

Wasserverbrauch von Wäldern

Bäume und Bestände verdunsten unterschiedlich stark

Lothar Zimmermann, Stephan Raspe, Christoph Schulz und Winfried Grimmeisen

Wohlbekannt in Öffentlichkeit und Forstwirtschaft: Wälder verdunsten mehr als Feld und Flur. Doch warum ist dies so? Ist es immer so? Gibt es Unterschiede zwischen den Baumarten? Stimmt es, dass besonders Birken viel Wasser verbrauchen und wie trockene Schwämme Grundwasser nach oben saugen? Fragen über Fragen, zu denen wir hier ein paar Antworten geben wollen.

Betrachten wir zunächst den Wasserkreislauf im Wald. Der auf das Kronendach fallende Regen benetzt die Oberflächen der Blätter oder Nadeln sowie der Zweige und Äste. Damit wird eine Art Wasserspeicher im Kronenraum aufgefüllt. Dieses Wasser verdunstet dann wieder, ohne überhaupt den Waldboden erreicht zu haben. Den Prozess nennt man »Interzeption«. Infolge ihrer großen benetzbaren Oberfläche mit bis zu 27 Quadratmetern Blatt- oder Nadeloberfläche pro Quadratmeter Bestandesfläche weisen Waldbestände von allen Vegetationstypen die größten Interzeptionsverluste auf (Mitscherlich 1970). Erst wenn mehr Regen fällt als die Krone zurückhalten kann, gelangt Wasser als Kronentraufe auf den Waldboden. Besonders bei Buchen fließt ein Teil des Niederschlags zusätzlich direkt am Stamm entlang auf den Boden. Auch von der Bodenoberfläche verdunstet nochmals ein Teil des Wassers, genannt »Bodenevaporation«.

Der Rest des Niederschlagswassers versickert in den Boden und kann den Bodenwasserspeicher auffüllen. Von dort nehmen es die Bäume teilweise über die Feinwurzeln auf und transpirieren es über die Krone. Unterhalb der Hauptwurzelzone fließt es als Sickerwasser dem Grundwasser zu (Tiefensickerung, Grundwasserneubildung). Die Gesamtverdunstung

im Wald setzt sich somit aus Interzeption, Transpiration und Bodenevaporation zusammen (Abbildung 1). Insgesamt bestimmen die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Pflanze und Boden den Prozess der Verdunstung. Die Transpiration hat meist den größten Anteil an der Gesamtverdunstung. Welche Menge dann tatsächlich verdunstet, hängt neben dem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre von der Menge an pflanzenverfügbarem Bodenwasser und dem strukturellen Aufbau der Waldbestände ab.

Verdunsten Wälder mehr als Wiesen und Äcker?

Mehrere Faktoren beeinflussen die Höhe der Gesamtverdunstung. Dazu zählen zum einen meteorologische Größen wie die Strahlungsenergie der Sonne, das Wasserdampfaufnahmevermögen der Luft sowie der Wind, der die Feuchte wegtransportiert und für eine Durchmischung der Atmosphäre sorgt. Schon bei der Strahlung sind Wälder gegenüber Wiesen im Vorteil, da sie die Sonnenstrahlung besser ausnutzen können. Besonders bei Nadelwäldern wird deutlich weniger kurzwellige Sonnenstrahlung reflektiert (Albedo) als bei niedrigwüchsiger Vegetation. Damit ist ihr Energiegewinn größer. Gleichzeitig ist der langwellige Energieverlust durch Abstrahlung in Folge der niedrigeren Temperaturen im Wald tagsüber geringer als im Offenland. Nachts ist er allerdings wegen höherer Temperaturen größer. Bildet man die Bilanz aller Einstrahlungs- und Ausstrahlungsgrößen, bleibt jedoch wesentlich mehr Energie im Wald als in Wiesen und Äckern.

Auf der anderen Seite gibt es auch biologische Faktoren, die den Wasserverbrauch beeinflussen. Wälder besitzen auf Grund ihrer größeren Höhe wesentlich mehr Blattmasse als niedrigere Vegetation. Damit bilden sie auch eine größere verdunstungswirksame Oberfläche. Wenn eine Kraut- und Strauchschicht vorhanden ist, trägt diese noch zusätzlich zur Gesamtverdunstung eines solchen mehrstufigen Bestandes bei. Über die größere Wurzeltiefe kann auch ein größeres Bodenvolumen erschlossen werden, so dass das Angebot an pflanzenverfügbarem Wasser auch höher ist. Die längere Vegetationsperiode sorgt für eine längere verdunstungswirksame Zeit. Immergrüne Nadelwälder verdunsten auch in den zuletzt häufiger auftretenden milden Wintern erhebliche Wassermengen (Raspe et al. 2008).

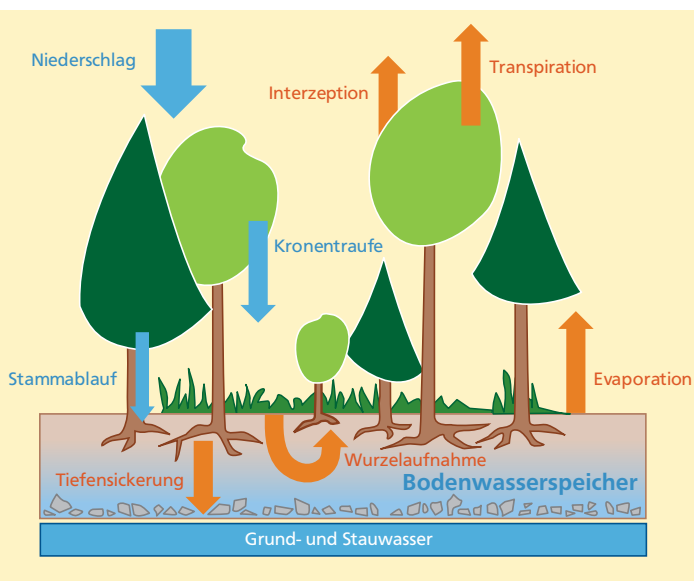


Abbildung 1: Komponenten des Wasserhaushaltes von Wäldern, verändert nach Rehfuess 1990

Rauhigkeit und Höhe der Waldvegetation verbessern den aerodynamischen Austausch zur Atmosphäre, da sie den turbulenten Wasserdampftransport vom Kronendach zur Atmosphäre beschleunigt. Dadurch kann mehr Wasser im Kronenraum direkt verdunsten, der Interzeptionsverlust wird größer. Aber nicht nur der passive Transport von benetzten Blatt- oder Nadeloberflächen ist effektiver, auch die Kontrolle der Spaltöffnungen ist bei Bäumen effektiver als bei Gras oder landwirtschaftlichen Kulturen. Über die Spaltöffnungen in den Blättern wird die Transpiration, das heißt die Verdunstung des über die Wurzeln aufgenommenen Wassers, gesteuert. Der Bestandeswiderstand, ein Maß für die Kontrolle der Transpiration durch die Spaltöffnungen, ist bei Wald um das zwei- bis dreifache höher als bei landwirtschaftlichen Kulturen. Des-

halb verbrauchen Wälder in Zeiten ohne Niederschläge unter sonst gleichen Bedingungen in der Regel weniger Wasser als landwirtschaftliche Bestände. Offensichtlich ist dies eine evolutionäre Anpassung, um zu hohe Transpirationsverluste der Wälder zu vermeiden (Zimmermann 2007).

Welche Unterschiede im Wasserverbrauch bestehen zwischen den Baumarten?

Aber wie sieht es nun mit dem Wasserverbrauch verschiedener Baumarten aus? Brauchen Fichten mehr Wasser als Buchen oder Birken mehr als Eichen, um nur einige Beispiele zu nennen? Manche Wissenschaftler sagen ganz klar, einige Baumarten verbrauchen mehr als andere Baumarten. Andere vertreten allerdings die Meinung, dass die Unterschiede zwischen den Baumarten gar nicht so groß sind. Wie so oft, wenn die Meinungen derart auseinandergehen, führen unterschiedliche Untersuchungen zu widersprüchlichen Ergebnissen. Dies hängt damit zusammen, dass auch die Messansätze und die Standorte mit ihrem jeweiligen Klima unterschiedlich sind. Ein paar davon stellen wir hier vor.

Am einfachsten wäre es, die Verdunstung in »wägbaren Lysimetern« zu messen. Dabei wird ein Bodenvolumen in ungestörter Lagerung mit einer definierten Vegetation ausgestochen und auf eine Waage gestellt. Gleichzeitig muss allerdings auch noch die Sickerwassermenge gemessen werden. Ein ausreichend großes Bodenvolumen ist natürlich Bedingung, um repräsentative Werte zu bekommen. Außerdem muss es hierzu im Boden versenkt werden und umliegend eine gleiche Vegetation vorhanden sein, um Störungen auf Grund von Randeffekten zu vermeiden. Auf Grund ihrer Größe gibt es für Wälder kaum wägbare Lysimeter. Man behilft sich deshalb mit Eintrags- (Niederschlagsmenge) und Austragsbilanzen (Sickerwassermenge) in nichtwägbaren Lysimetern. In St. Arnold bei Münster (Westfalen) steht eine solche Anlage (Abbildung 2). Hier wurde die Bodensickerwassermenge über einen längeren Zeitraum (1974 bis 1998) unter einem Eichen-Buchenbestand, einem Kiefernbestand und im Vergleich dazu unter Gras kontinuierlich gemessen (Klein 2000). Die Verdunstung wurde mit Klimadaten über einen Modellansatz (Penman-Monteith) berechnet, an Bestandesniederschlagsmessungen getestet und in ihre Komponenten Transpiration, Interzeption und Boden- evaporation aufgeteilt (Abbildung 3). Die höchste Gesamtverdunstung mit 585 Litern pro Quadratmeter erreichte der Kiefernbestand (34-jährig, 60 Stämme auf 400 m², Höhe 15 m), wobei die Interzeptionsverdunstung mit 282 Litern pro Quadratmeter um 18 Liter je Quadratmeter höher war als die Transpiration. Beim Eichen-Buchen-Bestand (34-jährig, 70 Stämme auf 400 m², Höhe 11,5 m) war die Transpiration mit 289 Litern je Quadratmeter fast doppelt so hoch wie die Interzeption. Der gesamte Wasserverbrauch betrug hier knapp 490 Liter pro Quadratmeter. Interessanterweise lag die Transpiration des Grasbestandes fast gleichauf mit den beiden Baumarten, ein Hinweis auf die schlechte Kontrolle der Spaltöffnungen bei Gras. Die Gesamtverdunstung der Grasvegetation lag jedoch auch nur bei 371 Litern je Quadratmeter.

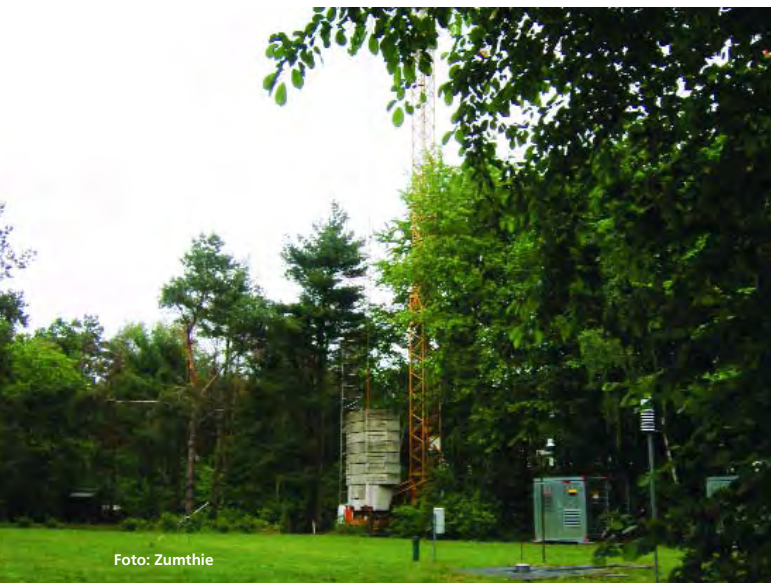


Foto: Zumthie

Abbildung 2: Großlysimeteranlage des Landes Nordrhein-Westfalen in Neuenkirchen/St. Arnold

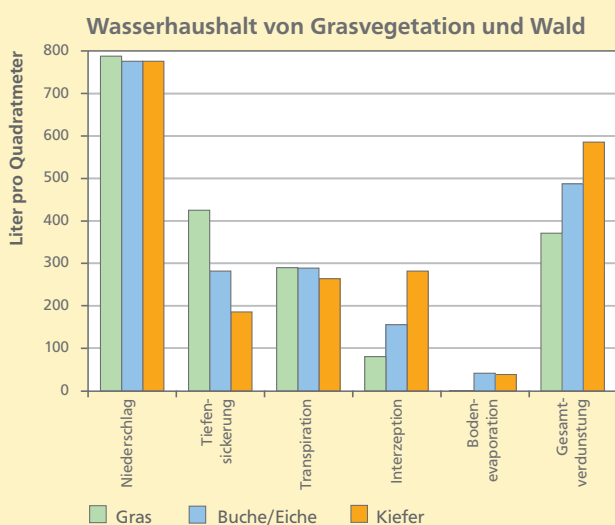


Abbildung 3: Durchschnittliche Kennwerte zum Wasserhaushalt von Grasvegetation (1966–98) und Wald (1974–98: Eiche/Buche und Kiefer) des Waldlysimeters St. Arnold; nach Klein 2000, Grafik nach Tab. 8.1

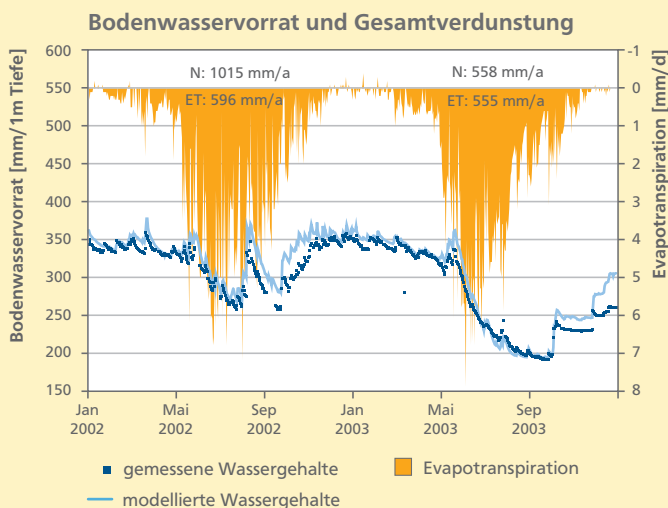


Abbildung 4: Verlauf des gesamten Bodenwasservorrates (gemessene Werte im Vergleich mit modellierten) und der modellierten Gesamtverdunstung an der Waldklimastation Freising (2002–2003); Jahressummen: N = gemessener Freilandniederschlag; ET = Gesamtverdunstung

Rechenmodelle als Lysimeter-Ersatz

An natürlichen Waldstandorten wie beispielsweise an den bayerischen Waldklimastationen können Lysimeter simuliert werden, in dem man nicht die Tiefenversickerung erfasst, sondern stattdessen die Wassergehalte in mehreren Tiefen im Hauptwurzelraum misst. Auf ebenen, grundwasserfernen Waldstandorten verändert sich der Bodenwassergehalt in der durchwurzelten Schicht nur auf Grund des Transpirationseinzuges über die Feinwurzeln, der Bodenevaporation und der Versickerung in tiefere Schichten. Die Schwierigkeit liegt nun darin, dass man trennen muss, was über die Wurzeln entzogen wird und was durch das Bodenprofil hindurchsickert. Um dies zu unterscheiden, muss man ein Bodenwasserhaushaltsmodell mit einem Verdunstungsteil an die Messwerte der Bodenfeuchte anpassen, hier beispielhaft für die Waldklimastation Freising dargestellt (Abbildung 4).

Mit dem Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 (Hammel und Kennel 2001), das die Verdunstung für einen zweischichtigen Bestandaufbau mit einer weiterentwickelten Verdunstungsformel (Penman-Monteith) berechnet, wurde dann der Wasserverbrauch an allen 22 Waldklimastationen für die Jahre 1998 bis 2007 berechnet. Danach ist der mittlere Jahresverlauf der Transpiration an den Waldklimastationen mit Fichte deutlich höher als bei den Kieferstationen (Abbildung 5).

Ursache hierfür ist vor allem die größere absolute Nadeloberfläche der Fichte im Vergleich zur Kiefer. Die von der Fichte erreichten, mittleren maximalen täglichen Transpirationsraten im Sommer liegen bei circa drei Litern pro Quadratmeter. Vergleichbare sommerliche Werte fand auch Tranquillini (1951) an einer freistehenden, 50-jährigen Fichte bei Innsbruck (Lyr et al. 1992). An den Stationen mit Laubwald (Buche, Eiche,

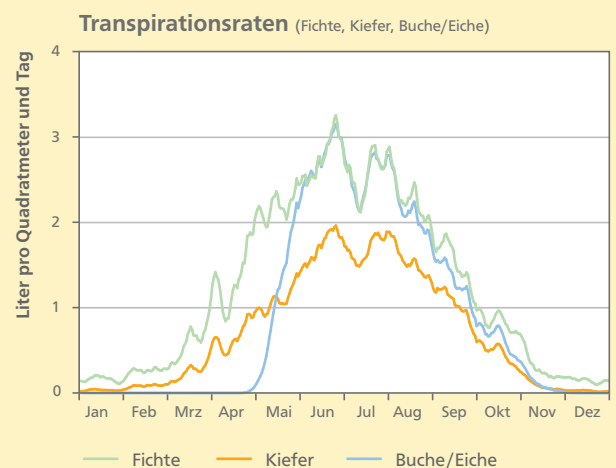


Abbildung 5: Tägliche Transpirationsraten im Jahresverlauf an den Waldklimastationen jeweils gemittelt für die Baumarten Fichte, Kiefer und die Laubbäume Buche und Eiche für den Zeitraum 1998 bis 2007

Esche mit unterschiedlichen Anteilen) beginnt die Transpiration deutlich mit dem Laubaustrieb und erreicht schnell das Niveau der Fichtenbestände. Für den Laubwald endet die Phase der aktiven Verdunstung spätestens Ende November. Dagegen können die immergrünen Nadelbäume auch in den Wintermonaten bei günstiger Witterung transpirieren.

Transpiration – vom Topf zum Bestand

Schon vor mehr als 100 Jahren fanden an der forstlichen Versuchsanstalt Mariabrunn bei Wien erste Versuche zum Wasserverbrauch verschiedener Baumarten statt. Mit Topfversuchen bestimmte später Polster (1950 in Lyr et al. 1992) an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der TU Dresden mittlere Tagessummen des Wasserverbrauchs junger Bäume. Diese Versuche wurden in Klimakammern durchgeführt, um gleiche Außenbedingungen zu gewährleisten. Bezug bei diesen Versuchen ist entweder die Blattoberfläche oder das Frischgewicht der Blätter oder Nadeln, so dass man von *spezifischer* Transpiration spricht.

Ein Problem stellt die Hochrechnung der gefundenen Werte auf ganze Bäume oder Bestände dar. Für ganze Bäume (20- bis 30-jährig) wurde in Dänemark die Reihenfolge Birke > Eiche > Esche > Buche über Messungen der Transpirationsstromgeschwindigkeit bestätigt (Lyr et al. 1992). In Beständen muss zusätzlich noch die Bestandesstruktur (Licht- und Schattenkrone) sowie die Stellung der Bäume im Bestand berücksichtigt werden. Untersuchungen im Schwarzwald mit modernen Gaswechsellammern an Zweigen der Licht- und Schattenkronen ergaben für die spezifische Transpiration die Reihenfolge Birke > Buche > Kiefer > Douglasie. Die Hochrechnung der auf die einzelnen Blätter bezogenen spezifischen Transpirati-

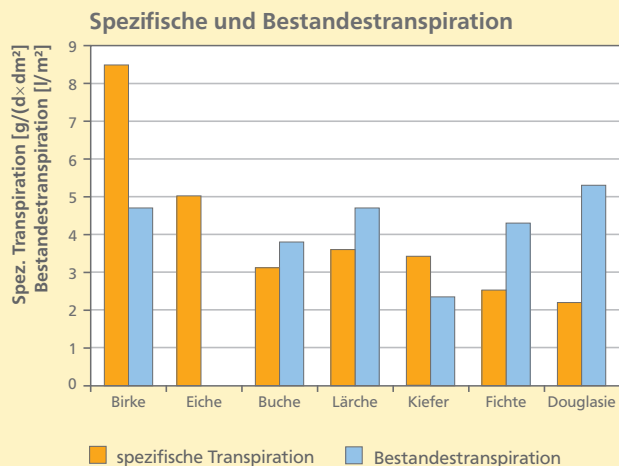


Abbildung 6: Tagessummen der spezifischen Transpiration (Juni–August) von sieben- bis achtjährigen Forstpflanzen, bezogen auf die Oberfläche und das Frischgewicht von Blättern sowie Bestandestranspiration pro Tag; nach Polster 1950, in Lyr et al. 1992

on über die Blattmassen in Waldbeständen erbrachte neue Erkenntnisse. Bei der Bestandestranspiration wird der Unterschied in der spezifischen Transpiration zwischen Laub- und Nadelbäumen dadurch ausgeglichen, dass Laubhölzer im Bestand bedeutend weniger Blattmasse bilden als Nadelwälder (Abbildung 6). Die Fichte kommt wegen ihrer großen Nadelmasse trotz der spezifischen geringeren Transpiration im Bestand an die Birke heran. Die Douglasie, die pro Gramm Nadeln im Topfversuch am wenigsten Wasser abgibt, steht nun an der Spitze. Für die Bestandestranspiration sind auch die Stammzahlen pro Hektar wichtig. Schattenertragende Baumarten können in der Jugend enger aneinanderrücken als die lichtbedürftigen und haben trotz schwächerer Transpiration pro Baum eine höhere Bestandestranspiration als die stark transpirierenden Lichtbaumarten. Auf Grund der unterschiedlichen Exposition der Baumkronen im Bestand können die Unterschiede in der Transpiration bis zu 500 Prozent zwischen einzelnen Bäumen betragen.

Energiebilanzen: Über mikrometeorologische Messungen zur Verdunstung

Die modernste Methode zur Erfassung der Verdunstung von Waldbeständen ist die Messung der Energiebilanz über dem Kronendach, wobei der Wasserdampfstrom als Restglied der Bilanz berechnet oder aber auch direkt gemessen werden kann. Auf Grund der turbulenten Austauschprozesse zwischen Krone und Atmosphäre sind aber die Anforderungen an die Messtechnik hoch, gemessen wird im Hertz-Bereich, so dass die Sensoren entsprechend schnell reagieren müssen und gleichzeitig enorme Datenmengen zu verarbeiten sind. Solche mikrometeorologischen Untersuchungen führen deshalb nur

wenige Forschungsinstitute in Europa, Japan und Nordamerika an über den Bestand hinausragenden Türmen durch. Meist wird dabei gleichzeitig auch der Kohlendioxidstrom gemessen, um die Funktion der Wälder im globalen Kohlenstoffhaushalt näher zu erforschen. Begleitende Untersuchungen des Wasserflusses im Holz (Xylemfluss) und des Bestandesniederschlags erlauben eine Differenzierung der gemessenen Gesamtverdunstung in Transpiration und Interzeption. Eine Literatursauswertung für mitteleuropäische Wälder zeigte für Fichte eine weite Spanne der Gesamtverdunstung von 350 bis 700 Litern pro Quadratmeter im Jahr, während sie für Buche etwas enger war (300 bis 600 Liter pro Quadratmeter im Jahr). Im Mittel nahmen bei beiden Baumarten Transpiration und Interzeption jeweils 30 Prozent der Gesamtverdunstung ein (Köstner 2001). Im Tharandter Wald in Sachsen betreibt der Lehrstuhl für Meteorologie der TU Dresden einen solchen mikrometeorologischen Messturm. Er steht in einem 115-jährigen Fichtenbestand. Niederschlagsmessrinnen im Bestand sowie Sensoren für den Xylemfluss und die Bodenfeuchte ergänzen die Anlage. In den Monaten April bis Oktober kann der Interzeptionsverlust in einigen Jahren der Transpiration entsprechen (Spank et al. 2008). Im Mittel (1997 bis 2005) erreichte bei einer Wasserhaushaltsmodellierung die Transpiration 40 Prozent, die Interzeption 45 Prozent und die Boden- evaporation 15 Prozent der Gesamtverdunstung (Schwärzel et al. 2006). Dies zeigt die besondere Bedeutung, die die Interzeption je nach Witterungskonstellation haben kann.

Der Rest der Verdunstung wird vor allem in lichten Beständen mit gut entwickeltem Unterwuchs der Strauch- und Krautschicht zugeschrieben. Im niederschlagsarmen nordostdeutschen Tiefland zeigten Arbeiten an unterschiedlichen Beständen, dass mit zunehmender Abdunkelung der Anteil der Bodenevaporation an der Gesamtverdunstung von 33 Prozent in einem Himbeer-Drahtschmielen-Kiefernforst (84 Jahre) auf 12 Prozent in einem 101-jährigen Buchenwald sinkt (Müller 2007). Gerade bei Durchforstungen mit dem Ziel, die Wasserversorgung im Bestand zu erhöhen, kann daher die aufwachsende Bodenvegetation den zunächst tatsächlich zurückgehenden Wasserverbrauch der Bestände schnell wieder auf das ursprüngliche Niveau anheben.

Klimawandel wird Wasserhaushalt verändern

Insbesondere vor dem Hintergrund des sich abzeichnenden Klimawandels mit seinen möglichen negativen Folgen für die Wasserversorgung der Wälder stellt sich daher die Frage, ob der Wasserhaushalt mit waldbaulichen Maßnahmen an diese Veränderungen angepasst werden kann. Hierzu initiierte die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft in Zusammenarbeit mit der Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen der Universität Göttingen sowie dem Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen der TU München in diesem Jahr ein Forschungsprojekt, in dem die Auswirkungen verschiedener Durchforstungsvarianten auf den Wasserhaushalt von Fichtenbeständen im niederbayerischen Tertiärhügelland bei Landshut untersucht werden sollen.

Nach den aktuellen regionalen Klimaszenarien des Umweltbundesamtes (regionales Klimamodell WETTREG) wird für diese Region für das Ende des Jahrhunderts eine Umverteilung des Niederschlags vom Sommer (-25 Prozent) zum Winter (+25 Prozent) vorausgesagt. Gleichzeitig wird eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur (1961 bis 1990) um +2 °C erwartet, wobei im Sommer stärkere Zunahmen (+3,5 °C) modelliert werden als im Winter (+2,2 °C). Wegen des höheren Verdunstungsanspruchs dürfte damit der Wasserhaushalt für die Fichten in dieser Region deutlich angespannt sein. Die Ergebnisse dieser Studie werden in den nächsten Jahren erwartet und unser Wissen über Wasserhaushalt der Wälder um einen wichtigen Punkt erweitern.

Wasser – so vielfältig wie das Leben



Foto: LfU

Dienststelle Hof des Landesamtes für Umwelt

Wasser spielt in unserem Leben eine wichtige Rolle: Wir schwimmen und baden darin, wir brauchen es als Trinkwasser, bereiten Speisen damit zu. Kaum ein anderes Umweltthema wird so differenziert und umfangreich bearbeitet wie dieses.

Ob es um Grundwasser, Trinkwasser, Abwasser, Flüsse und Seen oder Hochwässer geht – im Bayerischen Landesamt für Umwelt werden zahlreiche Messdaten und Informationen zu diesen Themen gesammelt und aufbereitet. Daraus entstehen Grundwasserbilanzen, Schadstoffkartierungen, Gewässergütekarten und Wasserstandsvoraussagen. Mit ihrer Hilfe kann unser kostbares Nass geschützt und die Bevölkerung rechtzeitig vor Gefahren, zum Beispiel Hochwasser, gewarnt werden. Das LfU informiert umfassend über Wasser, von aktuellen Themen wie der Wasserrahmenrichtlinie über Wasserkreislauf und Klimawandel bis hin zu Wasserbau und Gewässerschutz.

red

Mehr unter: www.lfu.bayern.de/wasser

Literatur

Klein, M. (2000): *Langjähriger Wasserhaushalt von Gras- und Waldbeständen. Entwicklung, Kalibrierung und Anwendung des Modells LY-FE am Groß-Lysimeter St. Arnold*. Dissertation am Institut für Umweltsystemforschung der Universität Osnabrück, 211 S.

Köstner, B. (2001): *Evaporation and transpiration from forests in Central Europe – relevance of patch-level studies for spatial scaling*. Meteorol. Atmos. Phys. 76, S. 69–82

Lyr, H.; Fiedler, H.-J.; Tranquillini, W. (1992): *Physiologie und Ökologie der Gehölze*. 619 S.

Mitscherlich, G. (1970): *Wald, Wachstum und Umwelt*. Bd. 1: Form und Wachstum von Baum und Bestand. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. Main, 142 S., S. 31 ff

Müller, J. (2007): *Verdunstung und Wasserhaushalt unterschiedlich strukturierter Kiefern-Buchen-Mischbestände auf grundwasserfernen Standorten*. In: Miegel, K.; Kleeberg, H.-B. (2007): *Verdunstung*. Beiträge zum Seminar Verdunstung am 10./11. Oktober in Potsdam. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 21, S. 97–112

Raspe, S.; Häberle, K.H.; Zimmermann, L.; Grimmeisen, W. (2008): *Was bedeuten milde Winter für den Wasserhaushalt unserer Wälder*. In: FVA Freiburg (2008): *Tagungsbericht. Kolloquium des DBG-Arbeitskreises Waldböden und der Sektion Wald und Wasser im Verband Forstlicher Versuchs- und Forschungsanstalten in Freiburg am 24. und 25. April 2008*

Spank, U.; Grünwald, T.; Bernhofer, C. (2008): *Components of forest ET derived from micrometeorological measurements*. (In Vorbereitung)

Schwärzel, K.; Feger, K.H.; Grünwald, T.; Eichelmann, U.; Köstner, B.; Bernhofer, C. (2006): *Application of LWF-BROOK90 for long-term simulation of the water balance of an old spruce stand*. Vorträge ICP-Workshop LWF Freising 4./5.12.2006: Comparison of different water budget models at an European scale

Zimmermann, L. (2007): *Besonderheiten der Waldverdunstung*. In: Miegel, K.; Kleeberg, H.-B. (2007): *Verdunstung*. Beiträge zum Seminar Verdunstung am 10./11. Oktober in Potsdam. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 21, S. 81–96

Dr. Lothar Zimmermann, Dr. Stephan Raspe und Winfried Grimmeisen sind Mitarbeiter im Sachgebiet »Klima und Wasserschutz« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Christoph Schulz leitet das Sachgebiet. zimm@lwf.uni-muenchen.de