Die Bedeutung der Waldböden für Wassermenge und -qualität in Einzugsgebieten

Karl-Heinz Feger[1], Raphael Benning[1] und Andreas Wahren[1,2]

[1] Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Technische Universität Dresden, Pienner Str. 19, D-01737 Tharandt, fegerkh@forst.tu-dresden.de, raphael.benning@tu-dresden.de
[2] Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH, Gerlinger Strasse 4, D-01728 Bannewitz, Wahren@Hydro-Consult.de

Am Beispiel längerfristiger hydrologischer und biogeochemischer Messungen und darauf gestützter Modellierung des Gebietswasserhaushalts wird für das Erzgebirge (Sachsen, Deutschland) der Einfluss der Waldböden auf wasserbezogene Ökosystemdienstleistungen verdeutlicht. Die Wasserqualität wird durch Überlagerung natürlicher Bodenprozesse (v.a. Podsolierung) und Nachwirkung der früher extrem hohen Schwefel-Belastung bestimmt. Problematisch aus Sicht der Wasserversorgung sind gelöste Huminstoffe, allerdings mit boden-/standortsabhängiger Differenzierung. Im Vergleich zur Agrarnutzung sind Stickstoff- und Phosphor-Austräge sehr gering. Simulationen mit Landnutzungsszenarien unterschiedlich grosser Waldanteile lassen erkennen, dass der Abfluss zurückgeht, die Hochwasserretention aber ansteigt. Künftige Herausforderungen für Wissenschaft und Planung liegen in einer stärkeren Verknüpfung von Wasserqualität und -menge.

1 Hintergrund

Wälder spielen im Wasserhaushalt von Landschaften eine bedeutende Rolle. Ein hoher Waldanteil im Einzugsgebiet gilt als Garant für eine gute Rohwasserqualität für die Trinkwasserversorgung. Waldbestockung wirkt sich günstig auf den Wasserrückhalt aus. Wasserschutz ist daher integraler Bestandteil einer am Prinzip der Nachhaltigkeit orientierten Waldbewirtschaftung. So formulierte bereits 1993 die Europäische Forstministerkonferenz in Helsinki (MCPFE 1993): *«Die Methoden der Waldbewirtschaftung sollten angemessene Rücksicht auf den … Schutz der Qualität und Quantität des Wassers … und den Schutz gegen Hochwasser … nehmen.»* Die Warschau-Konferenz (MCPFE 2007) widmete dem Thema «Wald und Wasser» sogar eine eigene Resolution. Darin wird gefordert, die Leistungen von Wäldern in Bezug auf Wassermenge und -qualität und den Hochwasserschutz zu bewerten und in ein System von Zahlungen von Ökosystemdienstleistungen zu integrieren, um die allgemeinen Schutzleistungen von Wäldern zu gewährleisten.

Die Anforderungen an eine dem Management der Ressource Wasser angepasste Waldbewirtschaftung variieren regional und standörtlich. Im einen Fall steht das Wasserangebot, im anderen die Wasserqualität oder die Steuerung des Oberflächenabflusses im Vordergrund. Dabei geht es nicht allein um etablierte Waldflächen, sondern auch um solche, wo eine Waldbestockung geschaffen werden sollte, damit bestimmte Leistungen künftig besser erfüllt werden. Da Wasserwirtschaft jedoch auf wesentlich grösseren räumlichen Skalenebenen, meist für Flusseinzugsgebiete, abläuft als die forstliche (und selbstverständlich auch die landwirtschaftliche) Nutzung, ist häufig unklar, welche Effekte die Landnutzung beziehungsweise deren Änderung hat. Unklar ist meist auch, an welchem Ort im Einzugsgebiet wasserbezogene Ökosystemdienstleistungen entstehen und in welcher Menge, Intensität und zeitlicher Dauer sie einem Nutzer, das ist meist die Allgemeinheit, zur Verfügung gestellt werden und wie sich diese Leistungen durch verschiedenste Einflüsse verändern (Brauman *et al.* 2007). Die Gewinnung relevanter Informationen und der Skalentransfer sind daher wesentliche Aufgabe der (forst-) hydrologischen Forschung (vgl. Pilaš *et al.* 2010). Darüber hinaus gewinnen solche Informationen eine zunehmende Bedeutung für die Umsetzung von Regelungen auf EU-Ebene (Wasserrahmenrichtlinie, Hochwasserrichtlinie).

Den Böden kommt bei den komplexen Wechselwirkungen des Wassers auf seinem Weg durch das Einzugsgebiet eine zentrale Bedeutung zu. Daher sind deren Funktionen als Filter, Puffer, Speicher und Transformatoren entsprechend zu erfassen und zu bewerten. Zu berücksichtigen sind dabei die Vielfalt der Böden als Ergebnis der Pedogenese aber auch die meist sehr jungen Veränderungen in Folge menschlicher Aktivitäten (vgl. Leitgeb *et al.* 2013).

Im Beitrag wird an ausgewählten Beispielen aus dem östlichen und mittleren Erzgebirge in Sachsen gezeigt, wie Waldböden sich im Hinblick auf wasserwirtschaftlich relevante Leistungen verhalten und wie sich diese Erkenntnisse künftig auf die Skala grösserer Einzugsgebiete transferieren lassen. Das Erzgebirge besitzt die grösste Waldfläche in Sachsen und hat eine entsprechend grosse forstwirtschaftliche Bedeutung. Gleichzeitig gibt es zahlreiche Talsperren, welche der Trinkwasserversorgung (etwa der Ballungsräume Chemnitz und Dresden) aber auch dem technischen Hochwasserschutz dienen. Aus der historischen Entwicklung heraus (Versorgung der Bergbausiedlungen) ist der Landwirtschaftsanteil an der Flächennutzung auch heute noch bedeutsam. Dort wo es die Bodenverhältnisse zulassen, ist selbst in den Kammlagen noch Ackerbau anzutreffen. Eine optimierte Steuerung der Talsperren im Hinblick auf Mengen- und Qualitätsziele benötigt daher umfangreiche Informationen, nicht zuletzt als Ergebnis interdisziplinärer Forschung zum Landnutzungseinfluss (Feger und Wahren 2008).

2 Wasserqualität

2.1 Langfristiger Einfluss von Schadstoffeinträgen über die Luft

Die extrem hohen SO_2-Emissionen aus der ungefilterten Verbrennung von Braunkohle führten seit Ende der 1970er Jahren im Erzgebirge nicht nur zu den bekannten Waldschäden, sondern hatten auch beträchtliche Veränderungen der boden- und gewässerchemischen Bedingungen zur Folge (vgl. Armbruster *et al.* 2003, 2004, 2005).

Die Gewässer waren durch einen starken Versauerungseinfluss geprägt, der sich in den pufferschwachen Böden aus Gneisen und Graniten durch pH-Werte < 5 sowie stark erhöhte Konzentrationen von Al-Ionen äusserte. Als Ursache ist die hohe S-Belastung anzusehen, welche sich in der Dominanz der Ionenbilanz durch Sulfat zeigte (Abb. 1a). In Mittelgebirgen mit geringerer atmogener Belastung war der Depositionseinfluss auf den Gewässerchemismus bei vergleichbaren Puffereigenschaften der Gesteine und Böden weit geringer (z.B. Südschwarzwald: Abb. 1b).

Anfang/Mitte der 1990er Jahre ging nach Einführung und Umsetzung umfangreicher Luftreinhaltungsmassnahmen die S-Depositionsbelastung stark zurück. Dies bewirkte eine deutliche Erholung der Gewässerqualität (Tab. 1). Der pH-Wert stieg deutlich an. Die besonders deutliche Abnahme der Sulfat-Konzentrationen auf der Anionenseite wurde durch eine Abnahme der Al-Konzentrationen begleitet. Auch Mn und weitere Schwermetalle (nicht gezeigt) nahmen deutlich ab. Standortsökologisch bedeutsam ist auch, dass die Austräge der basischen Kationen Ca^{2+} und Mg^{2+} (beides sind wichtige Pflanzennährstoffe) durch den Sulfat-Rückgang und entsprechend geringere Pufferbeanspruchung ebenfalls deutlich zurückgingen.

Wasserwirtschaftlich relevant sind die heute deutlich höheren Konzentrationen an gelöster organischer Substanz (DOC). Die Wasserversorger müssen einen höheren Aufbereitungsaufwand betreiben, um diese braungefärbten Huminstoffe aus dem Rohwasser zu entfernen. Der in vielen Mittelgebirgsgewässern in Mittel-/Nordeuropa und Nordamerika seit etwa 20 Jahren festgestellte langsame Anstieg der DOC-Konzentrationen (z.B. Evans *et al.* 2006) ist auf eine veränderte chemische Zusammensetzung des Sickerwassers infolge einer verringerten atmogenen Depositionsbelastung zurückzuführen (vgl. Sucker und Krause 2010). Interessant ist auch, dass die relativ niedrigen P-Austräge in jüngerer Zeit etwas angestiegen sind. Dies beeinflusst den Trophiezustand der Talsperren, wo die Einträge aus der Landwirtschaft und dem Siedlungsbereich seit Anfang/Mitte der 1990er Jahre stark zurückgingen (Reichelt 2012).

Betrachtet man die zeitliche Variabilität von Oberflächenwässern aus Waldgebieten mit multivariaten Statistikmethoden, so kommt neben der mehr oder weniger deutlichen Überprägung durch den S-Eintrag und die Sulfat-Dominanz auch der Einfluss des Gestein-/Bodenfaktors deutlich zum Vorschein. In den basenarmen Mittelgebirgen ist als prägender (natürlicher) Bodenprozess vorrangig die Podsolierung erkennbar. Hier ist nicht nur der Podsolierungsgrad entscheidend, sondern auch der Anteil des oberflächennahen Abflusses (Interflow). Dieser führt vor allem bei Schneeschmelze und Starkregen dazu, dass die Filter- und Pufferkapazität der Unterböden besonders bei vernässten und sickerschwachen Böden weniger zur Geltung kommt (vgl. Feger und Brahmer 1986; Menzer und Feger 2005). Insofern ist also der Oberbodenzustand und damit auch die Podsolierung, die waldbaulich beeinflusst werden kann, wichtig für die Wasserqualität.

Die Erholung der Gewässerqualität, die bislang stark durch die atmogene Versauerung geprägt war, zeigt

Tab. 1. Übersicht über die langfristige Entwicklung ausgewählter Wasserqualitätsparameter im Rotherdbach-Einzugsgebiet für drei Zeitscheiben. Angegeben sind die Mittelwerte der jeweiligen Zeitperiode (aus Benning und Feger 2013).

Zeitraum	1994–1999	2000–2005	2006–2011
pH-Wert	4,3	4,3	4,6
Leitfähigkeit (µS)	148	121	103
NO_3^- (µmolc L^{-1})	132	73	51
SO_4^{2-} (µmolc L^{-1})	715	431	338
Al^{3+} (µmolc L^{-1})	279	121	96
Phosphat-P (µg L^{-1})	–	29	142
∑ basische Kationen (ohne Na^+)	609	498	407
DOC (mg L^{-1})	–	3,3	4,4

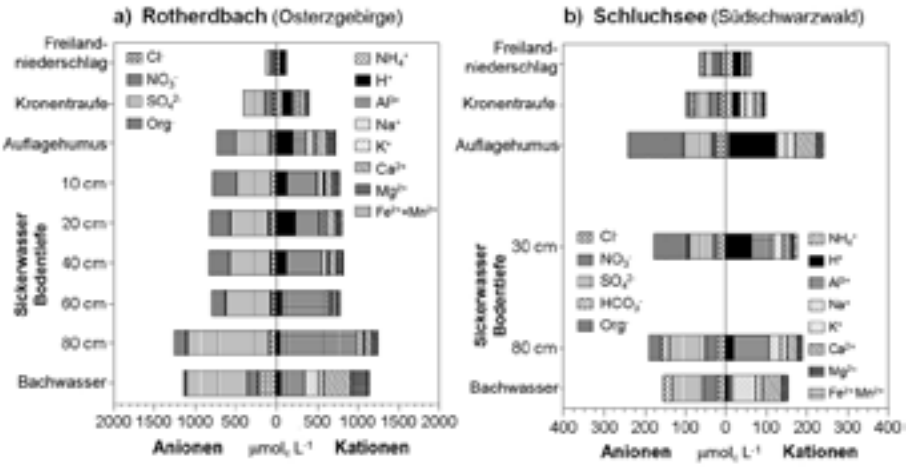


Abb. 1. Ionenbilanzen von zwei Experimental-Wassereinzugsgebieten mit Fichtenbestockung aus Granitpodsolen im östlichen Erzgebirge (links) und Südschwarzwald (rechts); Mittelwerte aus den Beobachtungzeiträumen 1994–1999 beziehungsweise 1988–1998 (beachte die unterschiedliche Skalierung der x-Achsen; Organische Anionen [aus Anionendefizit] aus Armbruster *et al.* 2003).

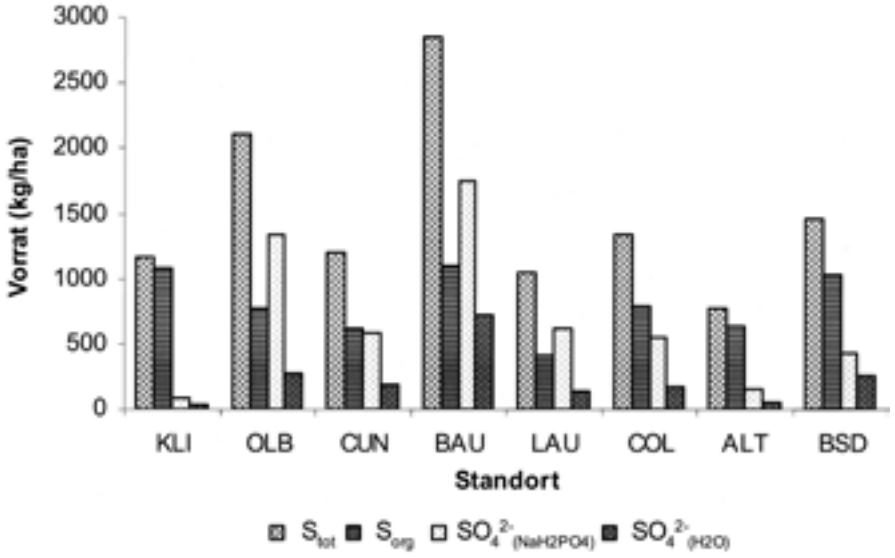


Abb. 2. Vorräte der Schwefel-Bindungsformen in den Waldböden der 8 Level-II-Standorte in Sachsen (Stot = Gesamt-S, Sorg = organisch gebundender S; weitere Fraktionen sind austauschbarer und wasserlöslicher Sulfat-S); aus: Wunderlich *et al.* (2006).

eine deutliche Verzögerung. Betrachtet man S-Eintrag-/Austrag-Bilanzen, so wird deutlich, dass die Waldökosysteme im Erzgebirge (wie auch an anderen Waldstandorten Mitteleuropas, aber in einem viel stärkeren Masse) den Schwefel aus der S-Deposition früherer Jahre im Boden akkumuliert haben (Abb. 2). Vor diesem Hintergrund fungieren die Böden daher als S-Quelle. Für den Bodenschutz bedeutsam ist dabei, dass ein beträchtlicher Teil dieser S-Vorräte in den Böden organisch gebunden ist und damit in ähnlicher Weise wie N mikrobiellen Umsetzungen unterworfen ist. Störungen des Humuskörpers (z.B. durch starke Bestandesauflichtung etwa nach Windwürfen, Schneebruch, Insektenkalamitäten) können daher analog zu Nitrat zu Versauerungsschüben mit entsprechenden Austrägen von Kationen führen (vgl. Feger 1998).

2.2 Wirkung von Bodenschutzkalkungen

Grossflächige Kalkungen haben in der forstlichen Praxis einiger deutscher Bundesländer seit den 1990er Jahren weite Verbreitung gefunden. Dabei überlagern sich häufig ganz unterschiedliche Ziele: Bodenmelioration, Säurekompensation, Düngung, Boden- bzw. Grundwasserschutz (vgl. Feger 1996). Ein häufig genanntes Ziel von Kalkungsmassnahmen besteht auch darin, das Quell- und Grundwasser vor Schwermetall-, Aluminium- und Säureeinträgen zu schützen. Diesen Motiven stehen allerdings eine Reihe möglicher Risiken gegenüber: vorrangig eine erhöhte Auswaschung von Nitrat als Folge einer angekurbelten mikrobiellen Humusumsetzung und Überschuss-Nitrifikation sowie eine Mobilisierung von DOC (Feger 1996). Auch die Mobilisierung von organisch gebundenem Boden-Schwefel wird hier diskutiert (s.o.; Feger 1998). Ein Anstieg beider Parameter hätte Konsequenzen für die Trinkwassergewinnung.

Die aus Untersuchungen der Zusammensetzung des Bodensickerwassers auf Standortsebene abgeleitete kritische Bewertung von Waldkalkungen im Hinblick auf die Wasserqualität (z.B. Beese und Meiwes 1995; Kreutzer 1995) relativiert sich allerdings, wenn man Kalkungsexperimente auf der Skala kleiner Einzugsgebiete betrachtet. So zeigte die einmalige Ausbringung von 4 t ha^{-1} dolomitischem Kalk im Südschwarzwald (Gebiet Schluchsee) und Osterzgebirge (Rotherdbach) insgesamt nur geringe Auswirkungen auf die chemische Zusammensetzung des Gebietsabflusses (Armbruster *et al.* 2004). Die Lösung des oberflächlich ausgebrachten Dolomitkalkes schreitet nur sehr langsam voran. Wie wiederholte Bodeninventuren in den ARINUS-Experimental-Einzugsgebieten im Südschwarzwald zeigten, hatte die Kalkung nur eine geringe bodenchemische Tiefenwirkung (das heisst höhere Basensättigung und höhere pH-Werte) (Raspe und Feger 1998). Somit waren die Austauschgleichgewichte im Mineralboden kaum verändert, die chemische Zusammensetzung des tieferen Sickerwassers variierte kaum. Bei erhöhten Abflüssen war nach Kalkung allerdings eine leicht verbesserte Säurepufferung zu beobachten. In beiden gekalkten Einzugsgebieten zeigte sich im Bachwasser keine Reaktion bei Nitrat. Ein erhöhter Nitrat-Austrag nach Waldkalkung dürfte wohl am ehesten dort auftreten, wo sich klare Indikatoren einer N-Sättigung des Waldökosystems zeigen (Beispiel: stadtnahe Wälder im Ballungsraum Rhein-Neckar: Feger 2007). Bei DOC ist zu beachten, dass in den letzten Jahren ein genereller Trend in Richtung höherer Austräge aus Waldböden feststellbar ist, wofür Bodenschutzkalkungen als Hauptursache aber ausscheiden (vgl. Evans *et al.* 2006; Sucker und Krause 2010).

2.3 Einfluss der Landnutzung im Einzugsgebiet

Das Trinkwasser für die Region Dresden stammt zu einem grossen Teil aus dem im Erzgebirge gelegenen Talsperrensystem Klingenberg/Lehnmühle (Abb. 3). Beim Hauptzufluss der Talsperre Lehnmühle hat das Gebiet eine Flächengrösse von etwa 51 km^2 (am Pegel Ammelsdorf); die Höhenlage variiert von 520 m ü.M. im nördlichen Teil bis zu 800 m ü.M. im südlichen Teil. Die Landnutzung entspricht der für Mittelgebirgsregionen charakteristischen Verteilung: ~ 52 Prozent Wald, ~ 34 Prozent Grünland und ~ 9 Prozent ackerbauliche Nutzung. Der mittlere jährliche Niederschlag beträgt ~1080 mm, die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 4,9 °C. Im Einzugsgebiet sind hauptsächlich basenarme Braunerden und Podsole zu finden, die sich aus den silikatischen Grundgesteinen entwickelt haben. Um die Stoffausträge einzelner Landnutzungen erfassen zu können, wurden für die drei Hauptlandnutzungen Acker, Grünland und Wald jeweils Kleinsteinzugsgebiete ausgesucht, in denen je eine dieser Nutzungen dominiert (vgl. Benning

und Feger 2013). Deren standörtliche Ausstattung ist für das mesoskalige Einzugsgebiet repräsentativ. Die beiden näher untersuchten Waldgebiete Kohlgrundbach (20,4 ha, Muskovit-Gneis, tiefgründige Braunerden) und Rotherdbach (9,4 ha, Granitporphyr, flach- bis mittelgründige Podsole) sind mit Fichte bestockt.

Die in den beiden Messjahren 2010 und 2011 ermittelten Stoffausträge für Nitrat-N, Gesamt-P und DOC sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Stoffausträge aus Acker und Grünland sind deutlich höher als aus dem mit Wald bestockten Einzugsgebiet (Kohlgrundbach). Der höchste Nitrat-Austrag wurde mit durchschnittlich 51 kg ha^{-1} a^{-1} bei Acker gemessen. Der Nitrat-N-Austrag bei Grünland betrug im Mittel 30 kg ha^{-1} a^{-1}. Demgegenüber war der Nitrat-N Austrag aus Wald mit durchschnittlich 4 kg ha^{-1} a^{-1} sehr gering. Die hohen Austräge aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen sind auf die regelmässige N-Zufuhr über Mineraldüngung und Gülleausbringung zurückzuführen. Die gemessenen Gesamt-Phosphor-Austräge zeigen ähnliche Unterschiede zwischen den einzelnen Landnutzungen. Die höchsten durchschnittlichen P-Austräge wurden bei Acker (0,25 kg ha^{-1} a^{-1}) gemessen, gefolgt vom Grünland (0,15 kg ha^{-1} a^{-1}) und wesentlich geringerem Austrag unter Wald (0,04 kg ha^{-1} a^{-1}). Sowohl die Austräge aus Wald als auch aus den landwirtschaftlichen Flächen sind als gering einzuschätzen. Auf den beiden landwirtschaftlichen Flächen erfolgt seit mehr als zehn Jahren allerdings keine P-Düngung mehr und die Bewirtschaftung wurde auf konservierende Bodenbearbeitung umgestellt.

Tab. 2 Austräge der Stoffe Nitrat-Stickstoff (NO_3-N), Gesamt-Phosphor (GP) und gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) aus den definierten Landnutzungen Acker, Grünland und Wald im Einzugsgebiet der Talsperre Lehnmühle für die Jahre 2010 und 2011.

	2010			2011		
kg ha^{-1} a^{-1}	NO_3-N	GP	DOC	NO_3-N	GP	DOC
Acker	49,3	0,22	4,2	52,1	0,28	3,9
Grünland	38,5	0,18	16,77	20,5	0,11	7,6
Wald	5,0	0,05	9,56	3,6	0,02	5,3



Abb. 3. Darstellung der Lage der Einzugsgebiete: In blau ist das Einzugsgebiet des Zuflusses zur Talsperre Lehnmühle (Pegel Ammelsdorf, Wilde Weisseritz) dargestellt, innerhalb dessen die Kleinsteinzugsgebiete Grünland (hellgrün) und Wald (dunkelgrün, Kohlgrundbach) liegen. In braun ist das Kleinsteinzugsgebiet Acker dargestellt. Rot gekennzeichnet ist das Kleinsteinzugsgebiet des Rotherdbachs (Level-II Messfläche).

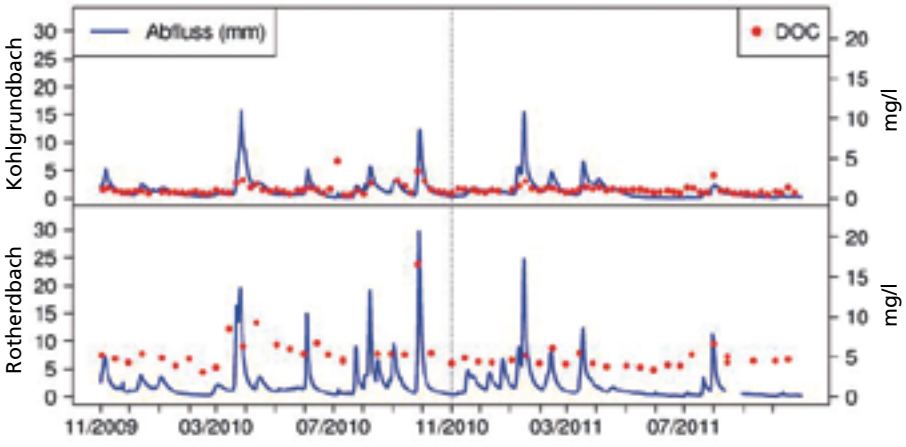


Abb. 4. Zeitreihen der Konzentration an gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) in den Bachwässern des Kohlgrund- und Rotherdbachgebietes für die hydrologischen Jahre 2010 und 2011.

Der Austrag von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) war bei Acker am geringsten. Die höchsten DOC-Austräge wurden überraschenderweise aus dem Grünland gemessen; die Austräge aus Wald lagen dazwischen. Die partielle Drainage und der Anteil hydromorpher Böden (Gleye) im Grünlandgebiet dürfte eine wesentliche Ursache für die hohen Austräge sein, da der DOC-Austrag sehr stark an den Durchfluss und vor allem an Abflussspitzen gekoppelt ist.

Hinsichtlich der DOC-Austräge aus dem Wald wirken die Bodenverhältnisse stark differenzierend (Abb. 4). Im Rotherdbach (Granit-Podsol) ist die mittlere Konzentration um ca. Faktor 5 höher als im Kohlgrundbach (Gneis-Braunerde). Betrachtet man die zeitliche Dynamik, so schwanken die DOC-Konzentrationen im Kohlgrundbach weniger als im Rotherdbach, wo deutliche Peaks erkennbar sind, die mit Abflussspitzen korrelieren. Diese

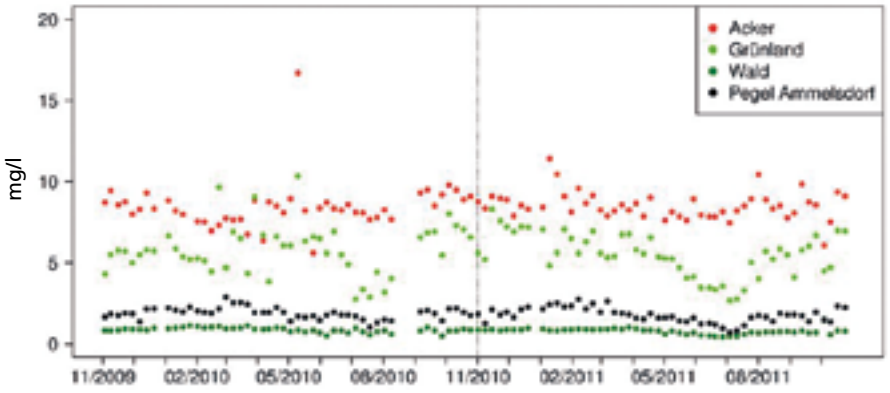


Abb. 5. Vergleichende Darstellung der Zeitreihen der Nitrat-N-Konzentrationen in den drei Kleinsteinzugsgebieten Acker, Grünland und Wald (Kohlgrundbach) sowie im Gesamteinzugsgebiet (Zufluss Talsperre Lehnmühle, Pegel Ammelsdorf). Dargestellt für die beiden hydrologischen Jahre 2010 und 2011.

Unterschiede sind durch Zusammenwirken von unterschiedlicher Bodenchemie und Art der Abflussbildung (Interflow-Anteil) bedingt.

Am Zufluss zur Talsperre Lehnmühle ist die Wirkung des Waldes im mesoskaligen Gesamteinzugsgebiet gut erkennbar (Abb. 5). Die mittlere Nitrat-N-Konzentration am Pegel Ammelsdorf betrug 1,8 mg L^{-1}. Sie ist damit höher als die im Kleineinzugsgebiet im Wald gemessene Konzentration, aber deutlich niedriger als die Konzentration im Bachwasser der landwirtschaftlichen Flächen. Der relativ hohe Waldanteil im Gesamteinzugsgebiet (Pegel Ammelsdorf) führt offenbar dazu, dass die Nitrat-Belastung aus landwirtschaftlichen Flächen nahezu kompensiert werden.

3 Veränderte Waldanteile – Auswirkungen auf die Gebietsabflüsse

Inwieweit eine Erhöhung der Waldbestockung zu einer Verbesserung der Wasserqualität führt, lässt sich im Hinblick auf eine wasserwirtschaftliche Gesamtbewertung nicht vom Aspekt veränderter Wassermengen (Gebietswasserspenden) trennen. Um abzuschätzen, wie sich Art und Intensität der Landnutzung im Einzugsgebiet auf den Wasserhaushalt auswirken, hat sich die Anwendung von räumlich-verteilten Prozessmodellen gut bewährt. Für das Einzugsgebiet des Schlettenbach (6,8 km^2) bei Marienberg im mittleren Erzgebirge modellierten wir den Gebietswasserhaushalt mit dem GIS-basierten Wasserhaushaltsmodell AKWA-M. Details zum Modell und zur Modellierung sind bei Münch *et al.* (2007) sowie Wahren *et al.* (2008a, 2012) erläutert. Ein besonderer Schwerpunkt bei der Modell-Implementierung wurde auf die Anpassung der Bodenparameter bei Landnutzungswechsel von Acker zu Wald gelegt. Der Ansatz basiert auf der Ermittlung bodenhydraulischer Kenngrössen an Bodenprofilen in einer unechten Zeitreihe, die unterschiedliche Zeiträume nach Aufforstung eines Ackerstandortes repräsentieren (Wahren *et al.* 2009).

Modellläufe erfolgten für den Zeitraum der hydrologischen Jahre 1985 bis 2001. Neben der aktuellen Landnutzung erfolgte die Simulation von fünf verschiedenen Landnutzungsszenarien mit unterschiedlich grossen Waldanteilen (Abb. 6, Tab. 3). Dabei siegeln SZ1 bis SZ4 vier sozioökonomische begründete Szenarien wider (Wahren *et al.* 2008b). Ein weiteres (selbstverständlich vollkommen hypothetisches) Szenario ist die vollständige Bewaldung mit einem natürlichen Bergmischwald.

Der unterschiedlich grosse Waldanteil und die unterschiedliche räumliche Verteilung bedingen deutliche Verschiebungen in den Wasserhaushaltskomponenten (Tab. 4). Besonders die bei Waldbestockung höhere Interzeptionsverdunstung bewirkt eine Reduktion des Gebietswasserabflusses zwischen 1 Prozent und 24 Prozent (vollständige Bewaldung) im Vergleich zur aktuellen Landnutzung. Diese Zahlen beziehen sich auf das langjährige Mittel. In Einzeljahren ist eine noch höhere Minderung des Gebietsabflusses möglich. Aus Sicht der Wassermengenwirtschaft (Talsperrennutzung) ist dies als relevantes Defizit zu werten. Die Minderung des jährlichen Gebietsabflusses dürfte unter den Bedingungen des Klimawandels noch höher ausfallen (Feger und Wahren 2008). Bei höheren Waldanteilen ergibt sich eine deutlich verbesserte Hochwasserretentionsleistung (Quantifizierung für einzelne Hochwasserereignisse bei Wahren *et al.* 2012).

4 Konsequenzen für den Bodenschutz und Perspektiven

Die mit Waldvegetation bestockten Teile der Wassereinzugsgebiete üben eine insgesamt sehr positive, aber standörtlich differenzierte Wirkung auf die Wasserqualität aus. Deren Erfassung und Bewertung stellt daher eine wesentliche Grundlage der forstlichen Bewirtschaftung und ggf. auch für eine mögliche Steuerung und Honorierung wasserbezogener Ökosystemdienstleistungen auf Gesamteinzugsgebietsebene dar.

Betrachtet man die Waldböden, so zeigt sich eine Überlagerung natürlicher Prozesse (v.a. Podsolierung) und der Nachwirkung der früher extrem hohen Schwefel-Belastung. Dies ist bei der Waldbewirtschaftung zu berücksichtigen. Besonderes Augenmerk verdient hier der Humuskörper. Denn Störungen (z.B. durch starke Bestandesauflichtung etwa nach Windwürfen, Schneebruch, Insektenkalamitäten, möglicherweise auch durch mechanische Schäden) können hier zu verstärkten Austrägen von Nitrat, Sulfat und entsprechenden Begleitkationen führen. Dies gilt besonders auch für gelöste Huminstoffe (messbar als DOC), die aufgrund veränderter bodenchemischer Bedingungen seit Rückgang der starken Depositionsbelastung zudem einen allgemein ansteigenden Trend zeigen. Erhöhte DOC-Befrachtung bei gleichzeitig zurückgehenden Gesamtelektrolyt-Konzentrationen erfordern bei der Aufbereitung des Rohwassers verstärkte technische Aufwendungen.

Der DOC-Austrag aus dem Wald zeigt aber eine boden-/standortsabhängige Differenzierung. Auf Gesamteinzugsgebietsebene können ausserdem auch DOC-Austräge aus Grünland und Moorflächen relevant sein.

Im Vergleich zur Agrarnutzung sind N- und P-Austräge sehr gering. Daher empfehlen sich hohe Waldanteile im Einzugsgebiet gerade von Trinkwassertalsperren. Simulationen mit Landnutzungsszenarien unterschiedlich gros-

Tab. 3. Flächenanteile (%) der für die Simulation des Schlettenbach-Gebietswasserhaushalts verwendeten Landnutzungsszenarien (IST – aktuelle Landnutzung, nach Color-IR-Aufnahme 1992/93), SZ 1 (WM) – Szenario 1 «World Markets»; SZ 2 (NE) – Szenario 2 «National Enterprise»; SZ 3 (GS) – Szenario 3 «Global Sustainability»; SZ 4 (LS) – Szenario 4 «Local Stewardship» – vgl. Karten in Abb. 6; PNV – vollständige Bewaldung entsprechend der potenziell natürlichen Vegetation); Details in Wahren *et al.* (2008b).

	Wald													
Szenario	Wald gesamt	Naturnaher Mischwald	Kahlschlagflächen	Naturferner Fichtenreinbestand (Alter 10 a)	Naturferner Fichtenreinbestand (Alter 30 a)	Naturferner Fichtenreinbestand (Alter 70 a)	Feuchtwald	Intensives Grünland	Extensives Grünland	Konventioneller Ackerbau	Konservierender Ackerbau	Siedlungen	Hecken und Obstgehölze	versiegelt
IST	35	4			29		2	41	11	7		4		2
SZ1 (WM)	81	0	11	11	19	34	6		12			4		3
SZ2 (NE)	44	0			38		6	41				4	9	2
SZ3 (GS)	53	43					10				42	3	1	1
SZ4 (LS)	63	54					9		15		18	2	1	1
PNV	99	87					12					1		

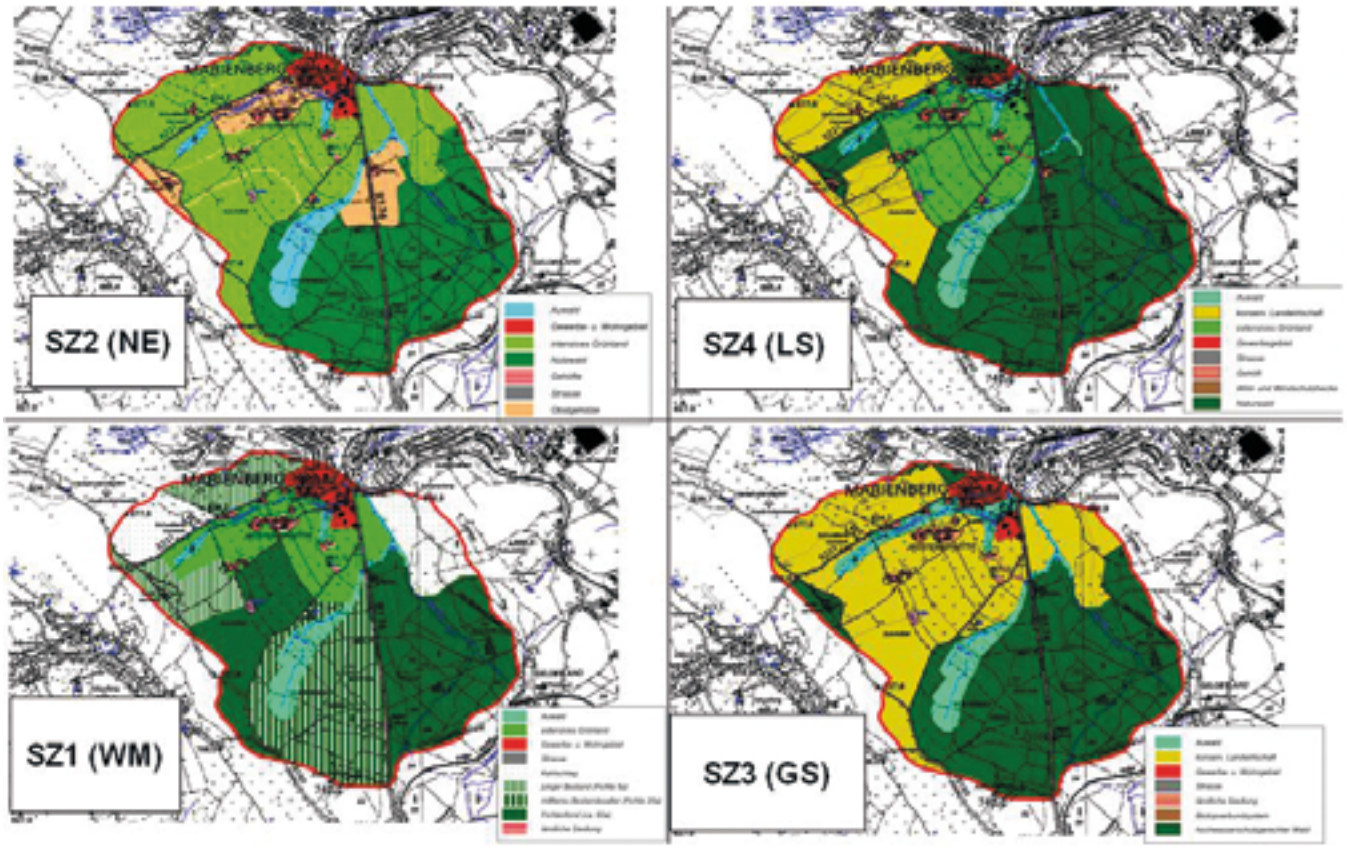


Abb. 6. Vier sozio-ökonomisch begründete Landnutzungsszenarien für das Schlettenbach-Einzugsgebiet (6,8 km²) bei Marienberg im mittleren Erzgebirge (aus Wahren *et al.* 2008b)

Tab. 4. Ergebnis der Simulation des Gebietswasserhaushalts für das Schlettenbach- Einzugsgebiet (6,8 km²) bei Marienberg im mittleren Erzgebirge (aus Wahren *et al.* 2008b). «Differenz» bezieht sich auf die relative Veränderung des Gebietsabflusses aus dem Vergleich zwischen dem aktuellen Zustand (IST) und fünf verschiedenen Landnutzungsszenarien (vgl. Abb. 6 und Tab. 3). WHH = Wasserhaushaltsjahr.

WHH 1985–2001	IST	SZ 1	SZ2	SZ3	SZ4	PNV
Niederschlag	972	972	972	972	972	972
reale Verdunstung	472	480	505	509	534	593
Transpiration	193	178	212	212	222	244
Interzeption	190	238	227	221	252	296
Abfluss	507	501	476	473	448	386
Differenz	–	–1%	–6%	–7%	–12%	–24%

ser Waldanteile machen deutlich, dass dann aber die Gebietsabflüsse zurückgehen. Hingegen steigen die Hochwasserretention und die damit verbundene Stoffretention im Einzugsgebiet an. Die Minderung der Abflüsse dürfte unter den Bedingungen des Klimawandels noch höher ausfallen. Diese komplexen Effekte sind bei längerfristigen Planungen zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund sollte eine Waldmehrung nicht unspezifisch auf der gesamten Fläche erfolgen, sondern dort wo die Retention gesteigert und der Stoffaustrag minimiert werden kann. Bei der Baumartenwahl sind Laubbäume (vorrangig Buche) der heute noch dominierenden Fichte vorzuziehen. Denn bei Fichte wirkt sich die höhere Interzeptionsverdunstung erniedrigend auf den Gesamtabfluss und damit die nutzbare Wassermenge aus. Gleichzeitig fördern hohe Fichtenanteile die Podsolierung und damit unter Umständen den Huminstoffaustrag. Die Tanne als Baumart der natürlichen Waldgesellschaft, die nutzungsbedingt und aufgrund der hohen Luftverschmutzung im Erzgebirge stark zurückgegangen ist, in jüngerer Zeit waldbaulich aber wieder stark gefördert wird, ist hier positiv zu bewerten. Zum einen ist die Tannenstreu besser zersetzbar, zum anderen fördert die starke Tiefendurchwurzelung der Tanne die Tiefensickerung, sodass dadurch der oberflächennahe Wasser- und Stofftransport reduziert wird. Allerdings fehlen hierfür experimentelle Daten.

Eine differenzierte Bewertung der Veränderungen in den Wasserflüssen im Hinblick auf die Wasserqualität fehlt bislang. Ein einfacher Ansatz wäre hierfür eine «Verschneidung» von gemessenen Konzentrationen aus dem Monitoring und den Wasserflüssen aus der Modellierung der Wasserflüsse. Gerade aber die Effekte bei Landnutzungswandel (z. B. durch Aufforstung) sind aufgrund zahlreicher Wechselwirkungen nur schwer abschätzbar. Künftige Herausforderungen für die interdisziplinäre Waldforschung und die Einzugsgebietshydrologie liegen in einer stärkeren Verknüpfung von Wasserqualität und -menge sowohl hinsichtlich Monitoring als auch Modellierung.

Danksagung

Das Analysenprogramm im Einzugsgebiet der Talsperre Lehnmühle war Teil des BMBF-geförderten Verbundvorhabens REGKLAM (Entwicklung und Erprobung eines integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden). Ebenso danken wir dem Staatsbetrieb Sachsenforst (Dr. H. Andreae) für die freundliche Bereitstellung der Rohdaten der Level-II Messfläche Altenberg (Rotherdbach) und S. Wunderlich für die aus verschiedenen Forschungsprojekten zusammengestellten Daten für dieses Gebiet. Die Arbeiten im Schlettenbach-Einzugsgebiet erfolgten im Rahmen des im 6. EU-Forschungsrahmenprogramm geförderten Verbundvorhabens FLOODsite.

5 Literatur

Armbruster, M.; Abiy, M.; Feger, K.H., 2003: The biogeochemistry of two forested catchments in the Black Forest and the eastern Ore Mountains (Germany) Effects of changing atmospheric inputs on soil solution and streamwater chemistry. Biogeochemistry 65: 341–368.

Armbruster, M.; Abiy, M.; Feger, K.H., 2004: Wasserqualität in zwei bewaldeten Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Depositionsbelastung – Langfristige Veränderungen und Reaktion auf Kalkung. Forstl. Schriftenreihe Univ. Bodenkultur Wien 18, 118-142.

Armbruster, M.; Abiy, M.; Feger, K.H., 2005: Vergleichende Stoffbilanzierung von zwei bewaldeten Einzugsgebieten im Osterzgebirge und Südschwarzwald – Langfristige Tendenzen und Reaktion auf Kalkung. In: Nebe, W.; Feger, K.H. (Hrsg.) Atmosphärische Deposition, ökosystemare Stoffbilanzen und Ernährung der Fichte bei differenzierter Immissionsbelastung. Langjährige Zeitreihen für das Osterzgebirge und den Südschwarzwald. Ulmer-Verlag. Forstwiss. Beiträge Tharandt 22: 33–58.

Beese, F.; Meiwes, K.J., 1995: 10 Jahre Waldkalkung: Stand und Perspektiven. AFZ/Wald 50: 946–949.

Benning, R.; Feger, K.H., 2013: Der Beitrag von Waldflächen zur Sicherung der Rohwasserqualität in einem mesoskaligen Talsperren-Einzugsgebiet. Freiburger Forstl. Forschungen 96: 1–10.

Brauman, K.A.; Daily, G.C.; Duarte, TK; Mooney, H.R., 2007: The nature and value of ecosystem services: A focus on hydrology. Annual Review of Environment and Resources 32: 67–98.

Evans, C.D.; Chapman, P.J.; Clark, J.M.; Monteith, D.T.; Cresser, M.S., 2006: Alternative explanations for rising dissolved organic carbon export from organic soils. Glob. Chang. Biol. 12; 2044–2053.

Feger, K.H., 1996: Schutz vor Säuren. In: Blume, H.P.; Fischer, W.; Frede, H.G.; Horn, R.; Felix-Henningsen, P.; Stahr, K. (Hrsg.) Handbuch der Bodenkunde, Landsberg/Lech, Ecomed-Verlag, Kap. 7.6.2, 24 S.

Feger, K.H., 1998: Bedeutung natürlicher und anthropogener Komponenten im Stoffkreislauf terrestrischer Ökosysteme für die Zusammensetzung von Grund- und Oberflächenwasser (am Beispiel des Schwefelkreislaufes). Rat von Sachverständigen für Umweltfragen, Materialien

zur Umweltforschung 30. Stuttgart, Verlag Metzler & Poeschel, 118 S.

Feger, K.H., 2007: Bodenveränderungen auf Waldstandorten in der Nördlichen Oberrheinischen Tiefebene. Mitt. Österr. Bodenkdl. Ges. 74: 16–27.

Feger, K.H.; Brahmer, G., 1986: Factors affecting snowmelt streamwater chemistry in the Black Forest (West Germany) Water Air Soil Pollut. 31: 257–265.

Feger, K.H., Wahren, A., 2008: Auswirkungen verschiedener Bewaldungsszenarien auf den (künftigen) Gebietswasserhaushalt im Erzgebirge. 4. Kolloquium des Nationalen Komitees für Global Change Forschung «Umgang mit dem Klimawandel – Landnutzung im Spannungsfeld von Ressourcenschutz, Nahrungs- und Energienachfrage», Bad Honnef, 3./.4. April 2008.

Feger, K.H.; Hawtree, D., 2013: Soil Carbon and Water Security. In: Lal, R.; Lorenz, K.; Hüttl, R,F.; Schneider, B.U.; von Braun, J. (eds) Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere. Springer. 79–99.

Kreutzer, K., 1995: Effects of forest liming on soil processes. Plant Soil 168, 69: 447–470.

Leitgeb, E.; Reiter, R.; Englisch, M.; Lüscher, P.; Schad, P.; Feger, K.H., 2013: Waldböden. Ein Bildatlas der wichtigsten Bodentypen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz. ISBN 978-3-527-32713-3. Weinheim, Wiley-VCH. 330 S.

MCPFE – Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 1993: 2. Konferenz in Helsinki, Resolution H1: Nachhaltiges Forstmanagement in Europa.

MCPFE – Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 2007: 5. Konferenz in Warschau, Resolution W2: Wälder und Wasser.

Menzer, A.; Feger, K.H., 2005: Räumliche Variabilität der chemischen Zusammensetzung von Quellbächen im Erzgebirge in Abhängigkeit von Geologie, Boden und Bestockung. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 107: 503–504.

Münch, A.; Dittrich, I.; Wahren, A., 2007: The Effects of Changes in Tree Species Composition and of Afforestation on Water Budget and Flood Dynamics Calculated wit AKWA-M®, Ore Mountains. In: Feger, K.H.; Wang, Y.; Bernhofer, C.; Seegert, J. (Eds.) Progress in Hydro Science and Engineering. Dresden, Dresden Water Center 3: 331–337. ISBN: 978-3-86780-074-7.

Pilaš, I.; Feger, K.H.; Vilhar, U.; Wahren, A., 2010: Multidimensionality of Scales and Approaches for Forest–Water Interactions. In: Bredemeier, M.; Cohen, S.; Godbold, D.L.; Lode, E.; Pichler, V.; Schleppi, P. (Eds.) Forest Management and the Water Cycle. An Ecosystem-Based Approach. Springer, Ecol. Stud. 212: 351–380.

Raspe, S.; Feger, K.H., 1998: Bodenfestphase und behandlungsbedingte Veränderungen. In: Raspe S.; Feger, K.H.; Zöttl, H.W. (Hrsg.) Ökosystemforschung im Schwarzwald – Auswirkungen von atmogenen Einträgen und Restabilisierungsmassnahmen in Fichtenwäldern (Verbundprojekt ARINUS). Umweltforschung in Baden-Württemberg. Landsberg/Lech, ecomed-Verlag. 203–222.

Reichelt, C.P., 2012: Umsetzung von Massnahmen zur Stoffeintragsminderung in Einzugsgebieten von Trinkwassertalsperren. 9. Gewässerforum Mulden, Chemnitz, 10. Okt. 2012, http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/10_Forum_M_TOP10_REICHELT.pdf

Sucker, C.; Krause, K., 2010: Increasing dissolved organic carbon concentrations in freshwaters: what is the actual driver? iForest – Biogeosciences and Forestry 3: 106–108. doi: 10.3832/ifor0546-003

Wahren, A.; Schwärzel, K.; Feger, K.H., 2008a: Uncertainties in the parameterisation of rainfall-runoff-models to quantify land-use effects in flood risk assessment. In: Samuels, P.; Huntington, S., Allsop, W.; Harrop, J. (eds) Flood Risk Management: Research and Practice. CRC Press. London, Taylor & Francis Group. Balkema Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Science. 1479–1483. ISBN: 978-0-415-48507-4.

Wahren, A.; Feger K.H.; Schwärzel, K.; Römer, G.; Münch, A.; Dittrich I., 2008b: Landnutzungsabhängiger Gebietsrückhalt bei Hochwasser auf der Grundlage sozioökonomisch begründeter Zukunftsszenarien. In: Haberlandt, U.; Riemeier, B.; Billib, M.; Verworn, H.R.; Kleeberg, H.B. (Hrsg.) Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung – Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2008, 27./28. März 2008 an der Leibnitz Universität Hannover. Hennef, Fachgemeinschaft für Hydrologische Wissenschaften in der DWA. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 23, 8: 73-81. ISBN: 978-3-940173-96-6.

Wahren, A.; Schwärzel, K.; Feger, K.H.; Münch, A., 2009: Land-use effects on flood generation – Considering soil hydraulic measurements in modeling. Adv. Geosci. 21: 99–107.

Wahren, A.; Schwärzel, K.; Feger, K.H., 2012: Potentials and limitations of natural flood retention by forested land in headwater catchments: evidence from experimental and model studies. J. Flood Risk Manage. 5: 321–335.

Wunderlich, S.; Raben, G.; Andreae, H.; Feger, K.H., 2006: Schwefel-Vorräte und Sulfat-Remobilisierungspotenzial in Böden der Level-II-Standorte Sachsens. AFZ/Der Wald 60: 762–765.

Abstract

The importance of forest soils for water yield and quality

In the Ore Mts. (Erzgebirge, Saxony, Germany), long-term hydrological and biogeochemical monitoring has been performed and related models of watershed budgets developed. These illustrate how forest soils affect water-related ecosystem services. Water quality is still influenced by the distinct after-effects of sulphur deposition, which was very high in the region until the mid 1990s, and by natural soil processes i.e. podsolization. Humic compounds (analyzed as DOC) appear to be a problem for drinking water, but they vary with soil/site conditions. Much less nitrogen and phosphorus are exported from forests than from agricultural land. Hydrological simulations using distributed watershed models indicate the water yield is less for land-use scenarios with more forest in the watershed. On the other hand, higher percentages of forest cover are beneficial in terms of flood retention and overall water quality. Challenges for future research will be to combine good water quality and water yield/fluxes.

Keywords: forest soil, water quality, water yield, hydrologic ecosystem service, land use, acid deposition, Erzgebirge/Ore Mts.