese“ fragmentieren, was sicher auch mit Auswirkungen auf die Fauna des Gebietes verbunden wäre. Da auch für das Zukunftsszenario ein deutlicher Wasserüberschuss im Birkenweiher berechnet wurde, kann hier der Austrocknung jedoch entgegengesteuert werden. Durch Änderungen an den Entwässerungseinrichtungen kann bei Bedarf mehr Wasser im Gebiet zurückgehalten werden, um die Grundwasserstände anzuheben und naturschutzfachlich unerwünschte Entwicklungen zu verhindern oder wenigstens abzumildern.

Die beiden Beispielfälle zeigen, dass nicht mit einheitlichen Reaktionen von Biotopen auf den Klimawandel gerechnet werden darf. Der Erlenbruch Lichtel würde in dem von uns modellierten Zukunftsszenario wohl keinen dauerhaften Bestand haben. Im Falle des Birkenweiher könnte mit einem angepassten Wasserhaushaltsmanagement unerwünschten Tendenzen begegnet werden und ein gegebenenfalls auf veränderte Bedingungen abgestimmtes Pflegeregime böte Chancen für den Erhalt der wertvollen Flora und Fauna.

6 Fazit

Die Wasserhaushaltsmodellierungen zweier Niedermoore in Baden-Württemberg haben ergeben, dass steigende Temperaturen, damit einhergehende höhere Verdunstung und ein verändertes Niederschlagsregime zu tendenziell trockeneren Standortbedingungen führen würden. Bei der Analyse von Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation muss deshalb der Wasserhaushalt als wichtiger Standortfaktor berücksichtigt werden. Hierbei zeigten sich im Einzelfall deutliche Unterschiede auf Grund des regional differenzierten Klimas und der Auswirkungen des Klimawandels. Die Ergebnisse der großmaßstäblichen Wasserhaushaltsmodellierungen zeigen aber sehr deutlich, dass darüber hinaus erhebliche Unterschiede abhängig von den jeweiligen lokalen Gegebenheiten bestehen. Topografie, Relief, Größe des Einzugsgebiets und weitere Faktoren können

differenzierend auf die vom Klimawandel induzierten Prozesse wirken.

Der Wasserhaushalt der meisten Feuchtgebiete, auch der Naturschutzgebiete, ist heute einer Regulation unterworfen, die in vielen Fällen der Austrocknung der Gebiete Vorschub leistet und damit die Auswirkungen des Klimawandels verschärfen kann. Die Regulation des Wasserhaushalts wird daher zukünftig den veränderten Klimabedingungen Rechnung tragen müssen. Der Rückbau von unregelmäßigen Entwässerungseinrichtungen und eine angepasste Regulierung mit höherem Wasserrückhalt in den Feuchtgebieten sollte aber Chancen eröffnen, zumindest in naher Zukunft und im Einzelfall negativen Einflüssen entgegenzusteuern.

7 Zusammenfassung

Am Beispiel von zwei Niedermooren in Baden-Württemberg werden Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt grundwasserbeeinflusster Biotope untersucht. Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellierungen eines Ist-szenarios mit realen Wetterdaten über 26 Jahre und eines Zukunftsszenarios mit hypothetischen, auf Grundlage regionalisierter Klimawandelprognosen generierter Wetterdaten wird dem rezenten Wasserhaushalt der Jahre 1980-2005 ein Wasserhaushalt unter dem Einfluss höherer Lufttemperatur und eines veränderten Niederschlagsregimes gegenübergestellt. Auf diese Weise sollen mögliche Auswirkungen des Klimawandels für konkrete Wasserhaushalts-situationen quantifiziert werden.

Die Wasserhaushaltsmodellierungen ergeben eine stärkere Austrocknung der Gebiete im Zukunftsszenario, obwohl die jährlichen Niederschlagsmengen zunehmen: Überstauhöhe und Grundwasserstände in den Niedermooren sinken meist ab. Vor allem für die Sommermonate ergeben sich für die Zukunftsszenarien länger anhaltende Phasen niedrigerer Wasserstände, bedingt durch höhere Verdunstung und Verlagerung von Niederschlag in den Winter. Besonders stark und nachteilig wirken sich die berechneten Klimaänderungen auf das Niedermoor in einer Region mit bereits heute geringem Überschuss in der klimatischen Wasserbilanz und mit einem im Verhältnis zur eigenen Größe ausgedehntem Einzugsgebiet aus.

Die häufigere, tiefere Austrocknung und Belüftung der Moorböden kann zu verstärkter Mineralisation führen. Hierdurch werden Nährstoffe und Kohlendioxid freigesetzt, Wasser- und Nährstoffhaushalt verändern sich. Die an rezente Bedingungen angepasste Niedermoorvegetation wird damit zunehmend der Konkurrenz wuchskräftigerer Arten ausgesetzt. Die Mineralisierung des Niedermoor torfs kann zur Vernichtung ungestörter Pollenlagerstätten und damit wichtiger landschaftsgeschichtlicher Archive führen.

Die Anpassung der Regulierung des Wasserhaushalts der Feuchtgebiete kann im Einzelfall die Chance bieten, den Tendenzen des Klimawandels entgegenzusteuern.

Summary

Using the examples of two fens in Baden-Wuerttemberg, the consequences of climate change on the water balance of groundwater-influenced biotopes were examined. Water-balance modelling performed with an as-is scenario based on real

weather data of a 26-year period and a future scenario with hypothetical weather data based on regionalised climate-change forecasts which are projected into the future, allows to make a quantitative analysis of the present and future water balances.

The results of this water-balance modelling runs indicate more dryness of the catchments in the future scenario. Although the amount of precipitation will increase in total, the waterlogging and groundwater levels will decrease in most cases. Longer lasting periods with low water levels will occur especially during the summer months. The cause of this is the higher evaporation and the shifting of precipitation into the winter months. Particularly strong and adverse consequences of climate change are expected for groundwater-influenced biotopes in regions with already little surplus in the climatic water balance and also for wetland habitats fed from catchments that are disproportionately vast.

More frequent and deeper drying plus aeration can lead to intensified mineralisation of peat soils. Consequently, nutrients and carbon dioxide will be released, resulting in changes in the water and nutrient balances. Fen vegetation that is adapted to the present conditions will have to compete with species of more vigorous growth. Mineralisation of fen peat could lead to the destruction of undisturbed pollen depots and thus threaten the important role of fens as historical landscape archives.

Controlled adaptation of the water balances of wetland areas could be an option in single cases to counteract the trends of climate change.

Anschrift der Verfasser:

Dr. P. Wattendorf
 Dipl.-Hydrol. J. Niederberger
 Dr. O. Ehrmann
 Prof. Dr. W. Konold
 Institut für Landespflege
 Tennenbacher Str. 4, 79106 Freiburg
 peter.wattendorf@landespflege.uni-freiburg.de

Literaturverzeichnis

AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Auflage, Stuttgart, 438 S.

BAUR, K. (1965): Erläuterungen zur vegetationskundlichen Karte 1:25.000, Blatt 6526 Creglingen, Stuttgart, 12–13

BLANKENBURG, J., H.H. HENNINGS & W. SCHMIDT (2001): Bodenphysikalische Eigenschaften und Wiedervernässung. – In: KRATZ, R. & J. PFADENHAUER (Hrsg.): Ökosystemmanagement für Niedermoore. Strategien und Verfahren zur Renaturierung. – Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 81–91

CHMIELEWSKI, F.M., A. MÜLLER & W. KÜCHLER (2005): Possible impacts of climatic change on natural vegetation of Saxony (Germany). – *Int. J. Biometeorol.* 50, 96–104

DAWSON, T.P., P.M. BERRY & E. KAMPA (2003): Climate change impacts on freshwater wetland habitats. – *J. Nat. Conserv.* 11, 25–30

ELLENBERG, H. (1986): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen.* – Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 989 S.

ENKE, W. & A. SPEKAT (1997): Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression. – *Climate Research* 8, 195–207

FREEMAN, C., M.A. LOCK & B. REYNOLDS (1993): Fluxes of CO₂ and N₂O from a Welsh peatland following simulation of water table draw-down: potential feedback to climate change. – *Biogeochemistry* 19(1), 51–60

HERBST, M. & G. HÖRMANN (1998): Predicting effects of temperature increase on the water balance of beech forest - an application of the KAUSHA Model. – *Climatic Change* 40, 683–698

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000): *Emission Scenarios, A Special Report of IPCC Working Group III, Summary for Policymakers*, 20 Sp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): *Impacts, Adaptation & Vulnerability, Contribution of the Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* – Hrsg.: J.J. MCCARTHY, O.F. CANZIANI, N.A. LEARY, D.J. DOKKEN & K.S. WHITE, Cambridge, 1000 S.

KIEFER, C. (2007): *Artenliste NSG Birkenweiher Mai 2007.* – Schriftliche Mitteilung, Landratsamt Bodenseekreis, Umweltschutzamt

KLIWA (2006): *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland, Abschätzungen der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt; herausgegeben von Arbeitskreis KLIWA (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW, Bayerisches Landesamt für Umwelt BfLU und Deutscher Wetterdienst DWD), KLIWA-Berichte Heft 9, 100 S.*

MONTEITH, J.L. (1975): *Vegetation And The Atmosphere; Vol. 1: Principles.* – Academic Press, London, 278 S.

POMPE, S., S. BERGER, G.-R. WALTHER, F. BADECK, J. HANSPACH, S. SATTLER, S. KLOTZ & I. KÜHN (2009): *Mögliche Konsequenzen des Klimawandels für Pflanzenareale in Deutschland.* – *Natur und Landschaft* 84/1, 2–7

RP STUTTGART (REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART) (Hrsg.) (2002): *Die Naturschutzgebiete im Regierungsbezirk Stuttgart, Ostfildern*, 640 S.

RP TÜBINGEN (REGIERUNGSPRÄSIDIUM TÜBINGEN) (Hrsg.) (2006): *Die Naturschutzgebiete im Regierungsbezirk Tübingen, Ostfildern*, 599 S.

SHELLBERG, S., B. SITTLER, S. HERING, P. WATTENDORF & W. KONOLD (2010): *Airborne Laser Scanning in der Kulturlandschaftsforschung.* – *Natur und Landschaft* 85, H. 5, 199–205

SCHULLA, J. (1997): *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen.* – *Züricher Geographische Schriften*, H. 69, 161 S.

- SCHULLA, J. (2006): Model Description WaSiM-ETH. – ETH-Zürich, 181 S.
- SCHWÄRZEL, K., J. ŠIMŮNEK, M.TH. VAN GENUCHTEN & G. WES-
SOLEK (2006): Measurement and modelling of soil-water dy-
namics and evapotranspiration of drained peatland soils. – J.
Plant Nutr. Soil Sci. 169, 762–774
- SUCCOW, M. (2001): Genese, Vorkommen und Zustand der Nie-
dermoore Mitteleuropas. – In: KRATZ, R. & J. PFADENHAUER
(Hrsg.): Ökosystemmanagement für Niedermoore. – Verlag
Eugen Ulmer, Stuttgart, 13–19
- TEEPE, R., H. DILLING & F. BEESE (2003): Estimation water reten-
tion curves of forest soil texture and bulk density. – Journal
of Plant Nutrition and Soil Science 166, 111–119
- UBA (UMWELTBUNDESAMT) (Hrsg.) (2008): Klimaauswirkungen
und Anpassung in Deutschland, Abschlussbericht zum UFO-
PLAN-Vorhaben 20441138. – Dessau-Roßlau, 154 S.
- WABOA (2007): Wasser- und Boden Atlas Baden-Württemberg.
– Herausgegeben von Umweltministerium Baden-Württem-
berg und Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Natur-
schutz Baden-Württemberg, 3. Auflage
- WHITTINGTON, P.N. & J.S. PRICE (2006): The effects of water tab-
le draw-down (as a surrogate for climate change) on the hy-
drology of a fen peatland, Canada. – Hydrol. Process. 20,
3589–3600
- WILMANNNS, O. (1998): Ökologische Pflanzensoziologie. – Verlag
Quelle & Meyer, Heidelberg & Wiesbaden, 405 S.