



© Fotolia/Nici Henke

## 1.10 Wasserhaushalt bewaldeter Einzugsgebiete

VALERI GOLDBERG & CHRISTIAN BERNHOFER

**Water balance of forested catchments:** *About 30% of the land surface is covered by forests. Today these forests are threatened by human activities like increasing usage of wood, conversion to agriculture and air pollution. The water budget of forested catchments differs distinctly from bare soils or grasslands by significantly higher interception losses due to higher leaf area per surface area. This filtering function of forests leads generally to a lower quantity but better quality of usable water as well as to a more equally distributed runoff minimising erosion. In the last decades of the 20th century the contamination of vegetation and soils by high deposition led to a higher concentration of noxious matter in runoff, especially near strong emissions. Altogether the positive effects of forested watersheds on water supply prevail, so that the conservation of large and dense forests is necessary to cope with global water problems in the future.*

Wald stellt im globalen Maßstab mit derzeit etwa 30% eine der bedeutendsten Landbedeckungen dar. Dies entspricht etwa 39,5 Mio. km<sup>2</sup> und damit etwa 8% der gesamten Erdoberfläche (Stand 2005, [www.fao.org/forestry/32032/en/](http://www.fao.org/forestry/32032/en/)). Die Waldflächen verteilen sich auf tropische Wälder mit 42%, boreale Wälder mit 33% und temperierte Wälder mit 25% ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)). Gleichzeitig sind Wälder auch der Landoberflächentyp, der historisch am stärksten anthropogen reduziert wurde. Während große Areale in Russland und Kanada sowie im Amazonas- und Kongobecken noch von Primärwäldern bedeckt sind, gibt es in Mittel- und Westeuropa fast ausschließlich forstwirtschaftlich genutzte Waldflächen.

Von den ursprünglich etwa auf 66 Mio. km<sup>2</sup> vorhandenen Waldflächen wurden durch menschliche Eingriffe etwa 35% vernichtet und 43% in Sekundärwälder umgewandelt (BRYANT et al. 1997). Den stärksten aktuellen Rückgang in der Waldbedeckung verzeichnen Afrika und Südamerika (Tab. 1.10-1). In diesem Zusammenhang spielen Waldbrände eine besondere Rolle, die zu einem bedeutenden Anteil ein natürliches Phänomen sind und besonders in den borealen Zonen den Waldan-

teil regulieren. Die Änderung der globalen Waldbedeckung in der Zukunft hängt sowohl von der klimatischen als auch der sozioökonomischen Entwicklung ab.

In der modernen Industriegesellschaft dient Wald v.a. als Holzlieferant für die Anwendung in der Papier-, Zellstoff-, Bau- und Möbelindustrie, sowie als Energieträger. In Entwicklungsländern ist Wald primär Lieferant für Brenn- und Bauholz. In den letzten Jahrzehnten hat die Schutz- und Sozialfunktion des Waldes zunehmend an Bedeutung gewonnen. Waldgebiete dienen in Ballungsräumen als Naherholungsgebiete sowie stadtklimatisch als Kalt- bzw. Frischluftquellen. In

**Tab. 1.10-1:** Entwicklung der globalen Waldbedeckung (Mio. ha) seit 1990 ([www.earth-policy.org/indicators/C56](http://www.earth-policy.org/indicators/C56)).

Region	1990	2000	2005
Afrika	699	656	635
Asien	574	567	572
Europa	989	998	1001
Nord- und Mittelamerika	711	708	706
Ozeanien	213	208	206
Südamerika	891	853	832
<b>Welt</b>	<b>4077</b>	<b>3989</b>	<b>3952</b>

Aus: WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3. Auflage (2011)  
- Hrsg. Lozán, J. L. H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese

Hochgebirgen haben Wälder zusätzlich eine wichtige Schutzfunktion vor Lawinen, Muren und Erosion.

Wasserwirtschaftlich spielen Wälder als Trinkwasserereinzugsgebiete eine bedeutende Rolle. So beziehen Metropolen wie Los Angeles, Peking, Wien und München einen Großteil ihres Wasserbedarfs aus bewaldeten Einzugsgebieten.

### Der Wasserhaushalt im Wald

Die Besonderheiten im Wasserhaushalt von Wäldern gestatten es, durch relativ kleine forstwirtschaftliche Eingriffe das nutzbare Wasserdargebot zu verändern.

In *Abb. 1.10-1* sind die wichtigsten Komponenten des Wasserhaushaltes in einem bewaldeten Einzugsgebiet dargestellt. Als vollständige Bilanz kann formuliert werden:

$$PF = I + T + E + RB_O + f_{GW} + S - RB_I - f_{Ka} - I_K$$

wobei:

Freilandniederschlag **PF**, Interzeption **I**, Transpiration **T**, Evaporation **E**, oberflächennaher, lateraler Abfluss **RB<sub>O</sub>**, Tiefensickerung **f<sub>GW</sub>**, Haftwasser im Boden **S**, oberflächennaher lateraler Zufluss **RB<sub>I</sub>**, Nebelinterzeption, Reif **f<sub>Ka</sub>**, kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser **I<sub>K</sub>** sind.

Entscheidend für den Betrag des Gebietsabflusses **RB<sub>0</sub>** ist das Verhältnis von Gebietsniederschlag **PF** zu den Verdunstungskomponenten Transpiration **T** (Verdunstung der Pflanzen), Evaporation **E** (Verdunstung des Erdbodens) und Interzeption **I** (Verdunstung der benetzten Vegetationsoberfläche). Wälder verdunsten i. allg. einen deutlich höheren Anteil des zur Verfügung stehenden Niederschlags als landwirtschaftliche Nutzflächen (*Tab. 1.10-2*).

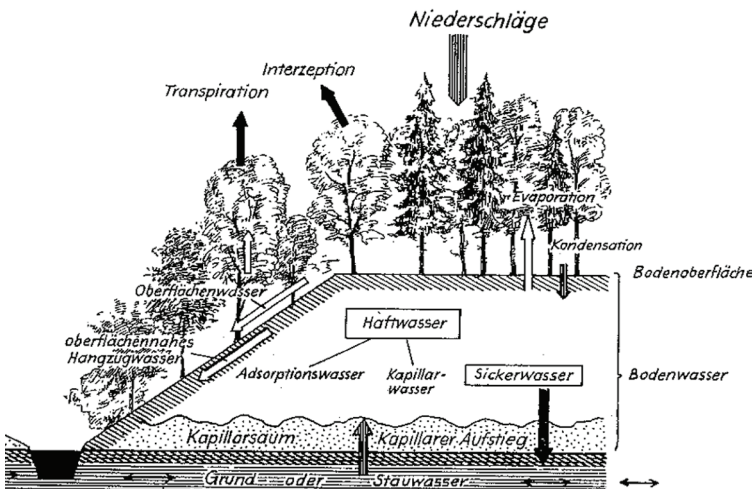
Der wesentliche Grund dafür liegt in der deutlich erhöhten Interzeptionsverdunstung von Wäldern. Als Interzeption wird die vorübergehende Speicherung von Niederschlag an Pflanzenoberflächen definiert (DIN 4049, Teil 1 und 101).

Der gespeicherte Niederschlag kann anschließend als abtropfender Niederschlag oder Stammabfluss zum Boden gelangen oder aber von der Pflanzenoberfläche verdunsten. Der Teil des Niederschlags, der infolge der Interzeption nicht die Bodenoberfläche erreicht, wird als Interzeptionsverlust bezeichnet.

In mitteleuropäischen Wäldern bewegt sich der jährliche Interzeptionsverlust zwischen 10–50% des Freilandniederschlags, und stellt somit besonders bei einer Landnutzungsänderung eine entscheidende Größe für die Wasserwirtschaft dar. Die Interzeption wird üblicherweise durch Vergleichsmessungen von Freiland- und Bestandesniederschlag als Restglied ermittelt. Um einen repräsentativen Wert für den Niederschlag im Bestand zu erhalten, werden zufällig verteilte Totalisatoren oder Interzeptionsrinnen verwendet. *Abb. 1.10-2* zeigt ein Beispiel für das Verhältnis von Bestandes- zu Freilandniederschlag am Experimentalstandort Tharandter Wald (südlich von Dresden, 110jähriger Fichtenbestand) in den schneefreien Perioden von 1997–2010.

**Tab. 1.10-2:** Vergleich der Waldverdunstung mit der Verdunstung anderer Landnutzungen (BAUMGARTNER 1979).

Landnutzung	Verdunstung/Niederschlag (%)
Brache	30
Getreide	40
Hackfrüchte	45
Grünland	65
Wälder	70
Freie Wasserflächen	75
Benetzte Erdoberflächen, Oasen	95



**Abb. 1.10-1:** Wasserhaushalt eines bewaldeten Einzugsgebietes (aus REHFUESS 1990).

Die Interzeption hängt von zahlreichen meteorologischen (Niederschlagshöhe, Niederschlagsdauer, Niederschlagsintensität, Wind, Lufttemperatur, Strahlung, Luftfeuchte, Art und Temperatur des Niederschlages) und pflanzenspezifischen (Baumart, Baumalter, Bestandesdichte, Bestandesstruktur, Bestandeshöhe, Blattflächenindex, Rauigkeit, Größe, Zahl, Anordnung, Elastizität, Wasserdefizit der Nadeln, Ausbildung von Ästen, Zweigen und Stamm) Einflussfaktoren ab. Deutlich unterscheidbar ist z.B. das Interzeptionsverhalten von Laub- und Nadelwäldern (Tab. 1.10-3).

Die Transpiration wird dagegen von Art und Anzahl der Spaltöffnungen pro Blattfläche und physiologisch durch die Spaltöffnungsweite geregelt. Diese Steuerung der Transpiration wird meist durch den Bestandeswiderstand ausgedrückt. Bei Wäldern – außerhalb

von Interzeptionsereignissen – sind die von der Blattanatomie bestimmten minimalen Bestandeswiderstände meist deutlich höher als bei landwirtschaftlichen Beständen: Ein Hinweis auf eine evolutionäre Anpassung von Bäumen, um hohe Transpirationsverluste durch die hohen Windgeschwindigkeiten über den Baumkronen zu vermeiden. Wälder transpirieren daher in der Regel weniger als landwirtschaftliche Nutzflächen.

An einigen Waldstandorten in Europa, Nordamerika und Japan werden seit Mitte der 1990er Jahre die Energiebilanzkomponenten einschließlich des Energieäquivalents der Verdunstung (latenter Wärmestrom) kontinuierlich mit mikrometeorologischen Methoden bestimmt (FLUXNET-Initiative). In Deutschland liegen aus dem Tharandter Wald Untersuchungen aus einer solchen mikrometeorologischen Turmmessung für

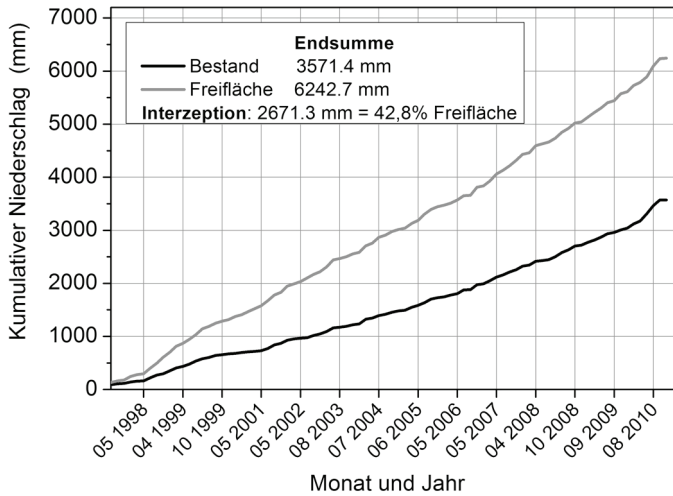


Abb. 1.10-2: Kumulative Niederschlagsinterzeption eines Altlichtenbestandes (Ankerstation Tharandter Wald / Wildacker) in der schneefreien Periode der Jahre 1997–2010 (ohne 2003 und August 2002 (Datenausfälle)).

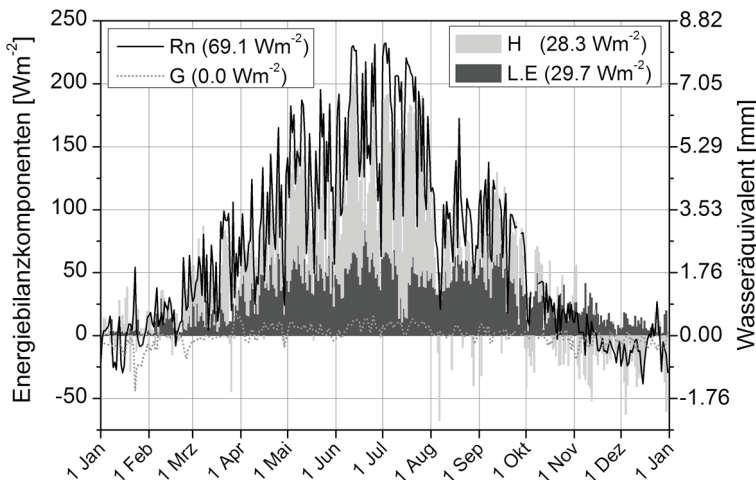


Abb. 1.10-3: Jahresgang der Energiebilanzkomponenten (Rn-Strahlungsbilanz, H-fühlbarer Wärmestrom, LE-latenter Wärmestrom, G-Bodenwärmestrom) und deren jährlicher Mittelwerte an der Ankerstation Tharandter Wald (Fichte), Beispielsjahr 2006 (aus BERNHOFER et al. 2011).



**Tab. 1.10-3:** Interzeptionsverdunstung (% vom Niederschlag) von Fichten- und Buchenwald im Sauerland (DVWK-Merkblätter 238/1996).

	<i>Fichte</i>	<i>Buche</i>
Winter	20 %	4 %
Sommer	31 %	11 %
Jahr	26 %	8 %

Fichten vor (Abb. 1.10-3). Dabei wird im Jahresverlauf der Einfluss der Interzeptionsverdunstung insbesondere im Winter deutlich. Hier übersteigt die Gesamtverdunstung (LE) die Strahlungsbilanz (Rn) deutlich. Die Energie für diese hauptsächlich von der Waldoberfläche interzipierte und wiederverdunstete Wassermenge wird dabei durch den zur Oberfläche gerichteten (negativen) fühlbaren Wärmestrom bereitgestellt. Eine ähnlich hohe Winterverdunstung ist über einer Grasoberfläche mit gleichem Strahlungsangebot nicht zu erwarten.

Im Vergleich der Komponenten des Wasserhaushalts wird mehr als zwei Drittel des Niederschlags verdunstet; ein Drittel der Verdunstung wird dabei durch die Interzeption verursacht, der Rest durch die Transpiration und die Evaporation. Diese Verhältnisse sind

**Tab. 1.10-4:** Wasserhaushaltsdaten des bewaldeten Einzugsgebiet Wernerbach (4,6 km<sup>2</sup>, Tharandter Wald, 25 km südwestlich von Dresden, Messbeginn 1968).

Niederschlag	847 mm	Verdunstung	607 mm
Abfluss	240 mm		
<i>Abflusswerte (l/s)</i>			
Niedrigabfluss (absolut)	0,3 (17.8.76)		
Niedrigabfluss (mittel)	2,5		
mittlerer Abfluss	35		
Maximalabfluss (mittel)	1228		
Maximalabfluss (absolut)	6.540 (23.7.1980)		
	gesichert		
	8000–10000		
	(13.8.2002) geschätzt		

typisch für gemäßigte Breiten und Regionen ohne Wasserstress. In tropischen und subtropischen Gebieten mit ausgeprägten Trocken- und Regenzeiten sind Wälder durch ihre hohe Verdunstung und großen Wasserrückhalt auch entscheidend für die Stabilisierung des Bodens. Oft sind Bäume dort die einzige Vegetation, die mit ihren tiefen Wurzeln auch nach langer Trockenheit noch Nahrung für Mensch und Tier bereitstellen. In der subtropischen Passatregion tragen Wälder durch Nebelinterzeption häufig auch entscheidend zum Wasserdargebot der sonst sehr trockenen Regionen bei.

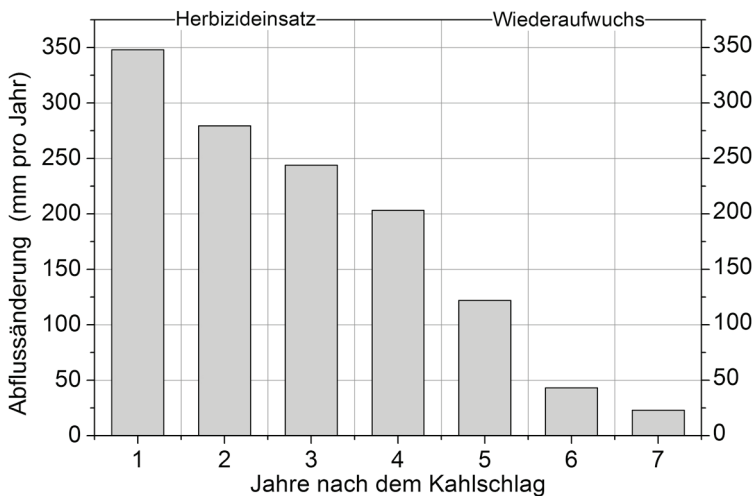
### Anthropogener Einfluss auf den Wasserhaushalt bewaldeter und unbewaldeter Einzugsgebiete

Der anthropogene Einfluss auf den Wasserhaushalt bewaldeter Einzugsgebiete erfolgt durch

- forstliche Maßnahmen (Auflichtung, Kahlschlag, Neubepflanzung, Bodenbearbeitung)
- Deposition von Spurengasen und Aerosolen (Waldschäden, Bodenversauerung etc., aber auch Düngung)

Die Auswirkung forstlicher Maßnahmen auf den Wasserhaushalt kann durch Kahlschlags- und sogenannte »Zwillingsexperimente« untersucht werden. Beim ersteren wird eine Versuchsfläche kahlgeschlagen, ggf. mit Herbiziden behandelt und anschließend die Änderung des Abflusses bei Neubewuchs über mehrere Jahre verfolgt (Abb. 1.10-4). Im anderen Fall wird ein bewaldetes Gebiet forstlich behandelt und bei sonst gleichen Bedingungen mit vorangelaufenen Beobachtungen im ungestörten Zustand verglichen.

Die Verringerung des Abflusses in einem bewaldeten Einzugsgebiet führt jedoch i. allg. nicht zu einer Unterversorgung des Zielgebietes mit Wasser, da bewaldete Landoberflächen den Gebietsabfluss verzögern



**Abb. 1.10-4:** Änderung des Abflussverhaltens nach einem forstlichen Kahlschlagsexperiment im Hubbard Brook-Einzugsgebiet (NH, USA) (nach HORNBECK & FEDERER 1975).

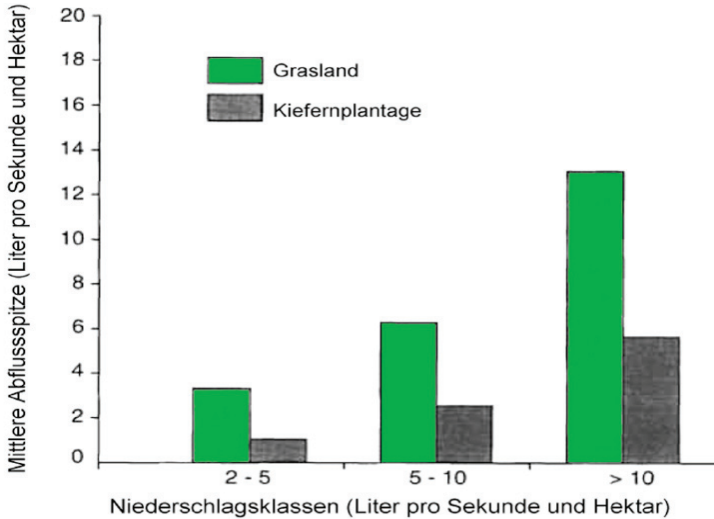
und gleichmäßiger über längere Perioden verteilen. Bewaldete Einzugsgebiete haben eine besondere Schutzfunktion vor Hochwasser, v.a. bei lokalen sommerlichen Starkniederschlagsereignissen (Abb. 1.10-5).

Neben Feldexperimenten werden Wasserhaushaltsmodelle verwendet, um die Auswirkungen einer potentiellen Landnutzungsänderung in einem bewaldeten Einzugsgebiet zu untersuchen. Zur Modelleichung und -validierung sind Einzugsgebiete mit langen Zeitreihen der gemessenen Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag und Abfluss nötig.

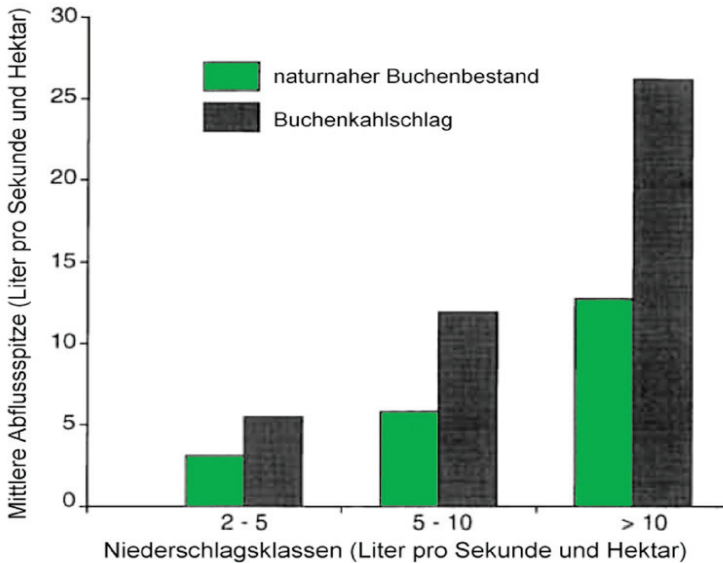
Abb. 1.10-6 zeigt die Entwicklung des Abflusses im Einzugsgebiet Wernersbach (durchgängig seit 1968 beprobtes Experimentalgebiet des Instituts für Hydrologie und Meteorologie der TU Dresden, Tab. 1.10-4) bei Umwandlung der Fichtenbestockung (Messwerte und Kont-

rolllauf des Abflusses für Altbestand) in Jungwuchs bzw. Brache. In Abb. 1.10-7 sind Ergebnisse des simulierten Grundwasserzustromes für unterschiedlich dichten Fichtenbestand und Brache im Wernersbach-Einzugsgebiet (gleiche Simulationen wie für Abb. 1.10-6) für den Referenzzeitraum 1969–2009 dargestellt (Box-Diagramme mit Mittelwert, Median, 1%, 5%, 25%, 75%, 95%, 99% Perzentilen und Extremen). Deutlich ragen dichter Nadelwald und Brache als Landnutzungen mit minimalem bzw. maximalem Abfluss heraus.

Die Schädigung des Waldes durch anthropogene Depositionen (v.a. Schwefeldioxid  $SO_2$ , Ozon  $O_3$  und Stickoxide  $NO_x$ ) führen i. allg. zu einer Erhöhung des Abflusses infolge Verringerung der Interzeption (Kronenverlichtung, Absterben einzelner Bäume) und Transpiration (Einschränkung der physiologischen



**Abb. 1.10-5:** Vergleich des Maximalabflusses zweier bewaldeter mit unbewaldeten Einzugsgebieten in Neuseeland für 3 Starkniederschlagsklassen:  
**oben:** Kiefernplantage vs. Grasland  
**unten:** naturnaher Buchenbestand vs. Buchenkahlschlag (aus: FAHEY 1994, überarbeitet)

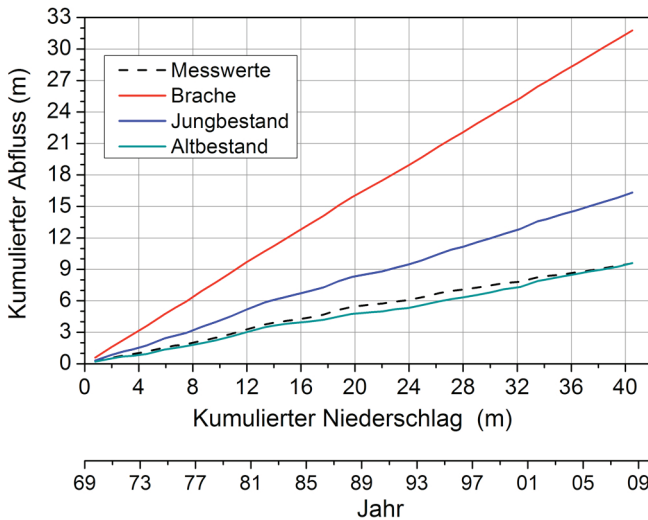


Funktionen der Bäume). Gleichzeitig nehmen Wälder aufgrund ihrer großen relativen Oberfläche wesentlich mehr Spurenstoffe auf als Kahlfächen. Viele Waldgebiete Europas verzeichneten bis in die 1990er Jahre einen langjährigen, anhaltenden Eintrag überwiegend saurer Immissionen – hauptsächlich von industriellen Großemittenten. Trotz des deutlichen Rückganges der Säureinträge seit Mitte der 1990er Jahre ist die Pufferwirkung der meist (bzgl. basischer Sättigung) armen Waldböden nach wie vor gering (MAKESCHIN & FÜRST 2007). Dazu hat u.a. auch der nach technischer Umrüstung der Emittenten weggefallene Eintrag alkalischer Stäube beigetragen, der in den Zeiten hoher Immissionsbelastung zu einer gewissen Kompensation der eher sauren Stoffeinträge geführt hat. Dadurch besteht nach wie vor eine deutlich erhöhte Belastung des Gebietsabflusses mit Spurenstoffen (z.B. Nitrate, Aluminium) gegenüber unbewaldeten Flächen (NEBE et al. 1998).

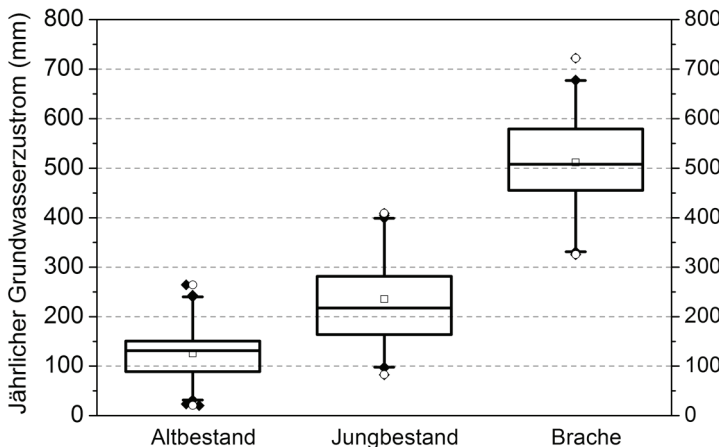
In den letzten Jahren zeichnet sich aufgrund konstant geringer Immissionswerte eine allmähliche Besserung der Wasserkontamination in den bewaldeten Einzugsgebieten Europas ab (Abb. 1.10-8). Allerdings muss die Verzögerung beim Durchgang des Bodens berücksichtigt werden, so dass im Einzelfall auch spätere Auswirkungen älterer Belastungen auftreten können.

**Schlussbemerkung**

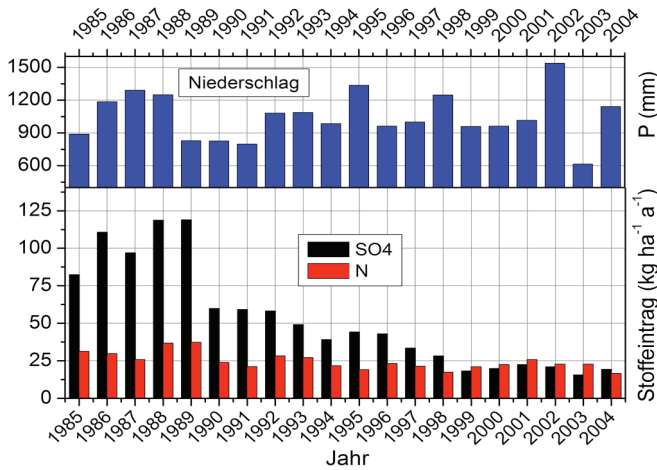
Bewaldete Landoberflächen spielen neben ihrer traditionellen Funktion als Rohstofflieferant eine herausragende Rolle für die Trinkwasserversorgung zahlreicher Ballungsräume, für den Hochwasser- und Lawinenschutz sowie für das Erholungsklima. Gleichzeitig sind bewaldete Wassereinzugsgebiete dem zunehmenden Bevölkerungsdruck mit einem größeren Bedarf an landwirtschaftlicher Nutzfläche sowie klassischen und mo-



**Abb. 1.10-6:** Doppelsummenkurve (Abfluss zu Niederschlag) des gemessenen Abflusses und der Modellläufe für Alt- und Jungbestand sowie Brache im Wernersbach-Einzugsgebiet. Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell BROOK90 (FEDERER et al. 2003), Zeitraum 1969–2009.



**Abb. 1.10-7:** Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung mit dem Modell BROOK90: Sickerwasserpassage (Grundwasserzustrom) für für Alt- und Jungbestand sowie Brache im Wernersbach-Einzugsgebiet im Zeitraum 1969-2009 (Inputdaten: TUD-Meteorologie).



**Abb. 1.10-8:** Jahresniederschlag und jährlicher Stoffeintrag (Schwefelsäure, anorganischer Stickstoff) an einem Waldstandort (Fichte) im Osterzgebirge (Oberbärenburg) (Datenquelle: [www.ioez.tu-freiberg.de](http://www.ioez.tu-freiberg.de)).

dernen Depositionsschäden ausgesetzt. Erste-res führt zu einem veränderten Abflussverhalten der Landoberflächen mit größeren Abflussmengen, aber auch größeren Hochwasserspitzen und verringerter Wasserqualität. Der verringerte Oberflächenabfluss bewaldeter Flächen führt einerseits zu einer stärkeren Tiefenversickerung und damit zu einer Verbesserung der Wasserqualität. Andererseits ist die Filterwirkung des Waldes (ober- und unterirdische Biomasse) bzgl. der Luftbeimengungen mit erhöhten Konzentrationen an aufgespeicherten Kationen und Anionen (z.B. Nitrate, Aluminium) verbunden, die die Wasserqualität beeinträchtigen. Die geringere Absolutmenge an Abfluss und Grundwasserneubildung im Wald erfordert eine überlegte Wiederaufforstung und Waldbewirtschaftung in Gebieten mit angespannter Grundwassersituation (z.B. Braunkohle-Tagebauebiete der Niederlausitz). Allerdings besitzen bewaldete Einzugsgebiete auch ein erhöhtes Potenzial zum lokalen Recycling von verdunstetem Wasser.

Insgesamt überwiegen die positiven Effekte bewaldeter Einzugsgebiete auf die Wasserversorgung, so dass die Erhaltung von zusammenhängenden und möglichst naturnahen Wäldern eine der Voraussetzungen zur Beherrschung künftiger regionaler und globaler Wasserprobleme darstellt.

### Literatur:

- BAUMGARTNER A. (1979): Wald und Wasser – Entwicklung und Stand. DVWK-Arbeitskreis. Parey Hamburg, Berlin.
- BAUMGARTNER A. & LIEBSCHER H.-J. (1990): Allgemeine Hydrologie. Berlin, Stuttgart. 673 pp.
- BERNHOFER C. (1999): Meteorologische Aspekte des Wasser- und Kohlenstoffhaushaltes auf Landschaftsebene. Deutscher Wetterdienst, Annalen der Meteorologie, 39, 16-18.
- BERNHOFER C., SPANK U., CLAUSNITZER F., KÖSTNER B., GRÜNWALD T., EICHELMANN U.,

PRASSE H., MENZER A., FEGER K.H. & SCHWÄRZEL K. (2011): Mikrometeorologische, pflanzenökologische und bodenhydrologische Messungen in Fichten- und Buchenbeständen des Tharandter Waldes. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz (in Begutachtung).

- BRYANT D., NIELSEN D. & TANGLEY L. (1997): Last frontier forests: Ecosystems and economies on the edge. World Resources Institute, 42 pp.
- DVWK-Merkblätter (1996): Merkblätter zur Wasserwirtschaft M-238: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. 135 pp.
- FAHEY B. (1994): The effect of plantation forestry on water yield in New Zealand. N.Z. J. For. 39(4), 18-25.
- FEDERER C.A., VÖRÖSMARTY C. & FEKETE B. (2003): Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. J. Hydrometeorology 4, 1276-1290.
- HORNBECK J. W. & FEDERER C.A. (1975): Effects of management practices on water quality and quantity: Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire; Symposium Proceedings, USDA Forest Service General Technical Report NE-13, Upper Darby, USA.
- MAIDMENT D. R. (Ed.) (1993): Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, 1424 pp.
- MAKESCHIN F. & FÜRST C. (2007): ENFORCHANGE. Wälder von heute für eine Umwelt von morgen. Statusbericht des BMBF-Verbundprojektes. TU Dresden, 162 pp. ([www.enforchange.de](http://www.enforchange.de)).
- NEBE W., ROLOFF A. & VOGEL M. (Hrsg.) (1998): Untersuchungen von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldbau. Forstwiss. Beitr. Tharandt 4, 255 pp.
- REHFUESS K. E. (1990): Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studentexte 29, Paul Parey Hamburg, 192 pp.

Dr. Valeri Goldberg

Prof. Dr. Christian Bernhoffer

Technische Universität Dresden

Institut für Hydrologie und Meteorologie

Pienner Str. 23 - 01737 Tharandt

[goldberg@forst.tu-dresden.de](mailto:goldberg@forst.tu-dresden.de)