

Wirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt geschützter Biotope in Baden-Württemberg

Peter Wattendorf

Kurzfassung

Es ist davon auszugehen, dass die prognostizierten allgemeinen Klimaveränderungen mit tendenziell ansteigenden Lufttemperaturen und saisonal veränderten Niederschlagsregime Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt von Biotopen nehmen. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurde der Bodenwasserhaushalt unterschiedlicher Standorte in Baden-Württemberg für den Ist-Zustand mit realen Wetterdaten der Jahre 1980 - 2005 und mit aus regionalen Klimaprojektionen generierten Wetterdaten für einen Zukunftszeitraum (nach 2021) modelliert. Die Ergebnisse der Modellierungen werden anhand von acht relativ trockenen Standorten in vier Naturschutzgebieten im Südwesten Baden-Württembergs dargestellt.

Die Wasserhaushaltsmodellierungen ergeben für alle betrachteten Standorte zukünftig trockenere Bedingungen mit stärkerer und länger anhaltender Austrocknung während der Vegetationszeit. Überwiegend abhängig von den Bodeneigenschaften, insbesondere der Wasserspeicherkapazität (Feldkapazität), variiert das Ausmaß der Veränderungen erheblich zwischen den Standorten, auch innerhalb eines Untersuchungsgebietes. Die Standorteigenschaften beeinflussen somit maßgeblich die Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt. Sehr flachgründige Standorte sind durch episodische und schnelle Wechsel zwischen Austrocknen und Aufsättigen im Sommer charakterisiert. Hier ist auch bei zukünftig wärmeren und trockeneren Sommern meist nur mit geringfügig längeren Trockenphasen zu rechnen, weil bereits im Ist-Zustand zeitweise der Bodenspeicher ausgeschöpft ist. Auf tiefgründigen Standorten sind dagegen die Unterschiede zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenario größer, da hier außerhalb der Vegetationszeit mehr Wasser gespeichert wird und dieser größere Wasservorrat des Bodens bei zukünftig zunehmender Verdunstung weiter ausgeschöpft werden kann.

Stichwörter

Klimawandel, Bodenwasserhaushalt, Naturschutzgebiet, Wasserspeicherkapazität

Anschrift des Verfassers:

Dr. Peter Wattendorf, Professur für Landespflege, Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg
peter.wattendorf@landespflege.uni-freiburg.de

Climate Change Effects on the Water Balance of Protected Biotopes in Baden-Wuerttemberg

Abstract

It is assumed that the water balance of biotopes will be subject of climate change due to increasing air temperature and altered precipitation regimes. To quantify these impacts of climate change, water balance modelling was performed for the current state with real weather data from the period 1980 - 2005 and for a future period with weather data on the basis of regionalised climate change forecasts. The results of these modelling are presented by the example of eight sites in four selected nature reserves in southwest Baden-Wuerttemberg. In general, the results of the modelling indicate a more severe drying-out of every site during the growing season in the future period. Soil properties, especially the field capacity of the individual sites vary within the investigated areas and modify the influence of climate change to a large extend. At sites with shallow soils with a low field capacity, the water availability for plants is already more limited by storage capacity at present than by the amount of precipitation or evaporation. These soils dry out frequently and rather fast, but relatively small amounts of precipitation suffice to resaturate them. Extreme changes in the water status at present, as well as in the future, characterize the habitats on such soils. Therefore the differences, e.g. increasing duration of dry periods, between the present-day and the future scenario are rather small. Sites with soils with a higher water storage capacity may in future be liable to greater changes in their water balance, because the prospective increasing evaporation will drain them stronger and longer than today.

Keywords

Climate Change, Soil Water Balance, Nature Reserve, Field Capacity

1. Einleitung

Als wichtige Tendenzen des Klimawandels werden ein allgemeiner Temperaturanstieg sowie ein verändertes Niederschlagsregime für den Südwesten Deutschlands prognostiziert. Es werden insbesondere mildere, niederschlagsreichere Winter und wärmere Sommer mit meist geringeren Niederschlägen erwartet (z.B. KLIWA 2006). Es ist davon auszugehen, dass sich diese Veränderungen in unterschiedlichem Maß auf alle Lebensräume unserer Landschaften auswirken und durch voraussichtlich höhere Verdunstung sowie saisonale Verschiebung der Niederschlagsmengen einen starken Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt nehmen werden. Das im Jahr 2006 in Baden-Württemberg ins Leben gerufene Forschungsprogramm "Herausforderung Klimawandel" (<http://www.herausforderung-klimawandel-bw.de>) hatte zum Ziel, in mehreren Forschungsprojekten mögliche Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen. Eines dieser Projekte trug den Titel "Auswirkungen des Klimawandels auf Biotope Baden-Württembergs". Mit ihm sollte schwerpunktmäßig der Einfluss des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt und hierdurch hervorgerufene Veränderungen der Bodeneigenschaften sowie der Vegetationsentwicklung und des Naturschutzwerts von Schutzgebieten im Land

untersucht werden (WATTENDORF et al. 2010). Da aufgrund des rezenten Klimas und der Klimawandelprojektionen von regionalen Unterschieden ausgegangen werden musste, sollte eine repräsentative Auswahl von Gebieten betrachtet werden. Weiterhin wurden, vor allem aufgrund der Bodeneigenschaften, innerhalb der Untersuchungsgebiete mehr oder weniger ausgeprägt unterschiedliche Standortsbedingungen angenommen, die Einflüsse des Klimas und des Klimawandels weiter modifizieren können. Es wurden daher standortbezogene Wasserhaushaltsbetrachtungen für den Ist-Zustand sowie für einen zukünftigen Zeitraum angestellt. Der vorliegende Beitrag ist eine Kurzfassung der Projektbeschreibung, die überwiegend auf WATTENDORF et al. (2010) beruht. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden exemplarisch anhand ausgewählter Wasserhaushaltssituationen von acht Standorten in vier Naturschutzgebieten (NSG) im Südwesten Baden-Württembergs dargestellt: NSG Taubergießen, NSG Haselschacher Buck, NSG Feldberg, NSG Buchswald bei Grenzach.

2. Vorgehensweise und Methoden

2.1 Auswahl der Gebiete

Es wurde angenommen, dass Standorte, die eher Extreme des Wasserhaushaltsspektrums repräsentieren, von Veränderungen stärker als mittlere Standorte betroffen sein dürften. Daher sollten schwerpunktmäßig einerseits relativ trockene Untersuchungsgebiete mit Magerrasenvegetation (Trockenrasen, Halbtrockenrasen), andererseits stark grundwassergeprägte Gebiete, wie Niedermoore, betrachtet werden. Wälder sollten bei der Betrachtung aus formalen Gründen weitestgehend unberücksichtigt bleiben.

Die Untersuchungsgebiete wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt. Es sollten:

- für die jeweilige Region und das Land Baden-Württemberg typische und repräsentative Schutzgebiete sein
- für die Gebiete langjährige Klimadatenätze nahegelegener Wetterstationen verfügbar sein
- in unterschiedlichem Maß von den Auswirkungen des Klimawandels betroffene Gebiete sein,
- möglichst gut dokumentierte Gebiete sein, um nach Möglichkeit auch auf zeitlich zurückliegende Vegetationsdaten zugreifen zu können
- darüber hinaus kamen für die Modellierung grundwasserbeeinflusster Biotope nur kleinflächige Einzugsgebiete ohne Anschluss an Fließgewässer in Frage und
- es sollten flächenhafte Bodendaten vorliegen oder die Kartierung des Einzugsgebietes sollte mit vertretbarem Aufwand möglich sein

2.2 Erhebung der Eingangsdaten

Die zur Wasserhaushaltsmodellierung benötigten standardisierten Eingangsdaten zur Topografie, zu Bodeneigenschaften und Vegetation wurden im Juli 2007 für jeden Standort im Gelände erhoben: Geografische Lage, Meereshöhe, Exposition, Inklination und Hanglänge, Vegetationstyp, Deckungsgrad, maximale Wurzeltiefe, Bereich maximaler Wurzeldichte, Bodenart, Steingehalt, Trockenraumdichte und Humusgehalt. Die Bodenkennwerte wurden mit Geländemethoden

gemäß AG BODEN (2005) in Profilgruben erfasst. Zusätzlich wurde die Vegetation im Umfeld der Bodenprofile auf meist 4x4 m großen Flächen aufgenommen. Neben Deckungsgraden der einzelnen Arten (in Anlehnung an MAAS & PFADENHAUER 1994) wurden Gesamtdeckung sowie mittlere und maximale Höhe von Gras-, Kraut- und Strauchschicht festgehalten.

2.3 Modellierung

Obwohl der Wasserhaushalt allgemein als wichtiger Standortfaktor angesehen wird, gibt es keine flächendeckenden Messwerte von 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 „Jahrhundert-sommer“ 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.

Zeitlich und räumlich hoch auflösende Wasserhaushaltsmodelle können nicht mit aggregierten Klimadaten oder Klimaprojektionen arbeiten, sondern benötigen zeitlich ebenso hoch aufgelöste Wetterdaten: Tageswerte für Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung. Für den Ist-Zustand wurden Wetterdaten von den Gebieten nahegelegenen DWD-Stationen herangezogen. Da die Wetterelemente in unterschiedlich dichten Messnetzen des Deutschen Wetterdienstes erfasst werden, stammen die Wetterdaten einiger Untersuchungsgebiete von verschiedenen Stationen. Um die Variabilität des Wetters und der Witterung zu berücksichtigen, wurden Wetterdaten über einen möglichst langen Zeitraum verwendet; als „kleinster gemeinsamer Nenner“ mit Daten für alle Untersuchungsgebiete ergab sich die Periode von 1980 bis 2005. Diese Wetterdaten dienen nicht nur als Grundlage der Wasserhaushaltsmodellierungen des Ist-Zustands - im Folgenden als Szenario 0 (Sz0) bezeichnet -, sondern auch als Ausgangsbasis für das Zukunftsszenario (Szenario 1, Sz1): Hierzu wurden die vorhandenen realen Tageswerte des Zeitraums 1980 bis 2005 um die jeweiligen Veränderungsbeträge (siehe 3.3) differenziert nach Sommer- und Winterhalbjahr der regionalen Klimaprojektionen der Meteo-Research-Projektion (KLIWA 2006) verändert. Diese Vorgehensweise wird auch als Delta-Change-Verfahren (ANDRÉASSON 2004) bezeichnet. Als Nachteil des angewendeten Verfahrens kann die relative Statik angesehen werden, die sich aus der Berechnung der Zukunfts-Wetterdaten mit einem für jede Saison gleichen Faktor ergibt und mögliche Veränderungen, beispielsweise im Auftreten von Großwetterlagen nicht abbildet. Die Zunahme von Extremereignissen wie Starkniederschlägen kann ebenfalls nicht berücksichtigt werden; diese kann allerdings noch immer nicht mit ausreichender Genauigkeit quantifiziert werden. Der große Vorteil des Verfahrens dagegen ist, dass aus den realen Wetterdaten in Verbindung mit den regionalen Klimaprojektionen konkrete Wetter- und Witterungssituationen für die Zukunft abgeleitet werden können, deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt bei der direkten Gegenüberstellung von Ist-Zustand und Zukunftsszenario greifbar und quantifizierbar werden.

Der Wasserhaushalt wurde mit dem Programm HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance), Version 3.80D, modelliert (SCHROEDER & BERGER 2004). Dieses Programm wird

verbreitet zur Berechnung des Wasserhaushalts von Rekultivierungsschichten eingesetzt, die sich hinsichtlich ihres Wasserhaushalts nicht grundsätzlich von grundwasserfernen Standorten unterscheiden. Ein wesentlicher Vorteil des Modells ist der hohe Validierungsstand sowie von uns selbst durchgeführte Vergleichsuntersuchungen mit Messergebnissen aus Versuchsfeldern (WATTENDORF 2006), so dass die Realitätsnähe der Modellierungsergebnisse gut abgeschätzt werden konnte. Dies ist auf allgemeiner Ebene notwendig, da wichtige Glieder der Wasserhaushaltsbilanz in den Untersuchungsgebieten nicht gemessen werden können.

3. Untersuchungsgebiete und -standorte

3.1 Lage der Gebiete

Aus einer ersten Liste von 59 gut dokumentierten Naturschutzgebieten wurden letztlich zwölf über das Land Baden-Württemberg verteilte Untersuchungsgebiete (Abbildung 1) anhand der in 2.1 genannten Kriterien ausgewählt. Diese liegen in den wichtigsten Großlandschaften: Es wurden Tauberland, Schwäbische Alb und Albvorland, Keuperlandschaft, Oberrheintal, Schwarzwald und Alpenvorland berücksichtigt. Zehn der ausgewählten Gebiete sind durch grundwasserferne, mehr oder weniger trockene und eher nährstoffarme Standorte geprägt; da diese in Regionen mit sehr unterschiedlichen klimatischen Bedingungen liegen, ist die Bezeichnung „trocken“ allerdings stets relativ zu sehen.



Abbildung 1: Lage der Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg – **Figure 1:** Geographical position of the investigation areas in Baden-Wuerttemberg

Trotz dieser Ausgangsbedingungen waren in den meisten Untersuchungsgebieten recht unterschiedliche Bodeneigenschaften zu verzeichnen. Deshalb war es in diesen Gebieten notwendig, mehrere Standorte zu betrachten und für die Wasserhaushaltsmodellierung heranzuziehen. Sehr ausgeprägte Unterschiede zwischen den betrachteten Standorten bestehen beispielsweise in den NSG Haselschacher Buck, Feldberg und Buchswald Grenzach. Insgesamt wurden in den zehn nicht grundwasserbeeinflussten Untersuchungsgebieten 21 Standorte bearbeitet. Im Folgenden werden acht Standorte der Untersuchungsgebiete Taubergießen, Haselschacher Buck, Feldberg und Buchswald Grenzach im Detail betrachtet.

3.2 Charakterisierung der betrachteten Standorte

Im NSG **Taubergießen** nehmen Wälder etwa zwei Drittel der Fläche ein; ein Drittel besteht aus Wasserflächen und Wiesen (RP FREIBURG 1998). Das magere und nicht intensiv genutzte Grünland im Gebiet beherbergt zahlreiche submediterrane Pflanzenarten (GÖRGER & STAUB 1996), unter denen vor allem die vielen Orchideen für einen hohen Bekanntheitsgrad und einen regen Besucherzstrom während der Frühsommerzeit sorgen.

Die Böden der beiden Untersuchungsstandorte TG1 und TG2 (Gewann „Im G’schleder“) sind tiefgründige kalkhaltige Auenböden unter Grünland. Der Boden von TG1 besteht bis über 1 m Tiefe aus Sand mit Schluff- (Su3, Su4) und Lehmateilen (Uls, Slu). Er ist sehr locker gelagert und praktisch frei von Steinen. Profil TG2 liegt auf einem leicht erhöhten Kiesrücken. Hier reicht der Oberboden bis in 14 cm Tiefe, er besteht aus schluffig-lehmigem Sand (Slu) und ist von einem Wurzelfilz durchzogen. Der Unterboden aus reinem Sand ist schwach (nach AG BODEN 2005), der darunter liegende und tief reichende sandige Kies ist mittelstark durchwurzelt.



Abbildung 2: Bodenprofile von TG1 (links) und TG2 (rechts) – **Figure 2:** Soil profiles of the sites TG1 (left) and TG2 (right)

In den Wiesen des Gewannes „Im G’schleder“ sind die Übergänge zwischen den Vegetationseinheiten oft fließend (siehe auch GÖRGER & STAUB 1996): Halbtrockenrasen sind stellenweise flächig, oft aber nur als schmale Streifen entlang von Wegen oder Gräben ausgebildet (GÖRGER & STAUB 1996), dies gilt auch für Standort TG1. In dem artenreichen Halbtrockenrasen tritt eine Reihe von Orchideen wie beispielsweise mehrere Ragwurz-Arten (*Ophrys* sp.) oder Brandknabenkraut (*Orchis ustulata*) auf. Charakteristische Arten auf der Fläche sind neben Aufrechter Trespe (*Bromus erectus*), Skabiose (*Centaurea scabiosa*), Thymian (*Thymus pulegioides*), Steppenwolfsmilch (*Euphorbia seguieriana*) und Sonnenröschen (*Helianthemum nummularium*). Auf erhöhten Kiesrücken finden sich in den Wiesen stellenweise kleinflächige Trockenrasenfragmente wie dies an Standort TG2 der Fall ist. Sie sind niedriger im

Wuchs, deutlich lückiger und durch wenige Arten wie Mauerpfeffer (*Sedum sexangulare*) oder Natternkopf (*Echium vulgare*) charakterisiert.

Tabelle 1: Jahresniederschlagsmengen (Mittelwerte 1980 - 2005) der Untersuchungsgebiete und Bodeneigenschaften der betrachteten Untersuchungsstandorte; Bewertung der nutzbaren Feldkapazität des Wurzelraums (nFk-WR) nach AG BODEN (2005)

Table 1: Mean annual amounts of precipitation (1980 – 2005) in the investigation areas and soil features of the examined sites; classification of the Useable Field Capacity in the root zone (nFk-WR) referred to AG BODEN (2005)

Untersuchungsgebiet	Niederschlag	Standort		Wurzelraum		
				Tiefe	nutzbare Feldkapazität	
	mm/a		cm	mm = l/m ²	Bewertung	
NSG Taubergießen	730	TG- 1	48	122	mittel	
		TG- 2	52	70	gering	
NSG Haselschacher Buck	711	HB- 1	110	288	extrem hoch	
		HB- 2	13	40	sehr gering	
NSG Feldberg	1701	FB- 1	80	79	gering	
		FB- 2	15	27	sehr gering	
NSG Buchswald Grenzach	1053	BU- 1	19	37	sehr gering	
		BU- 2	82	75	gering	

Das NSG **Haselschacher Buck** im zentralen Kaiserstuhl nimmt nach seiner Erweiterung 1989 eine Fläche von 71,3 ha ein (RP FREIBURG 1998). In Kuppen- und Hanglagen des Gebiets steht nach Erosion der Lössauflage häufig bereits knapp unter der Bodenoberfläche das vulkanische Gestein, vor allem Karbonatit (kalkhaltig), an. Die Standortungunst der Hanglagen verhinderte in der Vergangenheit eine intensive landwirtschaftliche Nutzung und Melioration - allerdings gab und gibt es für das Heu der Wiesen keine Verwendung mehr, nachdem die Viehhaltung im Kaiserstuhl weitgehend aufgegeben wurde. Heute sind Pflegemaßnahmen notwendig, um die Entwicklung von Brachestadien zu unterdrücken (RP FREIBURG 1998). Neben großflächigen Salbei-Glatthaferwiesen bestimmen Halbtrockenrasen das Bild der Hänge; echte Trockenrasen finden sich nur an exponierten, sehr flachgründigen Stellen (z.B. WILMANN et al. 1989).

Die Böden der beiden Untersuchungsstandorte HB1 und HB2 markieren die Extreme der Bodenbildung im Gebiet: Der Boden von HB1 ist eine sehr tiefgründige Pararendzina aus Löss. Er besteht durchgehend aus carbonatreichem Schluff und ist bis in eine Tiefe von über 110 cm mindestens mittelstark (nach AG BODEN 2005) durchwurzelt. Vermutlich reichen die Wurzeln im Löss teilweise jedoch noch sehr viel tiefer. Der Boden des Profils HB2 ist eine sehr flachgründige Rendzina auf Karbonatit-Gestein mit einer Mächtigkeit des einzigen Horizontes von 13 cm. Der sehr lockere, humose Oberboden aus schwach tonigem Schluff (Ut2) ist von einem intensiven Wurzelfilz durchzogen. Die Zerklüftung des Ausgangsgesteins ist in Abbildung 3 gut zu erkennen, so dass angenommen werden kann, dass tief wurzelnden Pflanzen stellenweise deutlich mehr Wurzelraum in Spalten zur Verfügung steht. Dadurch verbessert sich deren Wasserversorgung,



Abbildung 3: Bodenprofile von HB1 (links) und HB2 (rechts), hier Profiltiefe 13 cm – **Figure 3:** Soil profiles of the sites HB1 (left) and HB2 (right), profile depth 13 cm

was nach WILMANN'S (1988) die besondere Lebensformen-Kombination der Trockenrasen erklärt, in denen tief wurzelnde Arten wie Steppenwolfsmilch neben intensiv und oberflächennah wurzelnden Horstgräsern (z. B. *Bromus erectus*) und extrem flach wurzelnden Annuellen und Sukkulenten (*Sedum*-Arten) auftreten. Diese Besonderheit ist mit allgemeinen Bodenkennwerten (Tabelle 1) kaum zu quantifizieren und kann daher in der Wasserhaushaltsmodellierung nur bedingt berücksichtigt werden.

Die Vegetation von Standort HB1 ist ein artenreicher Halbtrockenrasen, Gras- und Krautdeckung halten sich die Waage. Die wichtigsten Gräser sind Aufrechte Trepse und Schafschwingel (*Festuca ovina*), daneben kommt noch *Briza media* vor. Bestandesbildende Kräuter sind Skabiose (*Centaurea scabiosa*), Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*), Thymian (*Thymus pulegioides*), Tauben-Skabiose (*Scabiosa columbaria*) und Echtes Labkraut (*Galium verum*), weiterhin sind Steppenwolfsmilch und Sonnenröschen vertreten.

Entsprechend der oben beschriebenen besonderen Bodenbedingungen ist auf HB2 ein Trockenrasen ausgebildet. Der Bestand ist sehr kräuterreich, Gräser machen nur ein Zehntel der Gesamtdeckung aus. Charakteristische und besondere Arten sind die dominierende Goldaster (*Aster linosyris*), Natternkopf (*Echium vulgare*), Thymian sowie Berg- und Edelgamander (*Teucrium montanum*, *Teucrium chamaedrys*). Auffällig sind weiterhin die dunkelroten Blütenstände des Kugellauchs (*Allium spaerocephalon*).

Teile des **Feldberg**-Gebiets wurden bereits 1937 als Naturschutzgebiet ausgewiesen, heute beträgt die geschützte Fläche insgesamt 4.226 ha (RP FREIBURG 1998). Der Feldberg ist mit 1493 m Höhe der höchste Berg Deutschlands außerhalb der Alpen (BOGENRIEDER & WILMANN'S 1991), seine Gipfellagen sind durch außergewöhnlich raue klimatische Bedingungen geprägt: Neben langen Frostperioden, hohen Niederschlagsmengen (Tabelle 1) und entsprechend

anhaltenden Schneelagen gehört auch starker Wind zu den Standortfaktoren, die sich auf die Pflanzen auswirken. Den größten Teil des NSG Feldberg nehmen Fichtenwälder ein, für Lagen oberhalb etwa 1200 m ü. NN sind subalpine Borstgrasrasen typisch (RP FREIBURG 1998). Auch am Standort FB1 findet sich ein Borstgrasrasen, in dem jedoch das Borstgras (*Nardus stricta*) fast fehlt, was keineswegs außergewöhnlich für die Feldbergkuppe ist (BOGENRIEDER 1982). Den Bestand prägen Heidekraut (*Calluna vulgaris*), Horst-Schwingel (*Festuca nigrescens*), Bärwurz (*Meum athamanticum*), Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) und Schweizer Löwenzahn (*Leontodon helveticus*). FB2 ist nach BOGENRIEDER & WILMANN (1991) vermutlich wegen der extremen Windeinwirkung ein natürlich waldfreier Standort. Hier fehlt das Borstgras völlig, es herrschen Heidekraut und Horst-Schwingel vor. Weitere charakteristische Arten sind Vielblütige Hainsimse (*Luzula multiflora*), Bärwurz, Gelber Enzian (*Gentiana lutea*), Schweizer Löwenzahn und Arnika (*Arnica montana*).



Abbildung 4: Bodenprofile am Feldberg (Standort FB1, links) und am Baldenweger Buck (Standort FB2, rechts) – **Figure 4:** Soil profiles at the Feldberg (site FB1, left) and at the Baldenweger Buck (site FB2, right)

Die Böden der Standorte FB1 und FB2 unterscheiden sich stärker als Abbildung 4 erkennen lässt (siehe auch Tabelle 1): Beides sind zwar Braunerde-Ranker aus überwiegend schluffigem Lehm (Lu) und unterhalb des sehr lockeren und humosen Feinbodens steht in 15 bis 19 cm Tiefe das verwitterte Festgestein an. Auch ist der gesamte Feinboden beider Profile mit einem dichten Wurzelfilz durchzogen. Die Bohrstockerkundung zeigte jedoch, dass das verwitterte Gestein an Standort FB1 stärker mit Feinerde durchsetzt und tief durchwurzelt ist. Ein weiterer Unterschied zwischen den Profilen besteht in der Humusform beziehungsweise Humusaufgabe: Während FB1 an eher windgeschützter Stelle eine 5 cm mächtige Humusaufgabe besitzt, ist das humose Feinmaterial des extrem windexponierten Profils FB2 durch den Wind mit mineralischen Bodenteilen überweht worden.

Das NSG **Buchswald bei Grenzach** zählt zu den ältesten Schutzgebieten Baden-Württembergs. Es besteht aus vier Teilgebieten mit insgesamt 90 ha Fläche (VÖGLIN 2002). Der geologische Untergrund der sehr steilen Hänge aus Oberem Muschelkalk ist in mehrere Bruchschollen gegliedert. Hier bildete der Buchs (*Buxus sempervirens*) eine üppige und dichte Strauchschicht aus. Der 2 - 3 m hohe immergrüne Buchs unterdrückt Konkurrenten und die Krautschicht effektiv, so dass meist artenarme Bestände entstanden sind (HÜGIN 1979). Untersuchungen zum Wachstumsverhalten des Buchses von ANSTETT & BOGENRIEDER (2005) belegen eine deutliche Abhängigkeit des Buchsbaumes vom Wasserangebot des Standorts. Die beiden Autoren äußern auch die Befürchtung, dass ohne die lange Zeit praktizierter Nutzung der Buchsbestände inzwischen ein so dichter Unterwuchs entstanden sein könnte, der die Naturverjüngung der Baumarten verhindert. Dies entspricht auch unseren eigenen Beobachtungen im Jahr 2007.



Abbildung 5: Bodenprofile im NSG Buchswald: BU1 (links) und BU2 (rechts) – **Figure 5:** Soil profiles of the sites BU1 (left) and BU2 (right)

An den beiden Untersuchungsstandorten BU1 und BU2 im NSG Buchswald finden sich Mull-Rendzinen (Abbildung 5). Der flachgründige Boden von BU1 besteht durchgehend aus schluffigem Lehm (Lu) und ist in seiner geringen Tiefe von 19 cm mit einem dichten Wurzelfilz durchzogen. Der lockere und stark humose Oberboden bedeckt als relativ dünne Schicht massives Kalkgestein, auch in der Umgebung stehen Felsen bis zur Oberfläche an. Unter einem sehr lichten, nur etwa 7 m hoch wachsenden Flaumeichenbestand (*Quercus pubescens*) mit einzelnen Robinien (*Robinia pseudacacia*), Elsbeeren und Mehlbeeren (*Sorbus aucuparia*, *Sorbus aria*) deckt der Buchs ungefähr 80 % der Strauchschicht. Neben ihm kommen noch Liguster (*Ligustrum vulgare*) sowie Jungwuchs von Mehl- und Elsbeere auf. Die praktisch fehlende Krautschicht besteht nur aus einzelnen Buchskeimlingen mit < 1 % Gesamtdeckung. Auf BU1 hatte der Buchs im Sommer 2007 gelb verfärbte Blätter, was auf Wasserstress hinweisen kann. Dies wird auch von HÜGIN (1979, S. 149) als charakteristisch für die Flaumeichen-Buchswälder an den „wärmsten Lagen ...

in trockenen Sommern“ beschrieben. Nach ANSTETT & BOGENRIEDER (2005, S. 4) „steht die Pflanze im Flaumeichenwald an der Grenze ihrer Möglichkeiten“.

Am Standort BU2 waren dagegen keine Blattverfärbungen festzustellen. Grund hierfür ist sicher der tiefer gründige Boden mit größerer Wasserspeicherkapazität im Wurzelraum (Tabelle 1). Der stark humose Oberboden und ein Übergangshorizont zum Lockergestein (Ah-ICv) bestehen hier aus stark schluffigem Ton (Tu3). Der darunter liegende feinerdereiche Hangschutt enthält ungefähr 20 Vol-% stark tonigen Lehm und ist bis in mindestens 80 cm Tiefe stark durchwurzelt. Die Erschließung des Oberbodens durch Wurzeln ist insgesamt sehr gut; bis 14 cm Tiefe reicht ein dichter Wurzelfilz, darunter bis 48 cm eine sehr starke Durchwurzlung. Die lichte Baumschicht wird hier überwiegend aus Rotbuche (*Fagus sylvatica*), sowie untergeordnet Traubeneiche (*Quercus petraea*), Mehlbeere und Elsbeere gebildet, was typisch für tiefer gründige Standorte im Gebiet ist (ANSTETT & BOGENRIEDER 2005). Der Buchs war 2007 hier bis zu 5 m hoch, offensichtlich dichter und vitaler als an BU1, so dass er Konkurrenten unterdrücken konnte. Auch hier bestand die spärliche Krautschicht (< 1 % Deckung) lediglich aus Buchskeimlingen.

3.3 Projektionen des Klimawandels für die Untersuchungsgebiete

Um Einflüsse des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt der zu betrachtenden Standorte ableiten zu können, muss das zu erwartende Ausmaß der Klimaveränderungen bekannt sein. Da differenzierte Aussagen für die konkreten Untersuchungsgebiete gefragt waren, konnten nur räumlich relativ hoch aufgelöste Projektionen der zu erwartenden regionalen Klimaänderungen in Südwestdeutschland als Grundlage der Modellierung (siehe 2.3) dienen. Im Gemeinschaftsprojekt KLIWA der Länder Baden-Württemberg, Bayern und des DWD wurden Szenarien für regionale Klimaänderungen im Zeithorizont 2021 bis 2050 berechnet. Die statistisch-dynamische Modellierung nach der Meteo-Research-Methode (ENKE & SPEKAT 1997) stellte zum damaligen Zeitpunkt die plausibelsten Ausgangswerte für regionalisierte Projektionen der Klimaveränderung zur Verfügung (KLIWA 2006). Mit dieser Methode wurden für die vier betrachteten Gebiete folgende Veränderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags für den Zeitraum 2021-2050 berechnet:

1. Sommerniederschlag: Gebiet Haselschacher Buck Rückgang um 2 bis 5 %, alle Übrigen um 5 bis 10 %
2. Winterniederschlag: für alle Gebiete eine Zunahme zwischen 20 und 30 %
3. Sommertemperatur: im Gebiet Buchswald Anstieg um 1,3 - 1,4 °C, in den Übrigen um 1,4 - 1,5 °C,
4. Wintertemperatur: Feldberg Zunahme um 1,6 - 1,8 °C, alle Übrigen 2,0 - 2,5 °C

4. Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierungen

4.1 Wasserhaushaltssituationen im Ist-Zustand und im Zukunftsszenario

Unterschiede im Wasserhaushalt der betrachteten Standorte zwischen dem heutigen Zustand (Zeitraum 1980 - 2005) und dem Klimawandel- oder Zukunftsszenario können am eindrucklichsten mit charakteristischen Wasserhaushaltssituationen dargestellt werden - im Folgenden geschieht

dies anhand stets gleich aufgebauter Diagramme. Es werden hierbei die Modellierungsergebnisse relativ kurzer Zeiträume von zwei bis fünf Jahren für beide Zeitreihen gegenübergestellt. Hierbei nehmen die Jahre 2002/03 sowie der Zeitraum zwischen 1987 und 1993 eine prominente Stellung ein. In diesen Perioden finden sich interessante Abfolgen durchschnittlicher, sowie überdurchschnittlich trockener und nasser Jahre. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf Phasen sommerlicher Trockenheit und sie betrachten auch Charakteristika der Austrocknung und Wiederaufsättigung des Bodens im Frühjahr und Herbst. Nach GIGON (1968, S. 69) wirkt sich in Halbtrockenrasen der Bodenwasserfaktor während Trockenperioden „am stärksten und am entscheidendsten“ aus. Die einheitliche und definierbare Grenze für „Trockenheit“ und damit Einschränkungen der Wasserversorgung von Grünlandpflanzen wurde nach GIGON (1968) gewählt: Er gibt an, dass Wasser bis zu einer Saugspannung von weniger als -1.000 hPa von Pflanzen „leicht“ und bei höheren Saugspannungen nur „langsam“ verfügbar sei, so dass die Transpiration eingeschränkt werden müsse und sich das Wachstum reduziere. Dieser Saugspannungswert markiert ungefähr die Hälfte der nutzbaren Feldkapazität.

Die folgenden Abbildungen sind nach einem einheitlichen Schema aufgebaut und enthalten die wichtigsten Eckdaten des Wasserhaushalts (siehe auch Glossar): Schwarze (Sz0) und rote (Sz1) Ganglinien geben den modellierten Bodenwassergehalt auf der Basis von Tageswerten wieder. Die farbig unterlegte Fläche markiert den Bereich unterhalb von 50 % der nutzbaren Feldkapazität (50 % nFk) als Grenze zwischen leicht und schwerer verfügbarem Bodenwasser und die Abszisse den Permanenten Welkepunkt (PWP). Die klassische Definition des PWP stammt aus der Agrarwissenschaft und wurde für Nutzpflanzen humider Regionen konventionell auf ein Potential von -15.000 hPa festgelegt. In der Realität hängt diese Grenze vor allem von der Physiologie der Pflanzen ab, an aride Standorte adaptierte Arten können höhere Saugspannungen entwickeln (BREDA et al. 2006). Diese Konvention ist teilweise auch dem Mangel an Grundlagendaten über die in der Realität möglichen Saugspannungen der Pflanzen geschuldet. Auch über die Pflanzen der Untersuchungsstandorte finden sich nur grobe Anhaltspunkte zur Einschätzung des kritischen Bodenwassergehaltes (z.B. bei POLOMSKI & KUHN 1998). Immerhin konnte HEILIG (1931) auf einem Trockenrasen im Kaiserstuhl nahe des Untersuchungsgebietes Haselschacher Buck messen, dass sogar einige Trockenrasenarten wie Kleines Habichtskraut und Kugelblume (*Hieracium pilosella*, *Globularia punctata*) bei Saugspannungen um den PWP zu welken begannen. In Wasserhaushaltsmodellen ist der PWP als Grenze für den Entzug des gebundenen Wassers festgelegt.

Demnach treten Trockenphasen auf, wenn der Bodenwassergehalt unter 50 % der nutzbaren Feldkapazität absinkt. Wird der Permanente Welkepunkt erreicht oder unterschritten, so dass per Definition kein pflanzenverfügbares Bodenwasser mehr vorhanden ist (s.o.), so herrscht eine Dürrephase. Oberhalb der Wassergehaltsganglinien sind in Blockdiagrammen die monatlichen Niederschlagsmengen im Ist-Zustand und im Zukunftsszenario dargestellt.

NSG Taubergießen

Der in Abbildung 6 dargestellte Zeitraum von 1988 bis 1992 beinhaltet das Jahr 1988 mit überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen, zwei Trockenjahre in Folge (1990 und 1991) sowie 1989 als Jahr mit ungefähr durchschnittlichen Niederschlagsmengen.

Charakteristisch für das relativ wärmebegünstigte und niederschlagsarme Taubergießengebiet sinkt an beiden Standorten der Bodenwassergehalt im Sommer regelmäßig in den schwerer

verfügbaren Bereich unterhalb 50 % der nutzbaren Feldkapazität. Dies ist selbst im niederschlagsreichen Jahr 1988 der Fall. Die Witterung modifiziert lediglich die jährlich unterschiedliche Dauer und Intensität dieser Trockenphasen.

Am Beispiel des Jahres 1989 kann der Einfluss veränderter Klimabedingungen auf den Bodenwasserhaushalt verdeutlicht werden: Auf Standort TG1 unterschreitet der Bodenwassergehalt im Ist-Zustand am 26.5.89 die 50 %-nFk-Marke, es schließt sich eine Trockenphase von 112 Tagen Dauer bis Mitte September an (Sz0). Im Zukunftsszenario (Sz1) beginnt diese bereits fünf Tage früher und hält 17 Tage länger an; es folgen in Sz1 noch drei Trockentage im Oktober. Am Standort TG2 würde sich der Klimawandel im durchschnittlichen Jahr 1989 weniger deutlich auswirken. Auf Grund der geringeren Verdunstung durch die schütterere Vegetation beginnt hier trotz geringerer Wasserspeicherkapazität des Bodens die Trockenphase im Ist-Zustand erst am 31.5. und dauert mit einer kurzen Unterbrechung Mitte Juli bis 14.9.1989. Im Zukunftsszenario würde sie bereits am 27.5. beginnen und ununterbrochen ebenfalls bis zum 14.9. anhalten; sie wäre mithin 5 Tage länger als im Ist-Zustand (Abbildung 6).

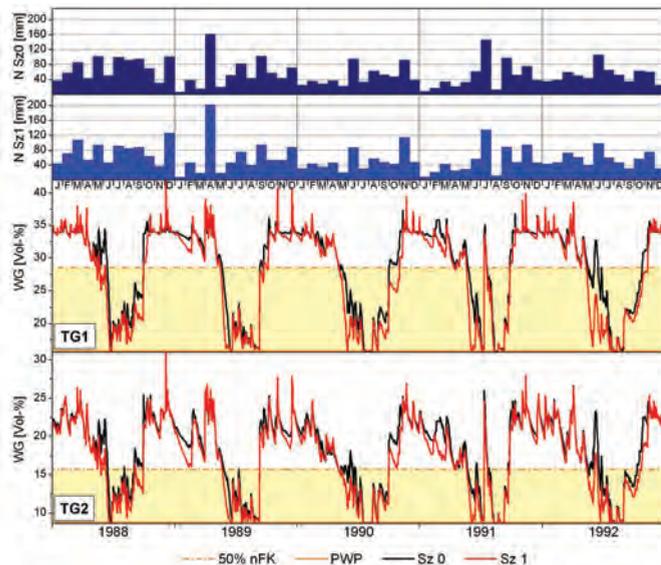


Abbildung 6: Niederschlag (Monatssummen) und Bodenwassergehalte in der Wurzelzone (Tageswerte) der Standorte TG1 und TG2 im Zeitraum 1988 bis 1992; Ist-Zustand (Sz0) und Zukunftsszenario (Sz1)

Figure 6: Precipitation (N, monthly totals) and water regime (WG = Soil Water Content, daily values) of the sites TG1 and TG2 in the period 1988 - 1992; Ist-Zustand (Sz0) and future period (Sz1)

NSG Haselschacher Buck

In Abbildung 7 wird der Zeitabschnitt von 1989 bis 1993 für das Gebiet Haselschacher Buck genauer betrachtet, denn er ist hier durch außergewöhnlich geringe Niederschlagsmengen in Folge gekennzeichnet: Das Mittel des Betrachtungszeitraumes für den Kaiserstuhl von 711 mm/a im Ist-Zustand wurde mit 625, 531, 539, 579 und 624 mm/a in jedem der fünf Jahre erheblich unterschritten. Nur im Jahr 1990 lag die Jahresmitteltemperatur mit 10,5 °C deutlich höher als das Mittel des Betrachtungszeitraumes von 9,9 °C, was sich über eine höhere Verdunstung auf die Bodenwassergehalte auswirken kann. 1990 und 1991 sind nach DWD-Definition als Trockenjahre einzustufen.

Die sehr unterschiedlichen Bodeneigenschaften der Standorte HB1 und HB2 (siehe 3.2 und Tabelle 1) prägen maßgeblich den Wasserhaushalt. Der Boden von HB1 mit extrem hoher nutzbarer

Feldkapazität kann Wetterereignisse und den Witterungsverlauf weitgehend abpuffern. Die Ganglinien des Bodenwassergehalts von HB1 zeichnen daher ausgeprägt den saisonalen Rhythmus der Verdunstungsleistung nach (Abbildung 7). Nur wenige starke Niederschlagsereignisse, vor allem im Winter und Frühjahr, verursachen kurzzeitige Übersättigung und damit Spitzen in der Kurve. Im Gegensatz dazu reagiert der Boden von HB2 mit nur 40 mm nFk auf jedes ausgiebige Niederschlagsereignis. Regenfälle oder trockene Phasen lassen die Wassergehalte sprunghaft ansteigen und schnell absinken. Dieser Standort ist damit bereits heute von extremen Wechseln im Wasserhaushalt geprägt. Die saisonale Tendenz der Wassergehaltskurven ist zwar klar zu erkennen, aber von vielen Spitzen- und Tiefstwerten überformt. Innerhalb kurzer Zeit kann der Boden vom PWP bis über 50 % nFk aufgesättigt werden und trocknet danach auch relativ schnell wieder aus. Die Bodenwassergehalte in der Vegetationszeit liegen meist unterhalb von 50 % der nFk. Allerdings sinken auch bei HB1 praktisch in jedem Jahr die Bodenwassergehalte zumindest kurzzeitig in den Bereich unter 50 % nFk ab.

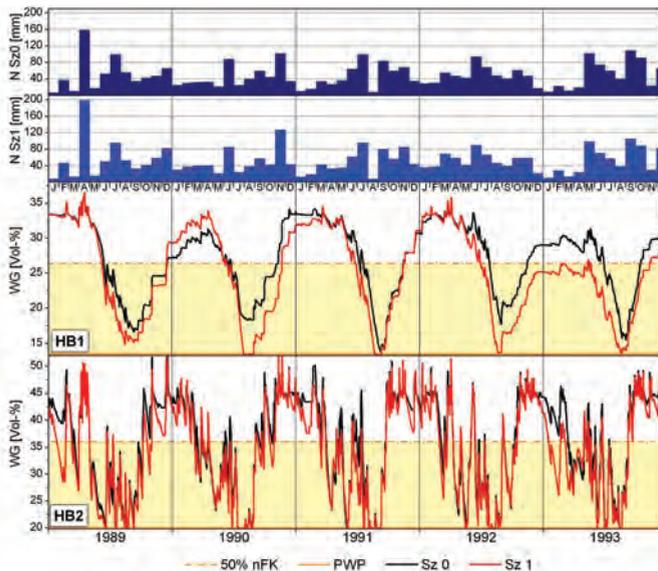


Abbildung 7: Niederschlag (Monatssummen) und Bodenwassergehalte (Tageswerte) im Wurzelraum der Standorte HB1 und HB2 im Zeitraum 1989 bis 1993; Ist-Zustand (Sz0) und Zukunftsszenario (Sz1)

Figure 7: Precipitation and water regime of the sites HB1 and HB2 in the period 1989 - 1993; current state (Sz0) and future period (Sz1) (for abbreviations see Figure 6)

Standort HB1 weist deutliche Unterschiede zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenario auf. Allgemein wird der Bodenwasserspeicher tiefer und länger entleert. Während im Ist-Zustand in keinem der fünf betrachteten Jahre der PWP erreicht wird, ist dies im Sz1 in vier Sommern in Folge der Fall (Abbildung 7). 1989 beginnt eine mehrjährige Phase unterdurchschnittlicher Jahresniederschlagsmengen mit einem gut gefüllten Bodenwasserspeicher, aber schon im ersten Sommer sinkt in Sz1 der Wassergehalt tiefer ab. Im folgenden Winter wird im Ist-Zustand die Aufsättigung nicht erreicht, jedoch im Zukunftsszenario wegen der höheren Winterniederschlagsmengen. Dieser zusätzliche Vorrat ist aber bereits im Mai des Folgejahres 1990 aufgebraucht und im Sommer 1990 trocknet in Sz1 - nicht aber im Ist-Zustand - der Boden bis zum PWP aus. Die Aufsättigung im Herbst erfolgt von tieferem Niveau und es dauert länger, bis die Feldkapazität im Zukunftsszenario zumindest kurzfristig erreicht wird. 1991 und 1992 sinkt der Bodenwassergehalt im Sz1 bereits etwa einen Monat früher ab, reicht tiefer und 1992 bleibt er auch trotz höherer Niederschlagsmengen im Winter weit unter dem Ist-Zustand zurück.

Im Gegensatz zu HB1 sind bei Standort HB2 nur wenige deutliche Unterschiede zwischen Ist-Zustand und Zukunft zu erkennen. Die höheren Temperaturen führen zu einem früheren Beginn der Vegetationszeit und damit bereits im Frühling zu stärkerer Verdunstung und niedrigeren Bodenwassergehalten. In den Sommermonaten steht dann wenig Wasser zur Verfügung, so dass die höhere potentielle Verdunstung auf HB2 nicht realisiert werden kann und Unterschiede deshalb kaum in Gewicht fallen.

Die Niederschlagsmenge betrug im feuchten Jahr 2002 am Haselschacher Buck 864 mm und im Trockenjahr 2003 nur 484 mm, im Zukunftsszenario wurden für diese beiden Jahre mit 921 und 514 mm jeweils höhere Niederschlagsmengen ermittelt. So ergeben sich erhebliche Unterschiede zwischen den beiden betrachteten Jahren, den beiden Standorten und teilweise auch den Szenarien. Während beim Standort HB1 im Jahr 2002 die Bodenwassergehalte in Sz1 bis auf die Monate November und Dezember (Abbildung 8) durchgehend - und teilweise sehr deutlich - unter dem Ist-Zustand liegen, ist dies 2003 nur in der Zeit von Mai bis Juli der Fall. Im Jahr 2002 stellt Standort HB1 in beiden Szenarien der Magerrasenvegetation zu jeder Zeit ausreichend Wasser zur Verfügung. 2003 hingegen wird auch auf diesem außergewöhnlich guten Standort die Wasserversorgung zeitweise kritisch: Ab Mitte August 2003 wird im Ist-Zustand für 10 Tage der PWP erreicht. Bei der höheren Temperatur und den geringeren Sommerniederschlägen des Zukunftsszenarios würde sich die Dauer der Dürrephase auf 18 Tage fast verdoppeln.

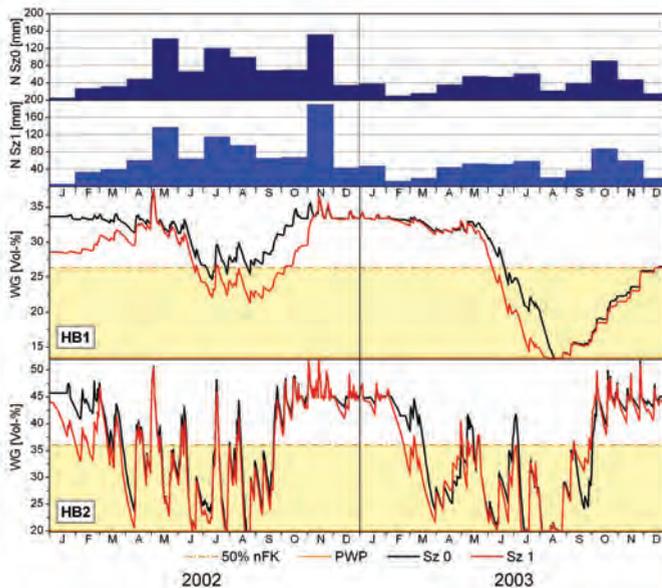


Abbildung 8: Niederschlag (Monatssummen) und Bodenwassergehalte (Tageswerte) der Standorte HB1 und HB2 im Zeitraum Januar 2002 bis Dezember 2003; Ist-Zustand (Sz0) und Zukunftsszenario (Sz1)

Figure 8 Precipitation and water regime of the sites HB1 and HB2 in 2002 and 2003; current state (Sz0) and future period (Sz1) (for abbreviations see Figure 6)

Sogar im überdurchschnittlich feuchten Jahr 2002 wird auf dem sehr flachgründigen Standort HB2 der Permanente Welkepunkt erreicht. Im Ist-Zustand war dies an insgesamt fünf Tagen der Fall, für das Zukunftsszenario wurden neun Tage berechnet, davon sieben Tage in Folge. Im trockenen Sommer 2003 wird der PWP an 15 Tagen im Ist-Zustand und an 20 Tagen im Sz1 erreicht oder unterschritten. Im Gegensatz zu Standort HB1 verlängert sich aber hier die Dauer der längsten Dürrephase in 2003 nicht, sie beträgt sowohl in Sz0 als auch in Sz1 maximal zehn Tage (Abbildung 8).

NSG Feldberg

Die Standorte am Feldberg sind aufgrund mittlerer Jahresniederschlagssummen im Betrachtungszeitraum 1980 - 2005 von 1701 mm/a überreich mit Wasser versorgt. Die MR-Modellierungen (KLIWA 2006) gehen für den Feldberg von 5 - 10 % weniger Sommer- und 20 - 30 % mehr Winterniederschlag aus (siehe 3.3), so dass die Jahressumme des Niederschlags ansteigen würde: Für das Zukunftsszenario ergibt sich hieraus ein gegenüber heute noch höherer mittlerer Jahresniederschlag von 1827 mm, allerdings sinken die mittleren Sommerniederschlagsmengen von 921 mm im Ist-Zustand auf 858 mm ab.

In Abbildung 9 sind Niederschlagsmengen und Ganglinien der Bodenwassergehalte der Standorte FB1 und FB2 in der Zeit von Januar 2001 bis Dezember 2005 dargestellt. Die Jahre 2003 und 2005 sind in diesem Zeitfenster mit 1196 mm/a und 1288 mm/a im Ist-Zustand beziehungsweise 1264 mm und 1376 mm/a im Zukunftsszenario als Trockenjahre anzusehen. Das durchschnittlich warme Jahr 2001 kann mit 1935 mm (Sz1: 2086 mm) Jahresniederschlag als relativ feucht gelten. Im Diagramm fallen die im Vergleich zu den übrigen Standorten sehr hohen maximalen

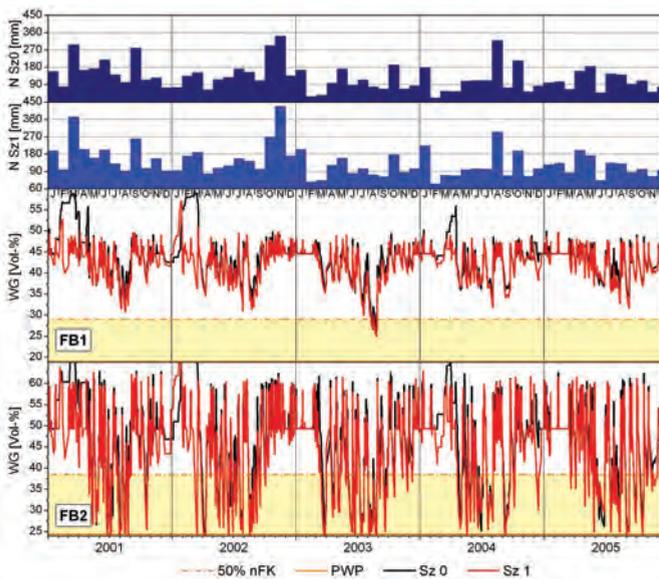


Abbildung 9: Niederschlag (Monatssummen) und Bodenwassergehalte des Wurzelraums (Tageswerte) der Standorte FB1 und FB2 im Zeitraum 2001 bis 2005; Ist-Zustand (Sz0) und Zukunftsszenario (Sz1)

Figure 9: Precipitation and water regime of the sites FB1 and FB2 in the period 2001 - 2005; current state (Sz0) and future period (Sz1) (for abbreviations see Figure 6)

Bodenwassergehalte von kurzzeitig über 60 Vol-% der beiden Feldbergstandorte auf. Diese sind auf die hohen Humusgehalte des Bodens zurückzuführen. Jedoch ist trotz hoher Feldkapazität der Wasserspeicher aufgrund der geringen Bodenmächtigkeit nicht allzu groß, so dass zu allen Jahreszeiten die charakteristischen hohen Niederschlagsmengen zur Wassersättigung des Bodens über die Feldkapazität hinaus führen können. Dies ist vor allem bei Standort FB2 mit seiner geringen Speichergröße (Tabelle 1) häufig der Fall (Abbildung 9).

Kurzzeitige Schwankungen im Bodenwasserhaushalt, verursacht durch Aufsättigung und Austrocknung, überlagern an beiden Standorten die saisonale Amplitude (z.B. Abbildung 7 HB1) weitgehend. Besonders ausgeprägt ist dies bei Standort FB2. Hier pendeln die Bodenwassergehalte im Sommerhalbjahr in kürzester Zeit zwischen PWP und Feldkapazität. Im Gegensatz dazu reicht der Bodenwasserspeicher von Standort FB1 unter den am Feldberg

gegebenen klimatischen Bedingungen aus, um Engpässe in der Wasserversorgung praktisch auszuschließen. Nur in trockenen Jahren, wie beispielsweise 2003, kommt es im Ist-Zustand an wenigen Tagen zu Wassergehalten unterhalb 50 % nFk (Abbildung 9). Diese Situation verschärft sich im Zukunftsszenario dahingehend, dass sich die Anzahl dieser Tage - beispielsweise 2003 - mehr als verdoppelt. Im Vergleich mit den anderen Untersuchungsgebieten bleibt FB1 allerdings auch im Zukunftsszenario der Standort mit dem ausgeglichensten Bodenwasserhaushalt: Der Permanente Welkepunkt wird hier weder im Ist-Zustand noch im Zukunftsszenario auch nur annähernd erreicht.

Am Standort FB2 kann nicht nur in trockenen Jahren der Permanente Welkepunkt erreicht werden. Im Ist-Zustand ist dies beispielsweise 2002 an drei und 2003 an 12 Tagen der Fall (Abbildung 9), im Zukunftsszenario jeweils einen Tag mehr. Sommerliche Trockenphasen können zukünftig länger werden, weil die Aufsättigung durch einzelne Niederschlagsereignisse nicht mehr ausreicht, die Bodenwassergehalte deutlich anzuheben. So kann sich aus mehreren kurzen Trockenphasen eine ununterbrochene längere Phase entwickeln, wie dies beispielsweise im Sommer 2003 mit insgesamt 27 Tagen Dauer der Fall war. Insgesamt kann die Anzahl der Trockentage um bis zu circa 20 % ansteigen, beispielsweise wurden für den Sommer 2003 im Ist-Zustand 74 und im Zukunftsszenario 87 Tage unter 50 % nFk berechnet.

NSG Buchswald Grenzach

Das Niederschlagsmittel im Gebiet des Buchswaldes im Zeitraum 1980 bis 2005 beträgt im Ist-Zustand 1053 mm/a; für das Zukunftsszenario wurden 1129 mm/a berechnet. Der in Abbildung 10 dargestellte Zeitraum 2001 bis 2005 ist durch überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen 2001 und 2002 (im Ist-Zustand 1320 mm und 1204 mm, in Sz1 1452 mm und 1280 mm) sowie geringe Niederschläge in den Jahren 2003 bis 2005 (Sz0: 701 mm, 908 mm und 890 mm, Sz1: 741 mm, 961 mm, 952 mm) gekennzeichnet. Auch an diesen beiden Standorten werden die Ganglinien der Bodenwassergehalte deutlich durch die Speicherkapazität des Bodens beeinflusst. Während der Wasserhaushalt des sehr flachgründigen Standorts BU1 mit 37 mm nutzbarer Feldkapazität im Wurzelraum von kurzzeitigen starken Schwankungen des Bodenwassergehaltes gekennzeichnet ist, verlaufen die Kurven von BU2 mit einer nFk von 75 mm gedämpfter und mit einer ausgeprägten saisonalen Amplitude (Abbildung 10). Im Winter sind die Böden beider Standorte im NSG Buchswald Grenzach permanent - oft sogar über die Feldkapazität hinaus - mit Wasser gesättigt. Während bei BU1 in jedem Jahr und meistens mehrmals der Boden bis zum Permanenten Welkepunkt austrocknet, ist dies bei BU2 nur in relativ trockenen Jahren wie 2003 oder 2005 der Fall.

Der Bodenwassergehalt von BU1 sinkt auch im feuchten Jahr 2002 an 15 Tagen bis zum PWP ab, allerdings nie länger als vier Tage in Folge. Im Zukunftsszenario erhöht sich diese Anzahl auf 24 Tage (+ 60 %). Für das Jahr 2003 wurden aufgrund der Witterung deutlich mehr Dürretage, nämlich im Ist-Zustand 39 Tage berechnet. Die längste Dürrephase dauert hierbei fast drei Wochen, vom 14.6. - 3.7.2003. Im Zukunftsszenario steigt die Zahl dieser Tage mit Wassergehalten unter PWP jedoch lediglich um zwei Tage auf insgesamt 41 Tage an und es kommt auch nicht zu längeren Trockenphasen als im Ist-Zustand.

Wie bereits erwähnt, trocknet der Boden des Standorts BU2 nur in Jahren mit sehr geringem Niederschlag bis zum PWP aus: für 2003 wurden 10 Tage für den Ist-Zustand und 13 Tage für das

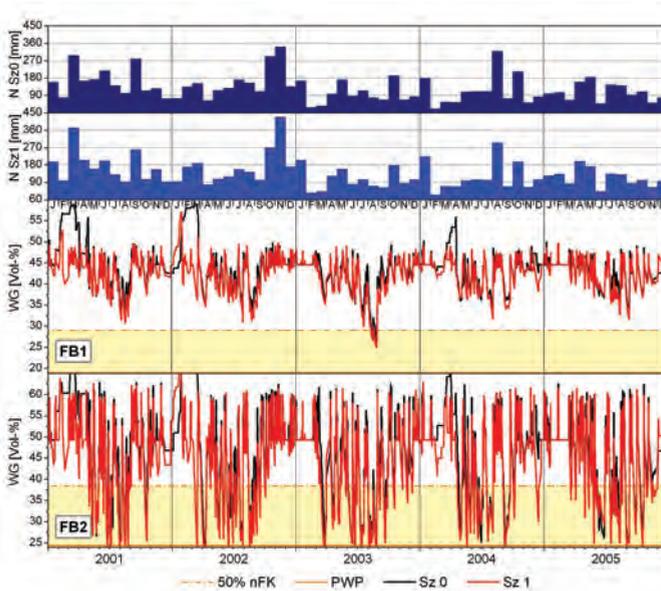


Abbildung 10:
Niederschlag (N) und Bodenwasser-
gehalte (WG) im Wurzelraum der
Standorte BU1 und BU2 im Zeitraum
2001 bis 2005; Ist-Zustand (Sz0) und
Zukunftsszenario (Sz1)

Figure 10:
Precipitation and water regime of the
sites BU1 and BU2 in the period 2001
- 2005; current state (Sz0) and future
period (Sz1) (for abbreviations see
Figure 6)

Zukunftsszenario berechnet. Die Zahl der Tage mit Wassergehalten unter 50 % der nFk könnte auch an diesem Standort in feuchten Jahren stärker ansteigen als in trockenen. Sie erhöht sich beispielsweise 2002 von 38 Tagen in Sz0 auf 70 Tage in Sz1 (+ 84 %), im Trockenjahr 2003 dagegen von 102 Tagen im Ist-Zustand auf 116 Tagen im Zukunftsszenario (+ 13 %). Auf beiden Standorten fallen Änderungen im Wasserhaushalt daher am deutlichsten in feuchteren, weniger stark dagegen in trockenen Jahren ins Gewicht.

5. Fazit und Diskussion

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Klimaprojektionen mit ganzjährig höheren Lufttemperaturen und damit grundsätzlich steigender Verdunstung sowie die saisonale Verlagerung der Niederschläge in den Winter - mit hierdurch in Baden-Württemberg meist ansteigenden Niederschlags-Jahressummen - an allen Standorten tendenziell trockenere Bedingungen im Sommer sowie zeitweise auch im Herbst und Frühling erwarten ließen. Diese Annahmen wurden durch die Wasserhaushaltsmodellierungen bestätigt.

Anhand ausgewählter Wasserhaushaltssituationen wurden mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt unterschiedlicher Standorte in Naturschutzgebieten aufgezeigt. Hierbei wird deutlich, dass der standortbezogene Ansatz des Vorhabens sinnvoll war, denn je nach Bodeneigenschaften lassen sich selbst innerhalb der meist relativ kleinflächigen Untersuchungsgebiete erhebliche Unterschiede herausarbeiten, die bei einer Betrachtung ausschließlich auf regionaler Ebene - dem Maßstab der Klimaprojektionen - nicht deutlich werden. Unterschiede hinsichtlich des Wasserhaushalts bestehen einerseits zwischen den Standorten im Ist-Zustand, andererseits beeinflussen die potentiellen Klimaänderungen in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften in unterschiedlichem Maß den „zukünftigen“ Wasserhaushalt. Die standörtlichen Eigenschaften beeinflussen somit auch die „Reaktion“ des Wasserhaushalts auf

Klimaveränderungen. Die Wasserhaushaltsmodellierungen haben außerdem gezeigt:

- Die Bodeneigenschaften der Standorte bewirken bereits im Ist-Zustand innerhalb der Untersuchungsgebiete deutliche Unterschiede im jeweiligen Wasserhaushalt. Standorte mit flachgründigen Böden mit sehr geringer Wasserspeicherkapazität sind schon jetzt auf den meist südlich exponierten, wärmebegünstigten Lagen durch ausgeprägte episodische Wechsel von Befeuchtung und Austrocknung geprägt. Die von der Verdunstung gesteuerten saisonalen Bodenwassergänge werden hier von Einzelereignissen stark überprägt. Im Gegensatz dazu puffern Böden mit großem Wasserspeicher Ereignisse stärker ab und der saisonale Bodenwassergang tritt klarer zu Tage.
- An sehr flachgründigen Standorten ist schon heute die Differenz zwischen potenzieller und realer Verdunstung sehr groß. Deshalb können die Bodenwassergehalte dieser Standorte auch bei zukünftig wärmerem und trockenerem Sommer meist nur noch wenig absinken, weil schon im Ist-Zustand kein Wasser mehr vorhanden ist. Daher ist auf diesen heute schon sehr trockenen Standorten mit eher geringen relativen Veränderungen durch die Klimaänderung zu rechnen.
- Auf den tiefgründigen Magerrasenstandorten sind dagegen die Unterschiede zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenario größer, denn hier wird im Winter viel Wasser gespeichert und zukünftig mehr Wasser verdunstet, da der größere Wasservorrat des Bodens weiter ausgeschöpft werden kann. Allerdings reichen die Veränderungen durch den Klimawandel nicht aus, um beispielsweise die Halbtrockenrasenstandorte des Taubergießengebiets oder des Haselschacher Bucks genauso trocken werden zu lassen, wie es heute die sehr flachgründigen Trockenrasenstandorte sind.
- Insgesamt sind die relativen Unterschiede zwischen Ist-Zustand und Zukunft an den Standorten in feuchten Jahren meist größer als in niederschlagsarmen und trockenen Jahren.
- Auch die Standorte am Feldberg werden nach unseren Modellierungen tendenziell im Sommer trockener. Allerdings sind bei dem ausgeprägt kühlen Klima und den hohen Niederschlagsüberschüssen des Feldberggebiets ausgedehnte echte Trockenphasen hier auch zukünftig nicht anzunehmen: Infolge der Niederschlagsüberschüsse und der relativ gleichmäßig verteilten Niederschläge wird der Bodenwasserspeicher immer wieder aufgesättigt.

Für die Wintermonate lassen die Wasserhaushaltsbetrachtungen keine einschneidenden Änderungen erwarten: Bereits heute herrscht Wasserüberschuss und in dieser Zeit werden demnach allgemein die größten Abflussmengen (Grundwasserneubildung) registriert. Die prognostizierte Zunahme der Verdunstung bei gleichzeitig höheren Niederschlagsmengen wird hieran nur sehr wenig ändern. Weiterhin nimmt der Bodenwasserhaushalt der Wintermonate naturgemäß weniger Einfluss auf die Entwicklung der Pflanzen als während der Vegetationszeit. Hinweise, dass der winterliche Wasserüberschuss zu Stauwasser und damit zeitweilig ungünstigen Wuchsbedingungen führt, wurden in den Bodenprofilen der betrachteten Standorte nicht gefunden; mehr Bodenwasser im Winter dürfte damit wohl keine Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung haben.

Hinsichtlich einer Anpassung an den Klimawandel ist zu sagen, dass der Wasserhaushalt grundwasserferner Gebiete nicht entgegen der sich aus dem Klimawandel ergebenden Tendenz verändert werden kann: Die sich ergebenden Veränderungen der Standortbedingungen sind deshalb prinzipiell hinzunehmen. Klimawandelinduzierte Wanderungsbewegungen von Arten

sind wahrscheinlich, jedoch sind viele Magerrasenarten relativ ausbreitungsschwach. So sind Artenverschiebungen, beispielsweise von Trockenrasen in heutige Halbtrockenrasen hinein, bei eng benachbarten Gebieten relativ gut möglich. Bedeutend schwieriger dürfte die Besiedlung sich möglicherweise neu entwickelnder Standorte für thermophile Arten bei größerer räumlicher Distanz zum nächsten Lieferbiotop für Diasporen werden, denn die traditionellen Ausbreitungsmedien wie die Wanderschäferei sowie oligotrophe „Trittstein“-Biotope in der (Agrar-)Landschaft fehlen heute weitgehend. Auswirkungen der Wasserhaushaltsänderungen auf die schützenswerte Vegetation könnten somit nur in gewissem Umfang entgegengewirkt werden, indem Ausbreitungsmedien und Trittsteinbiotope „reaktiviert“ werden.

Die Schutzziele des Erhalts von Magerrasen mehr oder weniger trockener Standorte und der hierfür charakteristischen Artenkombination in Naturschutzgebieten werden nachdem die vormals meist intensive Nutzung aufgegeben wurde, meist über Pflegemaßnahmen zum Unterdrücken der Gehölzsukzession verfolgt. Die Gefährdung der Schutzziele durch Eutrophierung und Gehölzaufkommen ist wohl bei den meisten Gebieten bedrohlicher einzustufen als die sich aus unseren Wasserhaushaltsbetrachtungen ergebenden Veränderungen durch den Klimawandel. Im Allgemeinen wird heute davon ausgegangen, dass die aktuelle und mögliche zukünftige Landnutzung die Naturschutzziele und den Erhalt der Biodiversität stärker gefährdet, als der Klimawandel (SOTHMANN 2007, VOHLAND 2007, JESSEL 2008).

Eine problemorientierte Naturschutzstrategie, die dem vorhandenen Artbestand „bestmögliche Entwicklungs- und somit Überlebenschancen“ (GEBHARDT 2000, S. 264) geben soll, müsste das Schaffen großflächiger, standörtlich vielfältiger und extensiv genutzter Schutzgebiete mit klimatisch unterschiedlichen Standortkomplexen ins Auge fassen, was auch das Ausweisen von Prozessschutzflächen, den Ausbau wirksamer Biotopverbundstrukturen, die Beseitigung anthropogener Barrieren, Extensivierung in der Land- und Forstwirtschaft sowie die Begrenzung der weiteren Zersiedelung der Landschaft beinhalten sollte (GEBHARDT 2000). Eine solche Strategie erscheint jedoch auch heute und unter dem Eindruck der vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels und damit verbundener Anpassungsstrategien kaum einfacher zu realisieren als in der Vergangenheit.

6. Glossar

Der vorstehende Text enthält eine ganze Reihe von Abkürzungen, vor allem in Zusammenhang mit dem Bodenwasserhaushalt. Diese werden im Folgenden nochmals in einer Übersicht erklärt:

- Fk: Feldkapazität (Synonym: Wasserspeicherkapazität); die Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft festhalten kann [Vol-% = mm/dm Bodentiefe].
- nFk: nutzbare Feldkapazität (Synonym: nutzbare Wasserspeicherkapazität); die Wassermenge, die für Pflanzen verfügbar im Boden gespeichert werden kann. Die nFk ist die Differenz von Fk und PWP.
- nFk-WR: nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums; die Wassermenge, die innerhalb des gut durchwurzeltens Bodens für die Pflanzen verfügbar gespeichert werden kann.
- 50 % nFk: Hälfte der nutzbaren Feldkapazität; sie wird als Grenze zwischen leicht und schwerer verfügbarem Bodenwasser angesehen.
- N = Niederschlagsmenge [mm = l/m²]

- PWP: Permanenter Welkepunkt; bei Austrocknung des Bodens unterhalb dieser Grenze können die meisten Pflanzen kein Wasser mehr aufnehmen und sie welken. Wassergehalte unterhalb des PWP werden daher auch als Totwasser bezeichnet.
- Sz0: Ist-Zustand des Wasserhaushalts der Standorte; Modellierung mit Wetterdaten von 1980 – 2005.
- Sz1: Zukunftsszenario des Wasserhaushalts, berechnet aus „Wetter“ daten (1980 – 2005), die jeweils um den Betrag der Klimaänderungen korrigiert wurden.
- WG: Bodenwassergehalt [Vol-%]

Angeführte Schriften

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 5. Auflage, Stuttgart, 438 S.
- Andreasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L. & Lindström, G. (2004): Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio* Vol. 33 No. 4-5, Royal Swedish Academy of Sciences
- Anstett, M. & Bogenrieder, A. (2005): Dendrologische und ökologische Untersuchungen an *Buxus sempervirens* im Buchswald bei Grenzach, *Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br.* 95/2: 1 - 25
- Bogenrieder, A. & Wilmanns, O. (1991): Der Einfluss von Schaf- und Rinderbeweidung auf die Weidfeldvegetation der Feldbergkuppe, *Veröff. Naturschutz Landschaftspflege Bad.-Württ.* 66: 7 - 30, Karlsruhe
- Bogenrieder, A. (1982): Pflanzenwelt - Die Flora der Weidfelder, Moore, Felsen und Gewässer, in Landesanstalt für Umwelt [Hrsg.]: *Der Feldberg im Schwarzwald, Die Natur- und Landschaftsschutzgebiete Baden-Württembergs, Band 12: 244 - 364*
- Breda, N., Huc, R., Granier, A. & Dreyer, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences, *Ann. For. Sci* 63 (2006): 625 - 644
- Enke, W., & Spekat, A. (1997): Downscaling climate model outputs into local and regional weather elements by classification and regression, *Climate Research* 8: 195 - 207
- Gebhardt, H. (2000): Klimaveränderungen und Auswirkungen auf Ökosysteme, KLIWA-Symposium 29. - 30.11.2000, KLIWA Bericht 1: 255 - 268
- Gigon, A. (1968): Stickstoff- und Wasserversorgung von Trespen-Halbtrockenrasen (Mesobromion) im Jura bei Basel, *Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel* 38: 29 - 85
- Görger, A. & Staub, F. (1996): Die Wiesengesellschaften des Naturschutzgebietes Taubergießen auf der Gemarkung Rhinau - Südteil -, unveröff. Gutachten, Freiburg
- Heilig, H. (1931): Untersuchungen über Klima, Boden und Pflanzenleben des Zentralkaiserstuhls, *Zeitschrift für Botanik* 24, H. 5/6: 225 - 279
- Hügin, G. (1979): Die Wälder im Naturschutzgebiet Buchswald bei Grenzach, in LfU [Hrsg.]: *Der Buchswald bei Grenzach (Grenzacher Horn), Natur- u. Landschaftsschutzgebiete Bad.-Württ.* 9: 147 - 199
- Jessel, B. (2008): Zukunftsaufgabe Klimawandel – der Beitrag der Landschaftsplanung, *Natur und Landschaft* 83, Heft 7: 311 - 317
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland, Abschätzungen der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, Herausgegeben von Arbeitskreis KLIWA (LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für

- Umwelt BfLU und Deutscher Wetterdienst DWD), KLIWA-Berichte Heft 9, 100 S.
- Maas, D. & Pfadenhauer, J. (1994): Effizienzkontrollen von Naturschutzmaßnahmen - fachliche Anforderungen im vegetationskundlichen Bereich, Schr.-R. f. Landschaftspflege und Naturschutz H. 40: 25 - 50, Bonn-Bad Godesberg
- Polomski, J. & Kuhn, N. (1998): Wurzelsysteme, Bern, Stuttgart & Wien, 290 S.
- RP Freiburg [Hrsg.] (1998): Die Naturschutzgebiete im Regierungsbezirk Freiburg, Ostfildern, 636 S.
- Schroeder, P.R. & Berger, K. (2004): Das Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Modell, Benutzerhandbuch für die deutsche Version 3, 4. überarb. Aufl., 90 S., Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg
- Sothmann, L. (2007): Biodiversität im ländlichen Raum – Zukunftssicherung unserer Gesellschaft, Anliegen Natur 31/2007, Heft 1: 13 - 19
- Vögtlin, J. (2002): Pflege- und Entwicklungsplan Naturschutzgebiete „Buchswald“ und „Ruschbachtal“, unveröff. Gutachten im Auftrag der Bezirksstelle für Naturschutz und Landschaftspflege, Freiburg, 32. S. + Anhang
- Vohland, K. (2007): Naturschutzgebiete im Klimawandel – Risiken für Schutzziele und Handlungsoptionen, Anliegen Natur 31/2007, Heft 1: 60 - 67
- Wattendorf, P. (2006): The water balance of recultivation layers – results of measurements and water balance modeling, in: Landfill Workshop Zittau - Liberec 2005, Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, Heft 86: 207 – 220
- Wattendorf, P., Ehrmann, O. & Konold, W. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf geschützte Biotope in Baden-Württemberg, Culterra 57, 226 S., Freiburg
- Wilmanns, O. (1988): Können Trockenrasen derzeit trotz Immissionen überleben? Eine kritische Analyse des Xerobrometum im Kaiserstuhl, Caroleinea 48: 5 - 16
- Wilmanns, O., Wimmenauer, W., Fuchs, G., Rasbach, H., Rasbach, K. & Vetter, E. (1989): Der Kaiserstuhl, Gesteine und Pflanzenwelt, Freiburg, 244 S.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau](#)

Jahr/Year: 2013

Band/Volume: [103](#)

Autor(en)/Author(s): Wattendorf Peter

Artikel/Article: [Wirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt geschützter Biotope in Baden-Württemberg 53-74](#)