

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 166 (2015)
Heft: 6

Artikel: Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern
Autor: Remund, Jan / Augustin, Sabine
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097547>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern

Jan Remund
Sabine Augustin

Meteotest (CH)*
Bundesamt für Umwelt (CH)

Zustand und Entwicklung der Trockenheit in Schweizer Wäldern

Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert prognostizieren für die Schweiz steigende Temperaturen und häufigere Witterungsextreme. Trockenheitsrisiken werden im Schweizer Wald künftig vermehrt eine Rolle spielen. Ziel der Untersuchung war die Berechnung von Indikatoren, die es erlauben, heutige und künftige Trockenheitsrisiken auf regionaler Ebene abzuschätzen und zu bewerten. Als Trockenheitsindikatoren wurden die Standortwasserbilanz (site water balance) und das Verhältnis der aktuellen zur potenziellen Evapotranspiration (ETa/ETp) verwendet. Diese Indikatoren haben einen engen Bezug zu Vitalitätsparametern von Bäumen. Für die Projektionen in die Zukunft wurden das Emissionsszenario A1B, das von einer weiteren Erwärmung um 2.7 bis 4.1 °C in der Schweiz ausgeht, und drei regionale Klimamodelle (CLM, RCA, REGCM3), die verschiedene Entwicklungen bezüglich des Niederschlags und der Temperatur prognostizieren, verwendet. Es wurden historische Zeitreihen zwischen 1951 und 2012 sowie Szenarien bis 2100 für verschiedene klimatische Regionen der Schweiz berechnet. Die Indikatoren können die gemessenen Trends und die regionalen Unterschiede gut abbilden. In allen Regionen gab es in der Vergangenheit einen Trend zu verstärkter Trockenheit. Die Region Genf/Waadt sowie das westliche Mittelland und die Nordschweiz wiesen dabei die deutlichsten Veränderungen auf. Projektionen in die Zukunft mit dem CLM-Modell, das schweizweit den historischen Trend 1981–2010 am besten wiedergibt, zeigen für die Mitte des Jahrhunderts zunehmende Trockenheit und allgemein eine steigende Variabilität des Klimageschehens.

Keywords: drought indicators, historic data, climate change, climate model, forestry
doi: 10.3188/szf.2015.0352

* Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, E-Mail jan.remund@meteotest.ch

Aktuelle Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert prognostizieren für die Schweiz steigende Temperaturen und häufigere Witterungsextreme. Trockenheitsrisiken werden daher im Schweizer Wald vermehrt eine Rolle spielen. Die Waldpolitik 2020 des Bundesrats (BAFU 2013) hat unter anderem zum Ziel, die möglichen negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Leistungen des Waldes gering zu halten. Um zielgerichtete Massnahmen empfehlen zu können, müssen daher die Art und das Ausmass der potenziellen Gefährdung für die Wälder abgeklärt werden. Es besteht deshalb Bedarf an Indikatoren, die die Trockenheit zu quantifizieren vermögen und so eine Einschätzung der künftigen Baumarteneignung erlauben. Weiter müssen das flächenhafte Ausmass und die Intensität der zu erwartenden klimatischen Veränderung geschätzt werden. Darauf aufbauend können dann dem Standort entsprechende waldbauliche Empfehlungen abgegeben werden.

Ziel der hier vorgestellten Studie war die Berechnung von Indikatoren zur Schätzung der heutigen und der künftigen Gefährdung der Schweizer Wälder durch Trockenheit. Die Indikatoren sollen einen klaren Ursache-Wirkungs-Bezug hinsichtlich Trockenheit haben und flächig darstellbar sein. Das ist bei Indikatoren, die einen Bezug zum Wasserhaushalt von Bäumen oder Beständen haben, wie der Standortwasserbilanz (Site Water Balance, SWB) oder dem Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration (ETa/ETp), gegeben. Die SWB wird in der forstlichen Standortkunde zur Charakterisierung des Wasserhaushalts verwendet. Sie entspricht der um den Bodenspeicher ergänzten klimatischen Wasserbilanz. Das ETa/ETp-Verhältnis (oft auch als Evapotranspirationsverhältnis bezeichnet) zeigt an, ob ein Baum aufgrund von Wassermangel die Verdunstung und damit die Fotosynthese einschränken muss. Beide Indikatoren haben einen Bezug zu integrativen Vitalitätsparametern wie der Wuchsleistung

von Beständen. Für die Risikoabschätzung hinsichtlich Trockenheit ist der Zeitraum wichtig, für den ein Indikator berechnet wird. Jährliche Mittelwerte sind für waldbauliche Fragestellungen wenig aussagefähig, weshalb die Berechnung für die Vegetationszeit erfolgen sollte.

Im Folgenden werden der aktuelle Zustand, die historische Entwicklung und die künftigen Trends der Trockenheit in den bioklimatischen Regionen der Schweiz mithilfe der zwei Indikatoren SWB und ETa/ETp dargestellt und diskutiert. Eine eingehende Prüfung verschiedener SWB- und ETa/ETp -Indizes bezüglich ihrer Eignung als Effektparameter für Trockenheitseinflüsse ist Gegenstand von Braun et al (2015, dieses Heft).

Material und Methoden

Trockenheitsindikatoren

Im Projekt «Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern» (Remund et al 2011) wurden 46 unterschiedliche Trockenheitsindizes und Varianten ihrer Berechnung getestet. So wurden verschiedene Evapotranspirationsmodelle verwendet sowie die zeitliche Auflösung, einzelne statistische Parameter und die Durchwurzelungstiefe variiert. Das Ziel der Untersuchung war es, Trockenheit für die Schweiz flächenhaft zu berechnen sowie diejenigen Indizes auszuwählen, die die Unterschiede der Vegetationseinheiten nach der Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS; Frehner et al 2005/2009) bezüglich der Feuchte-Einstufung im Ökogramm am besten wiedergeben. Die zwei nachfolgend aufgeführten Indizes – für 1 m Bodentiefe berechnet – erwiesen sich hierfür als zweckmässig. Ihre Eignung für walddökologische Fragestellungen ist in vergleichbaren Untersuchungen belegt (Spellmann et al 2007, Wagner et al 2013, Fiebiger et al 2013):

1. SWB während der Vegetationszeit (April bis August)

Die SWB während der Vegetationszeit entspricht der SWB gemäss Grier & Running (1977), also der Differenz der SWB-Werte von Ende August und Ende April ($SWB_{\text{August}} - SWB_{\text{April}}$). Sie errechnet sich aus Formel 1)

$$SWB = KWB + nFK; KWB = P - ETp \quad 1)$$

KWB: Klimatische Wasserbilanz

nFK: nutzbare Feldkapazität (Wassermenge, die im Boden maximal gegen die Schwerkraft pflanzenverfügbar gehalten werden kann)

P: Niederschlag

ETp: potenzielle Evapotranspiration (Wassermenge, die von einem Pflanzenbestand bei ausreichender

Wasserversorgung an die Atmosphäre abgegeben wird), berechnet auf Monatsbasis nach der Formel nach Romanenko (1961)

Bei der Berechnung der SWB erfolgte die Rücksetzung des Bodenwasserspeichers im Herbst auf «volle Sättigung».¹ Ohne diese Rücksetzung würden sich negative Werte addieren und die SWB in trockenen Gebieten nach einigen Jahren stark negativ werden. Diese Rücksetzung der SWB war nur für wenige Standorte erforderlich, da meistens der winterliche Niederschlag zur Auffüllung des Bodenwasserspeichers ausreichte. Spellmann et al (2007) verwenden die SWB während der Vegetationszeit zur Beurteilung des Anbaurisikos für Fichten: Beträgt diese weniger als –200 bis –250 mm, besteht laut diesen Autoren ein mittleres, und bei einer solchen von weniger als –250 mm ein hohes Anbaurisiko für diese Baumart. Dieser Bewertungsrahmen ist der einzige bekannte für diesen Indikator, und die Anwendung erfolgt hier – in aller Vorsicht – zur Einschätzung der Relationen und Trends in der Zukunft.

2. ETa/ETp -Verhältnis während der Vegetationszeit (April bis August)

Die aktuelle Evapotranspiration (ETa) wird begrenzt durch das Wasserangebot im Boden, wobei die trockenheitsbedingte Evapotranspirationsreduktion bei etwa 60% der nFK beginnt (u.a. Beck 2001, Müller 2002).

Unterhalb eines ETa/ETp -Verhältnisses von 0.80 in der Vegetationszeit ist mit Beeinträchtigungen durch Trockenheit zu rechnen. Bei diesem Wert sind die Spaltöffnungen im Durchschnitt während 20% des Tages geschlossen, wodurch der Gasaustausch und damit die Fotosynthese eingeschränkt werden. Weiter besteht ein Zusammenhang zwischen der Wasserfüllung des Bodenspeichers (nFK in %) und dem ETa/ETp -Verhältnis: So ist bei einem solchen von circa 0.80 der Bodenspeicher zu circa 60% gefüllt; bei zunehmender Trockenheit ist dann die Abnahme des ETa/ETp -Verhältnisses umso grösser, je höher die ETp ist (DVWK 1996). Dies ist an strahlungsreichen Tagen mit Verdunstungsraten von mehr als 3 bis 4 mm der Fall. Der Schwellenwert von circa 0.80 wird zur Einschätzung von Trockenheitsrisiken daher häufig verwendet (Fuhrer & Jasper 2009, Wagner et al 2015, Braun et al 2015).

Die ETa wird massgeblich durch die Blattfläche der Bäume bestimmt. Als Mass für die Blattfläche wurde ein Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI) verwendet, der auf einer Untersuchung von Schleggi et al (2011) beruht. Dabei werden die Meereshöhe und die Baumart berücksichtigt. Der Verlauf

¹ Programmcode zur Berechnung der SWB (swb.aml).
http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml6_1.html (18.12.2014)

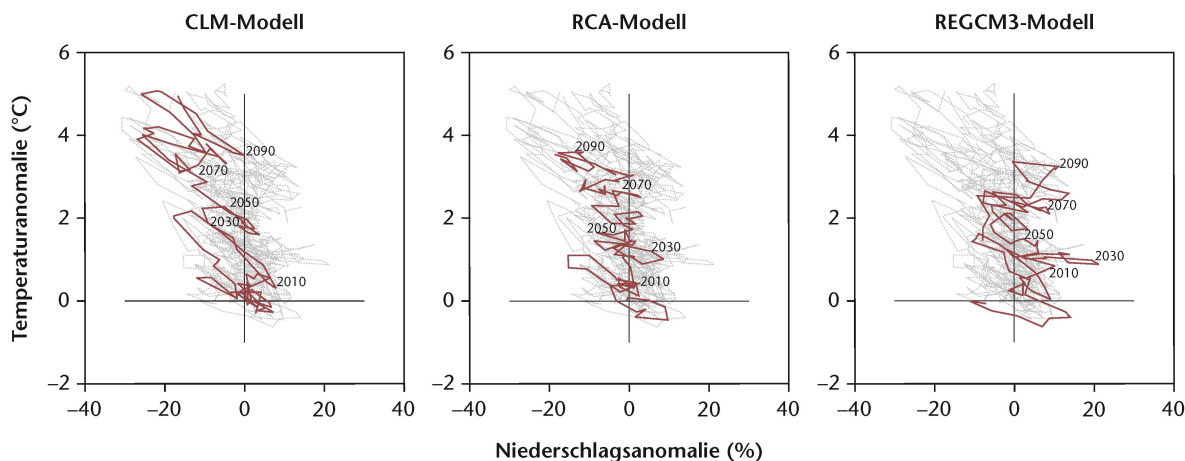


Abb 1 Anomalien der Temperatur und des Niederschlags auf der Alpennordseite. Die durchgezogenen Linien zeigen die Abweichungen zwischen 2010 und 2090 des CLM- (links), des RCA- (Mitte) und des REGCM3-Modells (rechts) von den heutigen Niederschlags- und Temperaturverhältnissen. Punktwolke: Anomalien aller elf untersuchten Modelle.

des LAI während des Jahres wurde nach Hammel & Kennel (2001) modelliert (Temperatursummenmethode). Der relative LAI für Tannen- und Fichtenwälder bewegt sich zwischen 80% (Winter) und 100% (Sommer), für Laubwälder zwischen 5% (Winter) und 100% (Sommer). Der Übergang zwischen Sommer und Winter wurde geglättet (21 Tage Glättungslänge). Für die Definition der Waldfläche und des Waldmischungsgrads wurden die Angaben des Bundesamts für Statistik (BFS 2004) genutzt.

Klimadaten und verwendete Modelle

Die historischen Daten basieren auf dem CRU-Gitterdatensatz der Universität East Anglia (CRU = Climate Research Unit; Mitchell et al 2004) sowie räumlich interpolierten Stationswerten von 1931 bis 2013 von MeteoSchweiz. Die Stationswerte wurden mittels «inverse distance»-Methode inklusive Lage- und Höhenkorrektur auf die Untersuchungsstandorte interpoliert (Remund et al 2011). Die Beschattung der lokalen Topografie wird bei der Interpolation der Globalstrahlung berücksichtigt. Die Interpolationsmethode wurde für Waldgebiete optimiert. Die Anzahl der Messstationen von MeteoSchweiz stieg von rund 20 im Jahr 1931 bis auf 120 im Jahr 2010 (die Globalstrahlung ist zudem erst ab 1981 verfügbar). Damit steigt auch die Qualität der Interpolation im Laufe der Zeit an. Der CRU-Datensatz weist insbesondere für die Globalstrahlung grössere Unsicherheiten auf als derjenige, der auf den Stationswerten von MeteoSchweiz beruht.

Die Grundlage für die Auswahl der Klimaszenarien bildeten die zehn regionalen Klimamodelle, die im EU-Projekt «ensembles» erstellt wurden (Hewitt & Griggs 2004). Damit wurde die gleiche Datenbasis verwendet wie von C2SM (2011). Zusätzlich wurde das CLM-Modell (Keuler et al 2009) ausgewählt. Alle elf Modelle stellen eine Kombination von globalen und regionalen Klimamodellen dar und ba-

sieren auf dem Emissionsszenario A1B des Weltklimarates. Dieses Szenario entspricht ungefähr dem neueren Szenario RCP6.0 (Meinshausen et al 2011) und lässt für die Schweiz eine weitere Temperaturzunahme von 2.7 bis 4.1 °C erwarten. Die räumliche Auflösung beträgt bei allen Modellen 25 km × 25 km.

Die Verwendung von elf Klimamodellen im Forschungsprogramm war nicht praktikabel, weshalb drei repräsentative Modelle ausgewählt wurden. Ein Modell soll dabei kleine, eines mittlere und eines hohe Abweichungen (sog. Anomalien) zwischen zukünftigem und heutigem Zustand aufweisen, welche ungefähr den P20-, P50- und P80-Perzentilen entsprechen. Die Modellwahl wurde anhand von zwei Regionen in der Schweiz vorgenommen (Alpennordseite [Abbildung 1] und Alpensüdseite). Die nachfolgenden drei Modelle wurden ausgewählt, wobei alle auf dem globalen Modell ECHAM5 basieren:

- trocken: CLM (Quelle: Max Planck Institut)
- mittel: RCA (Quelle: Swedish Meteorological and Hydrological Institute)
- feucht: REGCM3 (Quelle: International Centre for Theoretical Physics)

Die drei Modelle (sowie auch die CRU-Daten) wurden in der Folge mit der «change factor»-Methode (Tabor & Williams 2010) auf eine Auflösung von 250 m × 250 m hochgerechnet. Diese Methode hat den Vorteil, dass der bei Klimamodellen auftretende Bias korrigiert wird, dabei aber die Variabilität erhalten bleibt, was für die Analyse von Trockenheit notwendig ist.

Berechnung der nutzbaren Feldkapazität

Für die Berechnung der Trockenheitsindikatoren ist die Kenntnis der nutzbaren Feldkapazität (nFK) erforderlich. Für Schweizer Waldböden gab es hierfür bislang keine geeignete Karte. Daher musste die nFK für den Wurzelraum von Waldböden neu geschätzt werden. Als Basis für die nFK-Schätzung

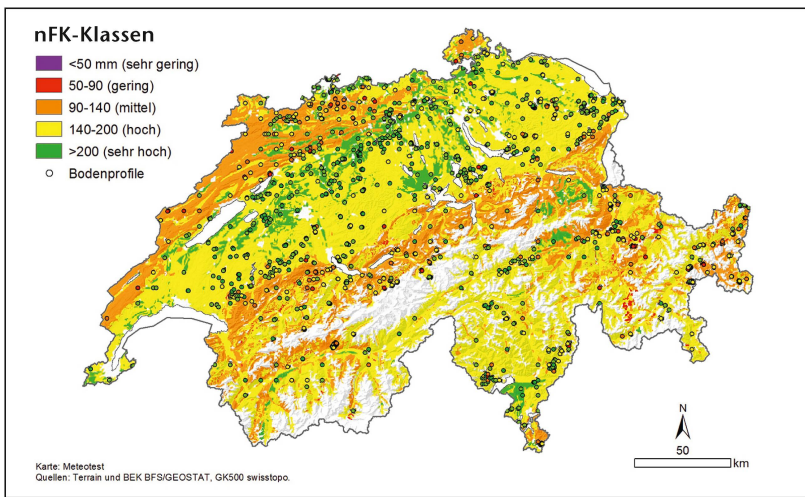


Abb 2 Geschätzte nutzbare Feldkapazität für Waldböden der Schweiz (max. 1 m Wurzeltiefe). Die nFK-Klassen entsprechen der Einteilung von Eckelmann (2005). Die Flächen sind das Ergebnis der Berechnungen, die Punkte zeigen die Standorte der 1234 Bodenprofile von WSL und Interkantonaler Walddauerbeobachtung, auf welchen die nFK-Abschätzung basiert.

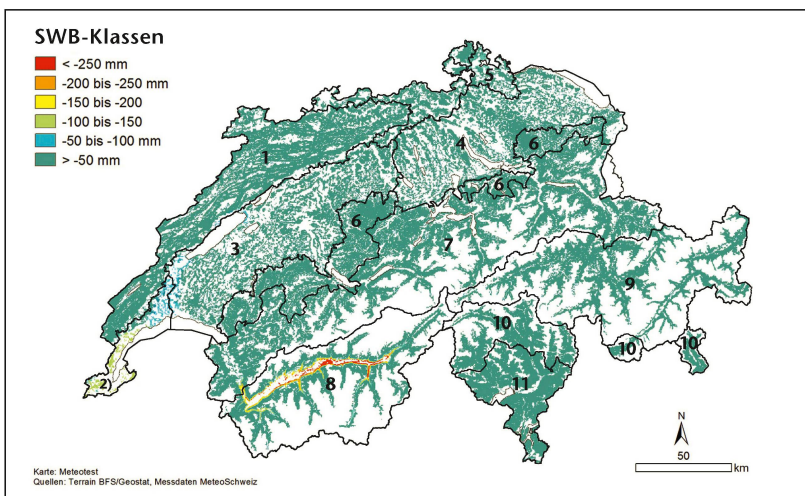


Abb 3 Standortwasserbilanz $SWB_{\text{August}} - SWB_{\text{April}}$, Mittelwert 1981–2010. Die Klassen entsprechen der Einteilung von Spellmann et al (2007) für das Anbaurisiko von Fichte (<-250 mm: hohes Risiko, -200 bis -250 mm: mittleres Risiko, >-100 mm: geringes Risiko). Einteilung der Regionen nach Gonseth et al (2011): 1) Jura, 2) Genf/Waadt, 3) westliches Mittelland, 4) östliches Mittelland, 5) Nordschweiz, 6) Alpenvorland, 7) Alpennordhang, 8) Wallis, 9) Nord-/Mittelbünden, 10) Nordtessin, 11) Südtessin.

dienten die Lithologie-Karte der Schweiz (Atlas der Schweiz)² und die nFK-Messwerte von 1234 Bodenprofilen von Eidgenössischer Forschungsanstalt WSL (Walthert et al 2004) und Interkantonaler Walddauerbeobachtung (Braun & Flückiger 2013). Die 55 Lithologie-Einheiten der geologischen Karte wurden in neun Klassen ähnlicher Verwitterungscharakteristik zusammengefasst, da die Bodentextur eine der wichtigsten Einflussgrößen der nFK ist (Renger et al 2008). Pro Klasse wurde der Median der zugehörigen Profilmesswerte gebildet. Zudem wurde die Hangneigung (in drei Klassen) als weitere erklärende Variable berücksichtigt. Da der Steinanteil der WSL-Profilen nicht bekannt war, konnte er nicht berücksichtigt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei diesem Vorgehen, d.h. der Gruppierung sehr

vieler Bodenprofile zu Klassen ähnlicher Lithologie, auch der Steingehalt innerhalb der Gruppen ähnlich ist. Es wurde die nFK für eine Tiefe von maximal 1 m geschätzt, bei sehr flachgründigen Böden war die Tiefe geringer (z.B. Rendzinen im Jura).

Abbildung 2 zeigt die resultierende nFK-Karte. Die Daten wurden mit unabhängigen Daten von 52 Waldstandorten im Kanton Solothurn plausibilisiert. Dazu wurden nFK-Werte von Profilen der Solothurner Waldbodenkartierung mit den hier ermittelten Werten verglichen. Der Absolutwert der Differenz der Werte betrug im Mittel 22 mm, wobei die Abweichung bei Profilen mit geringer nFK am geringsten war. Das bedeutet, dass mit dem Lithologie-Ansatz die nFK-Klassen gemäss Bodenkundlicher Kartieranleitung (Eckelmann 2005) sehr gut getroffen werden. Insbesondere ist diese Schätzgüte für eine generelle Einschätzung der nFK und der regionalen Trockenheitsrisiken auf kleiner Massstabs-ebene ausreichend.

Resultate

Karten der Trockenheitsindikatoren SWB und ETa/ETp

Die Standortwasserbilanz $SWB_{\text{August}} - SWB_{\text{April}}$ wurde für die Schweiz berechnet und dargestellt. Es zeigte sich, dass dieser Indikator in der Periode 1981–2010 keine grosse räumliche Differenzierung erlaubt (Abbildung 3). Projektionen in die Zukunft (2045–2074)³ mit dem CLM-Modell zeigen dagegen deutliche regionale Unterschiede (Abbildung 4, links). So nimmt die Wasserverfügbarkeit gebietsweise deutlich ab und fällt in den Regionen Genf/Waadt, westliches Mittelland, Nordschweiz und Tessin zum Teil gar unter den Grenzwert von -250 mm, unterhalb dessen Spellmann et al (2007) das Anbaurisiko für Fichte als hoch betrachten, da künftig in der Vegetationszeit nicht genügend Wasser zur Verfügung steht. Am Alpennordhang sind dagegen vorderhand keine grossen, d.h. für die Wälder negativen Änderungen bezüglich der Trockenheit zu erwarten. Hier liegen die Gebiete, in denen der Klimawandel aufgrund höherer Temperaturen, sofern ausreichend Niederschlag vorhanden ist, zu verstärktem Wachstum führen kann. So zeigten Auswertungen des Jahres 2003, dass ab circa 1200 m Höhe das Wachstum von Fichten über dem langjährigen Durchschnitt lag (Dobbertin 2005), während es in Tieflagen deutlich geringer war. Wird der Modellierung das feuchtere RCA-Modell zugrunde gelegt (Abbildung 4, rechts), würden sich die Verhältnisse in der Vegetationszeit bis Mitte des 21. Jahrhunderts

² www.atlasderschweiz.ch (17.8.2015)

³ Es wurde der Zeitrahmen 2045–2074 gewählt, da die Projektionen bis Mitte des Jahrhunderts relativ verlässlich sind.

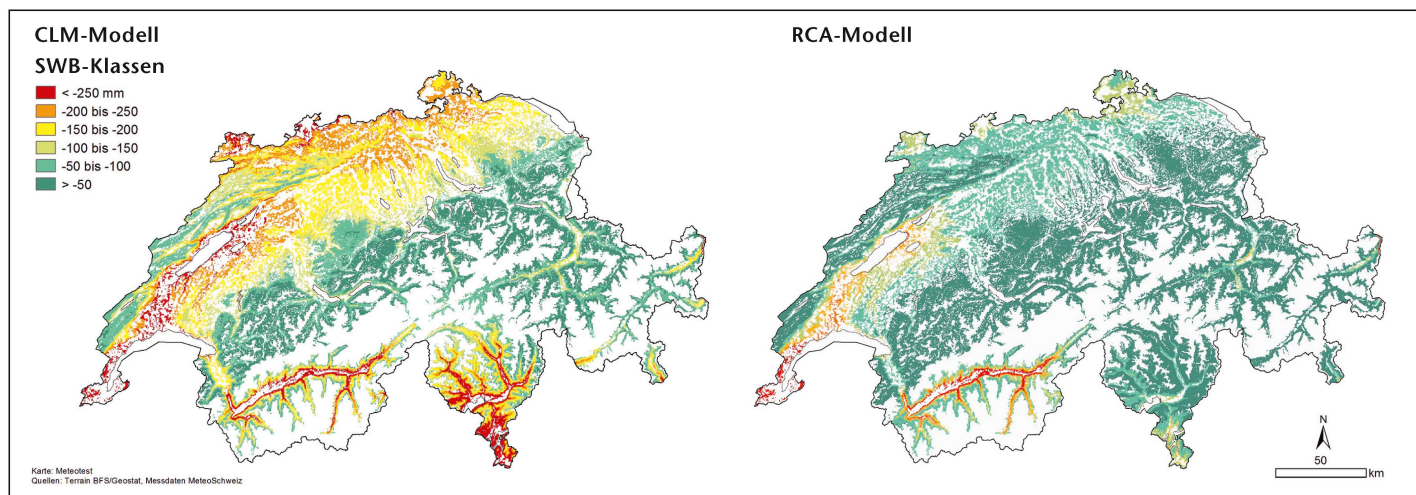


Abb 4 Standortwasserbilanz $SWB_{August}-SWB_{April}$, modelliert mit dem CLM-Modell (links) und mit dem RCA-Modell (rechts) für die Periode 2045–2074. Die Klassen entsprechen der Einteilung von Spellmann et al (2007) für das Anbaurisiko von Fichte (<–250 mm: hohes Risiko, –200 bis –250 mm: mittleres Risiko, >–100 mm: geringes Risiko).

nur in der Westschweiz (Genf, Waadt) und im Wallis deutlich verschlechtern.

Das ETa/ETp -Verhältnis während der Vegetationszeit ermöglicht eine gute Einschätzung der heutigen regionalen Unterschiede im Trockenheitsgeschehen. So treten in Abbildung 5 die heute trockenen respektive trockeneren Gebiete deutlich hervor (Walliser Haupttal, Genfer und Neuenburger Seegebiet sowie Raum Basel und Schaffhausen). In Bezug auf die künftige Entwicklung der Trockenheit zeigt das ETa/ETp -Verhältnis einen ähnlichen Trend wie die SWB. So dürften unter Annahme des trockeneren CLM-Szenarios in der Periode 2045–2074 deutlich mehr Wälder von trockenheitsbedingten Beeinträchtigungen betroffen sein (Abbildung 6, links; Flächen mit $ETa/ETp \leq 0.80$ während der Vegetationszeit), unter Annahme des RCA-Szenarios (Abbildung 6, rechts) dürfte die Situation hingegen in etwa so bleiben, wie sie in der Periode 1981–2010 war (Abbildung 5).

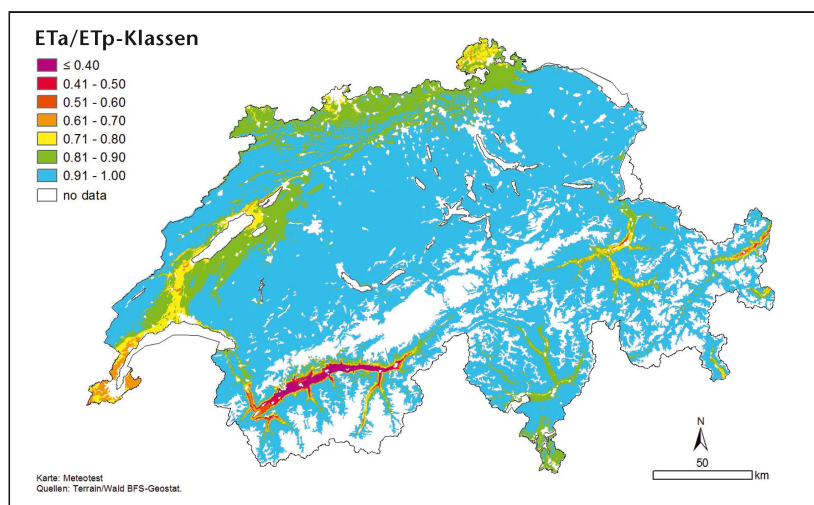


Abb 5 Durchschnittliche ETa/ETp -Verhältnisse während der Vegetationszeit in der Periode 1981–2010. Sinkt das ETa/ETp -Verhältnis während der Vegetationszeit unter 0.80, ist mit trockenheitsbedingten Beeinträchtigungen zu rechnen (Fuhrer & Jasper 2009).

Trends im ETa/ETp -Verhältnis

Für die Analyse der Entwicklung der ETa/ETp -Verhältnisse während der Vegetationszeit wurden die elf bioklimatischen Regionen der Schweiz nach Gonseth et al (2001) verwendet und die regionalen Mittel berechnet. Die Untersuchung wurde für drei Zeitperioden durchgeführt:

- die Periode 1981–2010, um die bisherige Entwicklung zu analysieren und insbesondere um die mit den Klimamodellen und die mit den Messwerten berechneten ETa/ETp -Werte miteinander zu vergleichen und so die Plausibilität der Modellresultate abschätzen zu können,
- die Periode 1951–2012 für die Berechnung der historischen Trends,
- die Periode 1981–2099, um die zukünftigen Trends abzuschätzen.

In fast allen Regionen hat das ETa/ETp -Verhältnis in der Periode 1981–2010 abgenommen, d.h., es ist fast überall trockener geworden (Abbildung 7). Die grössten gemessenen Veränderungen sind in der Region Genf/Waadt, im westlichen Mittelland, in der Nordschweiz und im Südtessin feststellbar.

Das CLM-Modell trifft den historischen Trend im Mittel am besten. Allerdings unterschätzen alle Modelle den Trend im Westen (Regionen Genf/Waadt und westliches Mittelland) und in der Nordschweiz, d.h., die gemessenen Trends sind hier stärker negativ als die modellierten (Abbildung 7). Im Süden sind die Unterschiede zwischen den Modellen relativ gross: So überschätzt das CLM-Modell im Nordtessin den gemessenen Trend, während es im Südtessin eine gute Übereinstimmung zeigt. Im Nordtessin und im Wallis liefert das RCA-Modell die zutreffendsten Ergebnisse. Das REGCM3-Modell führt in allen Regionen der Schweiz zu einer deutlich geringeren Abnahme des ETa/ETp -Verhältnisses als die Messwerte und wurde entsprechend für die weiteren Analysen nicht mehr verwendet.

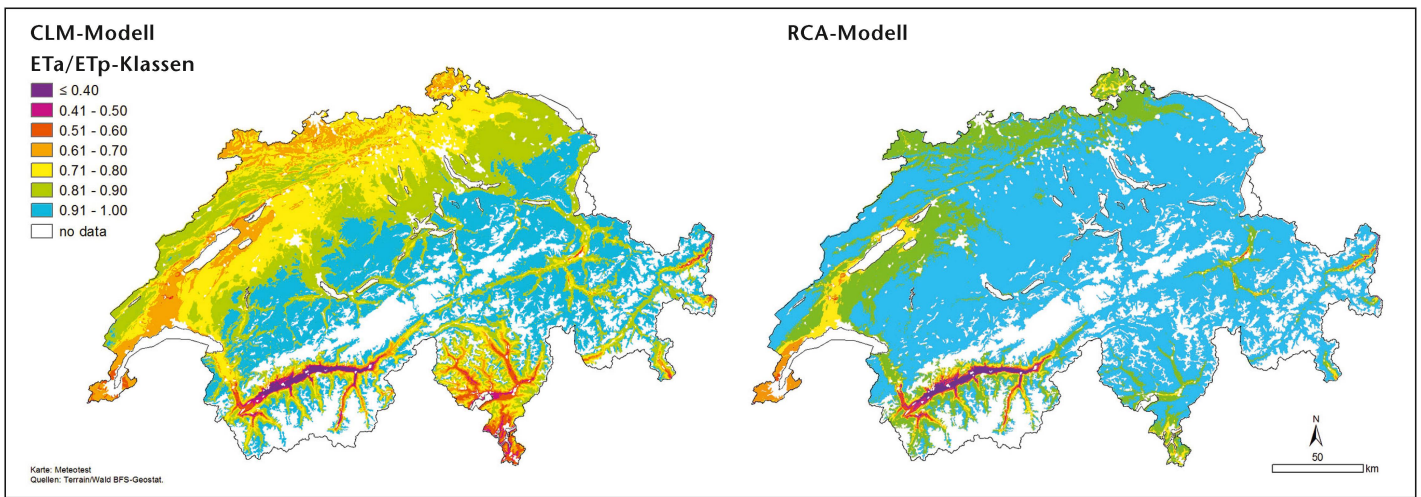


Abb 6 Durchschnittliche ETa/ETp-Verhältnisse während der Vegetationszeit, modelliert mit dem CLM-Modell (links) und mit dem RCA-Modell (rechts) für die Periode 2045–2074. Sinkt das ETa/ETp-Verhältnis während der Vegetationszeit unter 0.80, ist mit trockenheitsbedingten Beeinträchtigungen zu rechnen (Fuhrer & Jasper 2009).

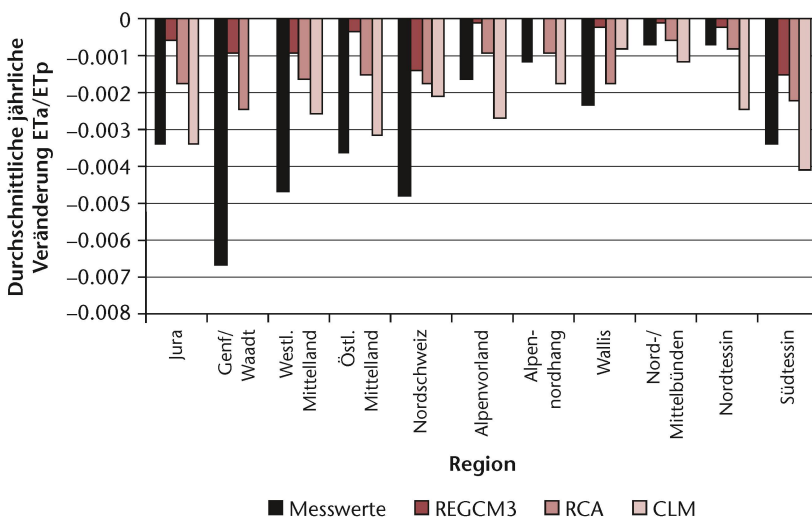


Abb 7 Durchschnittliche jährliche Veränderung der ETa/ETp-Verhältnisse während der Vegetationszeit in der Periode 1981–2010 für die elf bioklimatischen Regionen der Schweiz nach Gonseth et al (2001), ermittelt auf Basis von gemessenen Werten sowie von mit den drei Klimamodellen REGCM3, RCA und CLM modellierten Werten.

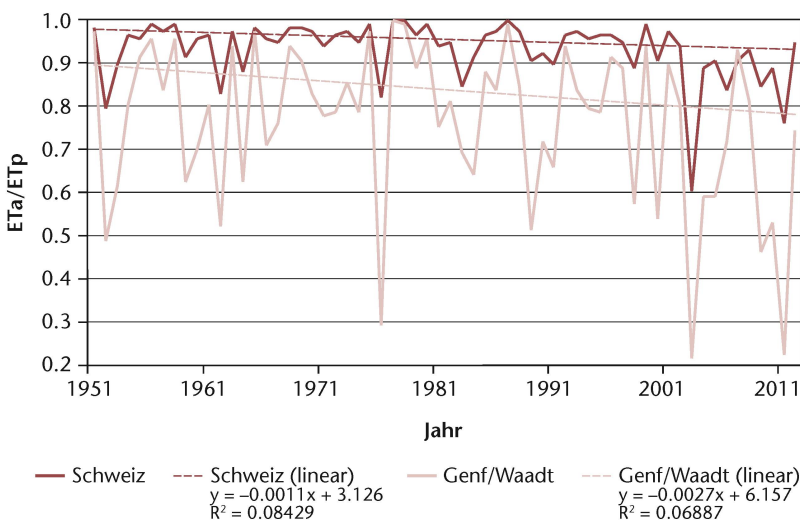


Abb 8 Entwicklung des ETa/ETp-Verhältnisses von 1951 bis 2012 in der Schweiz sowie in der Region Genf/Waadt, berechnet auf der Basis von Messwerten. Beide Trends sind signifikant (Schweiz: p-value = 0.022, Genf/Waadt: p-value = 0.039).

Im Durchschnitt über die Schweiz (Abbildung 8) und in sieben der elf bioklimatischen Regionen hat die Trockenheit in den letzten 60 Jahren statistisch signifikant zugenommen (Signifikanzniveau 5%). Lediglich im Jura, im westlichen Mittelland, im Alpenvorland und am Alpennordhang war der Trend nicht signifikant. Gesamthaft gesehen handelt es sich bei Genf/Waadt um diejenige Region, in welcher das ETa/ETp-Verhältnis im Durchschnitt am tiefsten ist und in den letzten Jahrzehnten am stärksten abgenommen hat (Abbildungen 5 und 8).

Das ETa/ETp-Verhältnis während der Vegetationsperiode dürfte in Zukunft weiter abnehmen. Dies zeigen die auf Basis des CLM- und des RCA-Modells ermittelten Werte für die Periode 1981–2009 (Abbildung 9). Daneben dürfte sich die Variabilität verstärken. So nimmt die Standardabweichung der jährlichen Werte beim CLM-Modell zwischen den Dekaden 1981–1990 und 2090–2099 um das 2.5-Fache zu.

Diskussion

Das Ziel der Studie war die Berechnung und räumliche Darstellung von Indikatoren, mit welchen sich die heutigen und künftigen Trockenheitsrisiken für die Schweizer Wälder abschätzen lassen. Für eine solche flächenhafte Abschätzung muss die Komplexität der Berechnung den zur Verfügung stehenden Daten sowie der räumlichen und der zeitlichen Ebene entsprechen (Janssen & Heuberger 1995). Der hier gewählte Ansatz der vereinfachten Beschreibung von Boden und Vegetation entspricht diesen Anforderungen und ist mit anderen forsthydrologischen Studien vergleichbar (Spellmann et al 2007, 2011).

Die Schätzung des Wasserspeichervermögens auf der Grundlage der Lithologie-Karte und von an Bodenprofilen ermittelten Daten ist neu. Dieser

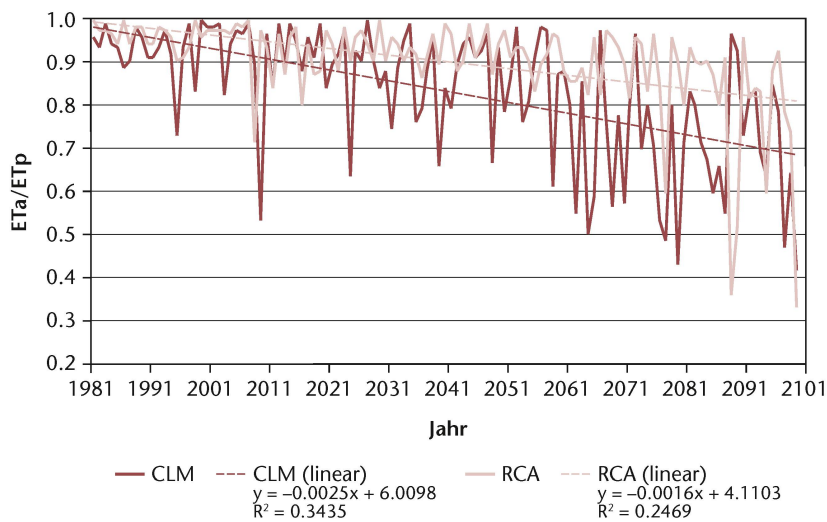


Abb 9 Trends im ETa/ETp -Verhältnis während der Vegetationszeit für die Periode 1981–2099 für die ganze Schweiz basierend auf dem CLM- und dem RCA-Modell (A1B-Szenario). Beide Trends sind signifikant (p -value beider Trends = 0.000).

Schritt war erforderlich, da die nFK eine wichtige Hilfsgrösse für die Berechnung der Indikatoren SWB und ETa/ETp ist. Die Unsicherheiten der Schätzung auf dieser Skalenebene werden als gering eingestuft, da die Validierung mit unabhängigen Daten eine ausreichende Übereinstimmung zeigte und gerade bei Böden mit geringer nFK die Unterschiede gering sind. So würde ein Schätzfehler von 20% in der Klasse «gering» (nFK 50–90 mm) die Transpirationseinschränkung um 2–3 Tage verändern (bei 3–4 mm Verdunstung pro Sommertag). Angesichts der natürlichen Variabilität von Waldböden und der hier betrachteten räumlichen und zeitlichen Skalenebene ist diese Ungenauigkeit zu vernachlässigen.

Die Wahl der Trockenheitsindikatoren «SWB» und « ETa/ETp » ist der Zielformulierung angemessen, diese Indikatoren werden auch für vergleichbare walddydrologische Fragestellungen verwendet (Spellmann et al 2011, Wagner et al 2013). Sie haben den Vorteil, dass sie eine ökologisch begründete Schätzung des Ausmasses der Trockenheit erlauben, da sie einen Ursache-Wirkungs-Bezug zum Waldwachstum aufweisen. Bei Auswertungen von Schweizer Walddauerbeobachtungsdaten erwies sich die $SWB_{August} - SWB_{April}$ als signifikant mit dem Grundflächenzuwachs von Fichten und Buchen korreliert (Braun et al 2015, dieses Heft). Gerade dieser Indikator wird deshalb zur Schätzung des Trockenheitsrisikos verwendet (Spellmann et al 2007, 2011). Weil aber noch Unsicherheiten bestehen, wurden für die Bewertung nur bei drei Klassen Einschätzungen zum Anbaurisiko für die Fichte abgegeben (vgl. Abbildungen 3 und 4). Die anderen Abstufungen dienen der Visualisierung der Relationen. Wagner et al (2015) fanden, dass die klimatische Wasserbilanz (KWB), das ETa/ETp -Verhältnis und die Bodenwasserverfügbarkeit (nFK) sich als besonders sensitive klimatisch-hydrologische Indikatoren für Trockenstress bei Buchen

eignen. Sie stellten eine Unterbrechung des Durchmesserzuwachses von Buchen fest, wenn der Anteil des pflanzenverfügbaren Wassers unter 40% oder das ETa/ETp -Verhältnis unter einen Schwellenwert von 0.60 sank. Auswertungen von Schweizer Waldmonitoringdaten zeigen, dass für das Wachstum der Anteil extrem trockener Tage im Jahr (gemessen am ETa/ETp -Verhältnis) und die $SWB_{August} - SWB_{April}$ entscheidend sind (Braun et al 2015, dieses Heft). Diese Befunde bestätigen den hier gewählten Ansatz der Beschreibung und Bewertung der Trockenheit.

Für die räumliche Analyse und die zeitlichen Trends der Vergangenheit (Messwerte 1981–2011) ist das ETa/ETp -Verhältnis während der Vegetationszeit ein guter Trockenheitsindikator. Die hier präsentierten, auf Messwerten beruhenden ETa/ETp -Verhältnisse sind vergleichbar mit denen, die für die Regionen Thur, Rhone und Tessin (Nordost) (Calanca et al 2006) und für die Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung (Braun & Flückiger 2013) berechnet wurden. Die abnehmenden Trends stimmen überein mit der von Spreafico & Weingartner (2005) berichteten zunehmenden Verdunstung.

Bezüglich der Klimamodelle zeigt sich, dass das CLM-Modell die historische Periode 1981–2010 am besten abbildet, wobei auch dieses «trockenste» Modell die in diesem Zeitraum gemessene Zunahme der Trockenheit im Westen unterschätzt. Die regionalen Unterschiede zwischen den Klimamodellen sind allerdings gross, und die Ergebnisse sollten vorsichtig interpretiert werden. Insbesondere sind die Prognoseergebnisse für die Alpensüdseite noch mit grösseren Unsicherheiten behaftet.

In den meisten Schweizer Regionen dürfte neben der Trockenheit auch die Klimavariabilität zunehmen, d.h. die Schwankungen von Jahr zu Jahr wie auch die Amplituden innerhalb eines Jahres. Diese Variabilität ist ein zusätzlicher, wichtiger Einflussfaktor für das Baumwachstum, wie Fleck et al (2010) durch die Auswertung des Wachstums von Fichten und Buchen zwischen 1960 und 2009 zeigen konnten: Jahre mit dem grössten Zuwachsrückgang waren geprägt von extremen und sprunghaften Veränderungen des Bodenwassergehalts. Die Speicherwirkung des Bodens sollte daher in der Klimawandel-Forschung mehr berücksichtigt werden.

Schlussfolgerungen und Praxisrelevanz

Die Karten der Trockenheitsindikatoren $SWB_{August} - SWB_{April}$ und ETa/ETp während der Vegetationszeit weisen die Regionen mit künftig wahrscheinlich erhöhten Risiken für Trockenheit aus. Zeigen verschiedene Indikatoren ähnliche gefährdete Regionen an und stimmen diese mit den heute schon eher trockenen Regionen überein, die zudem in den vergangenen Jahren eine Entwicklung in Richtung

zunehmende Trockenheit verzeichneten, so liegt der Schluss nahe, dass die Risikoabschätzung plausibel ist. Das CLM-Modell reproduzierte die historische Entwicklung (1981–2010) schweizweit besser als die anderen getesteten Modelle (alle auf der Basis des A1B-Szenarios). Die Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung ist jedoch gross, gerade die Niederschlagsverteilung betreffend, weshalb immer mehrere Realisierungen eines Klimaszenarios zusammen betrachtet werden sollten.

Es sei an dieser Stelle betont, dass alle in diesem Artikel gezeigten Karten nur der Darstellung und ersten flächenhaften Einschätzung von Risiken dienen («Hinweiskarten»). Für weiter gehende Aussagen für bestimmte Waldstandorte sind sie nicht geeignet. Hierfür müssten auf kleinerer Massstabsebene detailliertere Karten erstellt werden, oder es müssten standortgenau eigene Schätzungen durchgeführt werden.

Aufgrund der hier dargestellten Trends ist davon auszugehen, dass in Zukunft ein weit grösserer Anteil der Schweizer Wälder von Trockenheit betroffen sein wird als bislang. Die Veränderungen dürften dabei insbesondere in der Region Genf/Waadt, im westlichen Mittelland sowie in der Nordschweiz ausgeprägt sein, Regionen also, in denen sich der Faktor Trockenheit bereits in den letzten Jahrzehnten verstärkt hat. Am Alpennordhang hingegen sind vorderhand keine grossen, d.h. für die Wälder negativen Änderungen bezüglich der Trockenheit zu erwarten. Hier liegen die Gebiete, in denen der Klimawandel aufgrund höherer Temperaturen, sofern ausreichend Niederschlag vorhanden ist, zu verstärktem Wachstum führen kann.

Eingereicht: 5. Februar 2015, akzeptiert (mit Review): 7. Oktober 2015

Dank

Das Projekt «Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern» wurde im Rahmen des BAFU/WSL-Forschungsprogramms «Wald und Klimawandel» erarbeitet und von diesem finanziert. Wir bedanken uns bei Gaby von Rohr, Amt für Umwelt, Solothurn, für die Zurverfügungstellung der Bodenprofilaten und bei Dr. Joachim Block, Landesforsten Rheinland-Pfalz, für die Beratung hinsichtlich der nFK-Schätzung.

Literatur

- BAFU (2013)** Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt. 68 p.
- BECK W (2001)** Waldwachstum unter anhaltendem Fremdstoffeintrag – Ergebnisse aus waldwachstumskundlichen und den- droökologischen Untersuchungen. Beitr Forstwirtsch Landsch. ökol 35: 181–190.

- BFS (2004)** Waldmischungsgrad der Schweiz. Datensatz mit Auflösung 100 m (WMG100). Neuenburg: Bundesamt Statistik, Sektion Geoinformation. www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/dienstleistungen/geostat/datenbeschreibung/waldmischungsgrad.html (28.9.2015)
- BRAUN S, FLÜCKIGER W (2013)** Wie geht es unserem Wald? 29 Jahre Walddauerbeobachtung. Ergebnisse von 1984 bis 2012. Schön- enbuch: Institut Angewandte Pflanzenbiologie. 127 p.
- BRAUN S, REMUND J, RIHM B (2015)** Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern. Schweiz Z Forstwes 166: 361–371. doi: 10.3188/szf.2015.0361
- CALANCA P, ROESCH A, JASPER K, WILD M (2006)** Global warming and the summertime evapotranspiration regime of the Alpine region. Clim Chang 79: 65–78.
- C2SM (2011)** Swiss climate change scenarios CH2011. Zurich: Eidg Techn Hochschule, Center for climate systems modeling. 88 p.
- DOBBERTIN M (2005)** Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. Eur J For Res 124: 319–333.
- DVWK (1996)** Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Bonn: Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, DVWK-Merkblatt 238. 135 p.
- ECKELMANN W, EDITOR (2005)** Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover: Schweizerbart, 5. ed. 438 p.
- FIEBIGER C, HENTSCHEL S, SCHELER B, MEESENBURG H, SUTMÖLLER J ET AL (2013)** Auswirkungen waldbaulicher Behandlungsvarianten auf den Wasserhaushalt. Modellgestützte Analyse am Beispiel eines Einzugsgebiets in Nordhessen. Freiburg i. Br.: Forstl Versuchs- Forsch.anstalt Baden-Württemberg, Ber Freiburger Forstl Forsch 96: 11–24.
- FLECK S, WAGNER M, MEESENBURG H (2010)** Wasserverfügbarkeit und Wachstum von Buche und Fichte. In: Dammann I, Paar U, Schmidt W, Wendland J, Weymar J et al, editors. Waldzustandsbericht 2010. Göttingen: Niedersächsisches Ministerium Ernährung Landwirtschaft Verbraucherschutz Landesentwicklung. pp. 20–21.
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005/2009)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft.
- FUHRER J, JASPER K (2009)** Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz. Bern: Bundesamt Landwirtschaft. 74 p.
- GONSETH Y, WOHLGEMUTH T, SANSONNENS B, BUTTLER A (2001)** Die biogeographischen Regionen der Schweiz. Erläuterungen und Einteilungsstandard. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umwelt Materialien 137. 48 p.
- GRIER CG, RUNNING SW (1977)** Leaf area of mature Northwestern coniferous forests: Relation to site water balance. Ecology 58: 893–899.
- HAMMEL K, KENNEL M (2001)** Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. München: Heinrich Frank, Forstl Forschungsber München 185. 148 p.
- HEWITT CD, GRIGGS DJ (2004)** Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. Eos 85: 566–567.
- JANSSEN PHM, HEUBERGER PSC (1995)** Calibration of process-oriented models. Ecol Model 83: 55–66.
- KEULER K, LAUTENSCHLAGER M, WUNRAM C, KEUP-THIEL E, SCHUBERT M ET AL (2009)** Climate simulation with CLM, Scenario A1B run no.2, Data Stream 2: European region MPI-M/MaD. Hamburg: World Data Center for Climate (WDCC). http://dx.doi.org/10.1594/WDCC/CLM_A1B_2_D2
- KLAP JM, REINDS GJ, BLEEKER A, DE VRIES W (2000)** Environmental stress in German forests. Wageningen: Alterra, Report 134. 73 p.
- MEINSHAUSEN M, SMITH SJ, CALVIN K, DANIEL JS, KAINUMA MLT, LAMARQUE JF ET AL (2011)** The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. Clim Chang 109: 213–241.

- MITCHELL TD, CARTER TR, JONES PD, HULME M, NEWS M (2004) A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). Norwich: Tyndall Centre, Working Paper 55. 30 p.
- MÜLLER J (2002) Wirkungszusammenhänge zwischen Vegetationsstrukturen und hydrologischen Prozessen in Wäldern und Forsten. In: Anders S, editor: Ökologie und Vegetation der Wälder Nordostdeutschlands. Oberwinter: Kessel. pp. 93; 99–122.
- PENMAN HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soils and grass. *Proc R Meteorol Soc Lond* 193(A): 120–145.
- REMUND J, FREHNER M, WALTHERT L, KÄGI M, RIHM B (2011) Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Bern: Meteotest. 56 p.
- RENGER M, BOHNE K, FACKLAM M, HARRACH T, RIEK W ET AL (2008) Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe «Kennwerte des Bodengefüges» zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. Göttingen: Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft. 51 p.
- RICHARDS LA (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1: 318–333.
- ROMANENKO VA (1961) Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Kiev: Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, Proc 3.
- SCHLEPPI P, THIMONIER A, WALTHERT L (2011) Estimating leaf area index of mature temperature forests using regressions on site and vegetation data. *For Ecol Manage* 261: 601–610.
- SHUTTLEWORTH JW (1993) Evaporation. In: Maidment DR, editor. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill 4.1–4.53.
- SPELLMANN H, SUTMÖLLER J, MEESENBURG H (2007) Risikovor-sorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ/Der Wald* 62: 1246–1249.
- SPELLMANN H, ALBERT M, SCHMIDT M, SUTMÖLLER J, OVERBECK M (2011) Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. *AFZ/Der Wald* 76 (11): 19–23.
- SPREAFICO M, WEINGARTNER R (2005) Hydrologie der Schweiz. Ausgewählte Aspekte und Resultate. Bern: Bundesamt Wasser Geologie, Ber Serie Wasser 7. 138 p.
- TABOR K, WILLIAMS JW (2010) Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecol Appl* 20 554–565.
- WAGNER M, SUTMÖLLER J, RUDOLPH J, HANSEN J, EICHHORN J ET AL (2013) Auswirkungen des Klimawandels auf das Trockenstressrisiko von Buchenwäldern am Beispiel hessischer BZE- und Intensivmonitoring-Standorte. Freiburg i. Br.: Forstl Versuchs- Forsch.anstalt Baden-Württemberg, Ber Freiburger Forstl Forsch 96: 179–197.
- WAGNER M, SUTMÖLLER J, NAGEL R, RUDOLPH J, HANSEN J ET AL (2015) Untersuchungen zur Anpassungsfähigkeit hessischer Buchenwälder an veränderte Klimabedingungen – Analyse der Auswirkungen klimawandelbedingter Erhöhung des Trockenstressrisikos auf die Vitalität und Leistungsfähigkeit von Buchenwäldern. Göttingen: Nordwestdeutsche Forstl Vers. anstalt. 106 p.
- WALTHERT L, ZIMMERMANN S, BLASER P, LUSTER J, LÜSCHER P (2004) Waldböden der Schweiz. Band 1. Grundlagen und Reion Jura. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 768 p.

Etat et développement de la sécheresse pour la forêt suisse

Les scénarios climatiques pour le XXI^e siècle prévoient une hausse des températures et une multiplication des événements météorologiques extrêmes en Suisse. Les risques de sécheresse auront un impact plus grand sur la forêt suisse. L'étude avait pour objectif de calculer des indicateurs qui permettent d'estimer et d'évaluer les risques de sécheresse actuels et futurs au niveau régional. Les indicateurs de sécheresse utilisés sont le bilan hydrique (Site Water Balance) et le rapport E_{Tr}/E_{Tp} (évapotranspiration réelle et potentielle). Ces indicateurs ont un lien étroit avec les paramètres de vitalité des arbres. Les projections s'appuient sur le scénario d'émission A1B, qui suppose une élévation des températures de 2.7 à 4.1° C en Suisse, et trois modèles climatiques (CLM, RCA, REGCM3), qui décrivent les différentes évolutions des précipitations et des températures. Des séries temporelles allant de 1951 à 2012 et des scénarios jusqu'en 2100 ont été calculés pour différentes régions climatiques de Suisse. Les indices donnent une bonne représentation des tendances mesurées et des différences régionales. Toutes les régions ont montré dans le passé une tendance vers une augmentation de la sécheresse. La région des cantons de Vaud et Genève ainsi que le reste de l'ouest du Plateau et le nord de la Suisse ont accusé les changements les plus importants. Les projections réalisées avec le modèle CLM, qui reproduit le mieux l'évolution historique (1981–2010) pour toute la Suisse, montrent pour le milieu du siècle une progression de la sécheresse et, de manière générale, une augmentation de la variabilité des événements climatiques.

State and development of drought in Swiss forests

Climate scenarios for the 21st century for Switzerland show increasing temperatures and more frequent weather extremes and the risk of drought will become more important. The objective of the study was the calculation of indicators which allow the estimation and evaluation of drought risks on a regional scale. The site water balance and the ratio between actual and potential evapotranspiration (E_{Ta}/E_{Tp}) were used as indicators. They are closely related to vitality parameters of trees. For projections in the future were used the A1B climate scenario, which assumes a warming of 2.7 to 4.1°C in Switzerland, and three regional climate models (CLM, RCA, REGCM3), which predict different developments regarding precipitation and temperature. Historical time series between 1951 and 2012 and scenarios up to 2100 for different climatic regions were calculated. The indicators reproduce well the measured trends and the regional differences. In all regions there was in the past a trend to increased drought. The Geneva/Vaud region as well as the western midlands and north Switzerland show the most pronounced changes. Projections with the CLM model (which reproduced best the historic trend 1981–2010 for Switzerland) show increasing drought and, in general, an increasing variability of the climate for the mid-century.