

# Was hat Waldbau mit Trinkwasservorsorge zu tun?

Dietmar Zirlewagen, Klaus v. Wilpert

## 1. PROBLEMFELD

Landläufig gelten Wälder als Quellbereiche für sauberes Trinkwasser. Die Filter- und Pufferfunktion von Waldböden ist jedoch zunehmend durch Säure- und Stickstoffeinträge und die davon ausgelösten biologischen Störungen beeinträchtigt. Chemische Veränderungen des Niederschlags beeinflussen nicht nur Pflanze und Boden, sondern auch die aus dem Boden gespeisten Gewässer, dem letzten Glied der ökosystemaren Wirkungskette. Trotz SO<sub>2</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen in Deutschland und den angrenzenden Ländern bleiben die Gesamt-Säureinträge aufgrund der nach wie vor hohen N-Einträge weitverbreitet über den kritischen Belastungsgrenzen für Wälder (SMIDT et al. 1999, BML 2000). Da davon auszugehen ist, dass auch in den kommenden Jahren die Belastungsintensität über den ökosystemverträglichen Schwellenwerten liegen wird, stellt sich die Frage, inwieweit durch konventionelle waldbauliche Maßnahmen (Baumartenwahl, Durchforstungs- und Verjüngungsverfahren) unter den heute wirksamen Rahmenbedingungen die bedrohten Bodenfunktionen unterstützt werden können. Die Wirksamkeit waldbaulicher Maßnahmen in Bezug auf Gewässer- und Trinkwasserschutz ist im Landschaftsmaßstab nur unscharf abschätzbar, da für die Beschaffenheit von Grund- und Oberflächenwässern neben Bodeneigenschaften Puffer- und Umwandlungsprozesse während der Passage durch den Aquifer verantwortlich sind. Deshalb kann der prozessuale Zusammenhang zwischen Waldzustand, Bodenzustand und Wasserqualität nur in modellhaften Ökosystemfallstudien mit hinreichend definierten und kontrollierbaren Randbedingungen herausgearbeitet werden, wenn auch die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse durch die Individualität der Ökosystemstudien eingeschränkt ist.

## 2. UNTERSUCHUNGSFLÄCHE

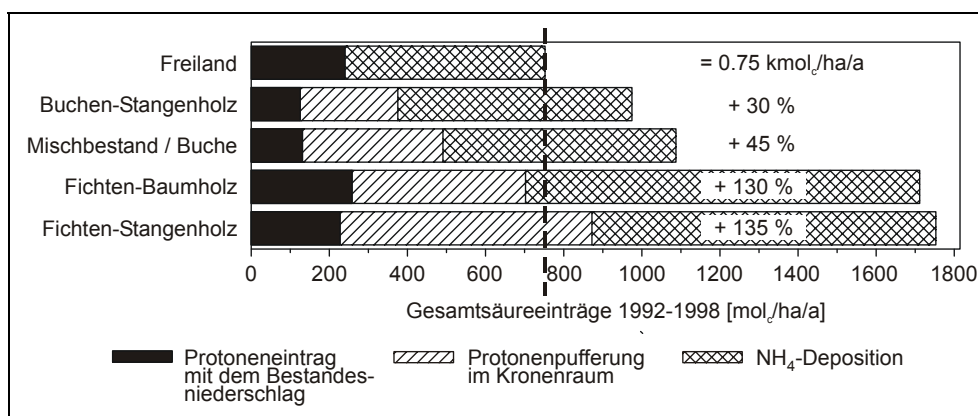
Die Ökosystemfallstudie Conventwald dient dazu, den betrieblichen Spielraum eines ökosystemverträglichen Waldbaus unter den heutigen Eintragsbedingungen auszuloten. Hierzu wird der Stoffhaushalt in buchenreichen und fichtenreichen Beständen, sowie

Strukturvarianten von einem Kleinkahlschlag über kleine Bestandeslücken und Naturverjüngungsgruppen bis hin zu geschlossenen Bestandespartien seit 1991 untersucht (v. WILPERT et al. 1996, 2000; ZIRLEWAGEN & v. WILPERT 1999, 2001). Stoffflüsse führen in Waldökosystemen zur Bildung oder zum Verlust von Stoffpools und sind damit als Prognoseinstrument für die Ökosystementwicklung einsetzbar. Die Fallstudie ist nahe Freiburg im Südschwarzwald gelegen (Höhenlage: 700-860 m ü. NN, mittlerer Jahresniederschlag: 1400 mm, mittlere Jahrestemperatur: 6.6°C, Bodenentwicklung: tiefgründige Braunerden auf dunklem Paragneis). Auf der Skalenebene eines kleinräumigen Wassereinzugsgebiets können Bodensickerwasserdaten und die hydrochemische Entwicklung des Vorfluters verglichen und damit Rückschlüsse auf Umwandlungsprozesse im Aquifer ermöglicht werden.

### 3. ERGEBNISSE

#### Steuerungsmöglichkeiten durch die Baumartenwahl

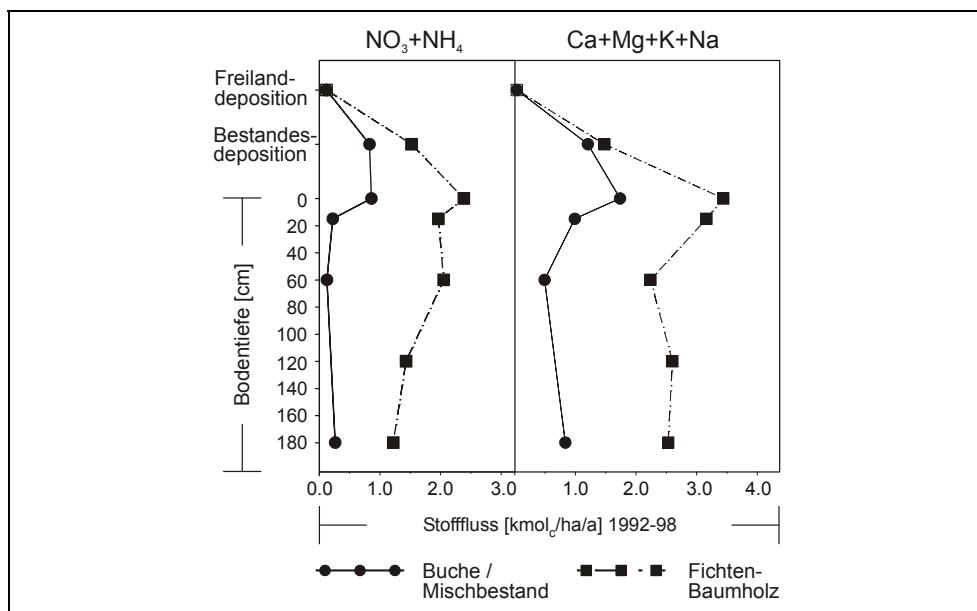
Eine zentrale Einflussgröße für die Funktion von Wäldern als Reservoir hochqualitativen Trinkwassers ist die Baumartenzusammensetzung. Die verschiedenen Waldbaumarten besitzen eine unterschiedliche Auskämmwirkung für Luftschadstoffe. Abb. 1 zeigt das mehrjährige Mittel der Gesamtsäureeinträge in den Buchen- und Fichtenbeständen im Conventwaldgebiet. Im Freilandniederschlag lagen die Säureeinträge zwischen 1992 und 1998 im Mittel bei  $0.75 \text{ kmol}_c \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Im Vergleich hierzu waren die Säureeinträge in den Fichtenbeständen mehr als doppelt so hoch, in den Buchenbeständen jedoch nur um 30-45 % höher.



**Abb. 1:** Atmosphärische Gesamtsäureeinträge in der Ökosystemstudie Conventwald 1992-1998. Trennlinie: Vergleich von Freilanddaten und Waldbestandsdaten.

Unterschiede der Depositionsbelastung zwischen Buchen- und Fichtenbeständen werden

in der Bodenlösung verstärkt beobachtet. Zentraler Parameter der Bodenlösung unter Fichte ist Nitrat. Ammonium, das bei der Deposition eine wesentliche Rolle spielt (Abb. 1) wird in den obersten Mineralbodenschichten fast vollständig nitrifiziert oder aufgenommen. Bis in eine Tiefe von 180 cm werden unter Fichten sehr viel höhere Nitratflüsse als unter Buche beobachtet (Abb. 2). Diese treiben einen signifikant verstärkten Austrag an Neutralkationen an. Dieser Befund ist z.T. auf die höheren Einträge unter Fichtenbeständen zurückzuführen. Verstärkt wird der Unterschied bei der Depositionsbelastung durch interne biologische Vorgänge. Offensichtlich ist das tiefer reichende Wurzelwerk der Buche besser in der Lage, Stickstoffverbindungen und andere Nährelemente im biologischen Kreislauf zu halten als die flachwurzelnende Fichte. Für die Trinkwasservorsorge ist dies von großer Bedeutung, da unter Fichte wesentlich höhere Stickstofffrachten ins Grundwasser gelangen. In diesem Fallbeispiel beträgt der Unterschied rund  $15 \text{ kg NO}_3\text{-N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ . Je nach Pufferwirkung des Aquifer unterhalb 180 cm Tiefe ist dies mit einer mehr oder minder starken Versauerung des Grundwassers gekoppelt.



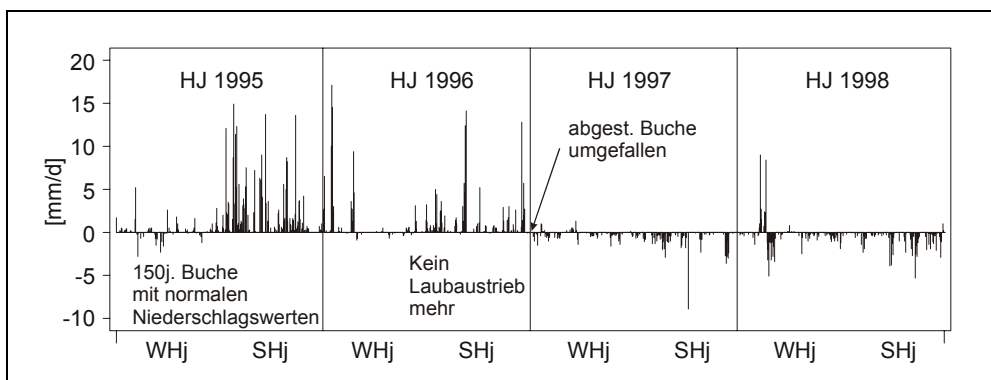
**Abb. 2:** Veränderung der Stoffflüsse zwischen Freilandniederschlag, Bestandesniederschlag und Bodenkompartmenten bis 180 cm Tiefe bei anorganischem Stickstoff (linke Seite) und Neutralkationen (rechte Seite). Vergleich von Buche/Mischbestand und Fichtenbaumholz in der Ökosystemstudie Conventwald 1992-1998.

### Steuerungsmöglichkeiten durch Verjüngungsverfahren

Neben der Baumartenwahl können auch Bestandeseingriffe im Rahmen der Durchforstung und Endnutzung einen erheblichen Einfluss auf die chemische

Sickerwasserqualität haben. Auflichtungen des Bestandesdachs, ob natürlich entstanden oder künstlich herbeigeführt, verändern eine Vielzahl von Ökosystemprozessen. Diese sind nicht nur mit einer Veränderung der vertikalen Bestandesstruktur, sondern auch mit erheblichen Verlagerungen zwischen lebender Biomasse und organischer Substanz verbunden, die zu Veränderungen der Elementflüsse und Elementvorräte im Ökosystem und zu erheblichen Elementausträgen mit dem Sickerwasser führen können.

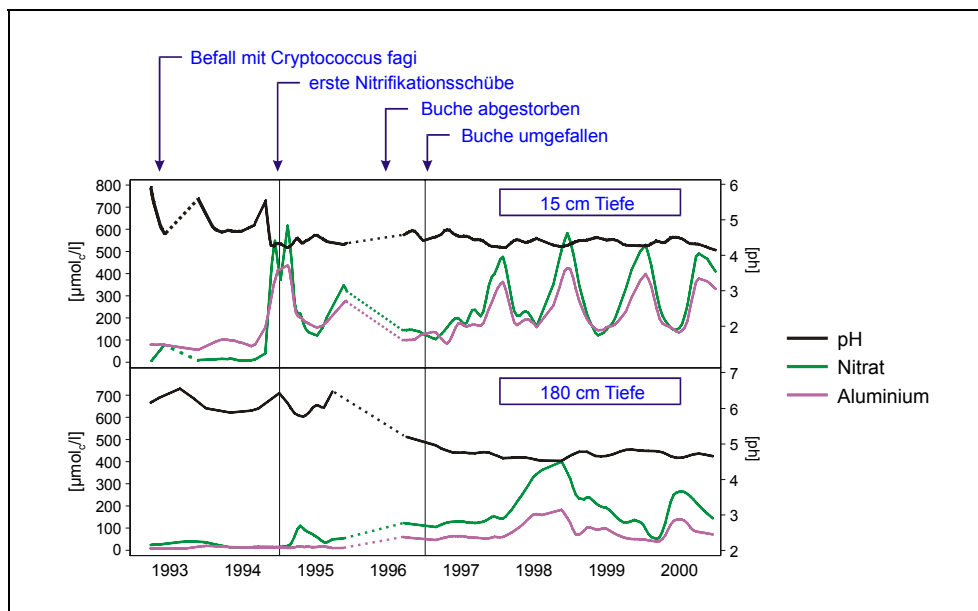
Das erste Fallbeispiel in diesem Zusammenhang zeigt Daten einer 150jährigen Buche, die nach Wollausbefall und Rindennekrose abgestorben ist. Die Messstelle wurde für Kronenkern- und Kronenlückenbereiche getrennt beprobt. Abb. 3 zeigt die zeitliche Entwicklung der Niederschlagsintensitäten (Kronendurchlass, ohne Stammablauf), wobei die Differenz der Messwerte zwischen diesen zwei Kronensituationen dargestellt ist. Positive Werte in Abb. 3 bedeuten, dass in den Kronenlücken höhere Werte als in den Kronenkernbereichen gemessen worden sind. Dies ist normalerweise nur im Sommerhalbjahr der Fall, wenn der Kronenkernbereich durch seine dichte Belaubung höhere Verdunstungsverluste durch Interzeption als angrenzende Kronenlücken aufweist. Im Laufe des Absterbeprozesses gleicht sich nun die Niederschlagsverteilung zwischen Kronenkernbereich und Kronenlücken in den Sommerhalbjahren sukzessive an, bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Buche gänzlich abgestorben und schließlich umgefallen ist.



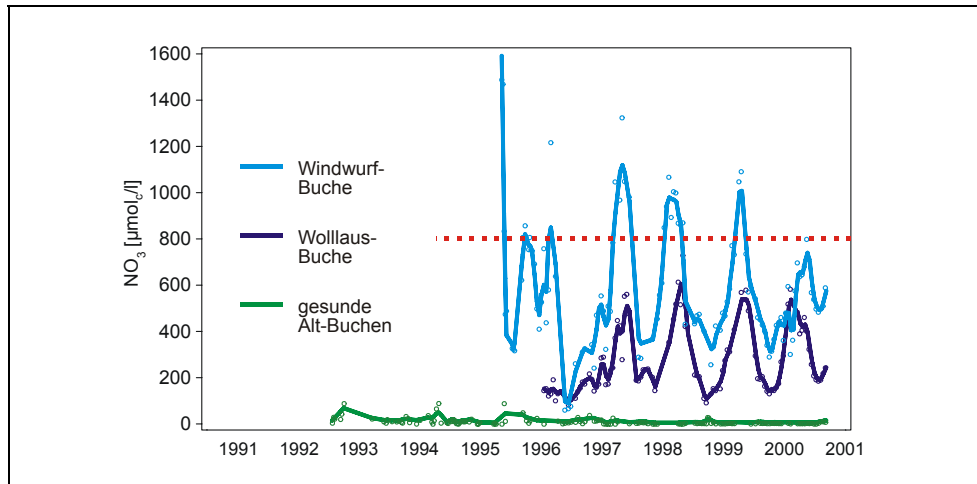
**Abb. 3:** Veränderung der Niederschlagsverteilung zwischen Kronenkern- und Kronenlückenbereichen bei einer absterbenden Buche nach Wollausbefall. Niederschlagswerte = Differenz der Messwerte von Kronenlücke- und Kronenkernbereichen, vgl. Text.

Dieser oberirdisch sichtbare Zerfallsprozess wirkt sich auch auf die chemische Zusammensetzung des Bodensickerwassers aus (Abb. 4). Zum Beginn des Krankheitsverlaufes sind die Nitrat-Konzentrationen zwischen 15 und 180 cm Tiefe noch niedrig. Im weiteren Krankheitsverlauf steigen im Oberboden die  $\text{NO}_3$ -Konzentrationen wellenförmig stark an. Der Verlauf setzt sich nach dem Absterben der Buche auf höherem Niveau fort und schlägt bis in 180 cm Tiefe, zeitlich versetzt und gedämpft, durch. Ein beschleunigter Abbau der Feinwurzelbiomasse sowie reduzierte Nährstoffaufnahme führen zur Überschussnitrifikation mit anschließendem Austrag von Nitrat und begleitenden

Kationen, wie z. B. Al. Diese Nitrat- und Ammonium-Auswaschung führt zur Bodenversauerung. In 180 cm Tiefe sinkt der pH aus dem schwach sauren in den mäßig bis stark sauren Bereich. Im Vergleich zur Wollausbuche werden im angrenzenden, geschlossenen Buchen-Grundbestand konstant niedrige Nitrat-Konzentrationen gemessen (Abb. 5). Als weiteres Fallbeispiel für kleinräumigen Störeinfluss zeigt der Bereich einer Windwurfbuche, der im Januar 1995 entstanden ist, noch ausgeprägtere Nitratfreisetzungsraten als der Messbereich der Wollausbuche, die in den Spitzen den EU-Trinkwassergrenzwert von 50 mg/l überschreiten (Abb. 5). Diese Störungen des N-Haushaltes sind im Vergleich zu den Verhältnissen des angrenzenden Buchen-Grundbestandes signifikant (Abb. 5). Schon in 15 cm Tiefe sind die Nitrat-Konzentrationen unter den Alt-Buchen des Mischbestandes auf sehr niedrigem Niveau.

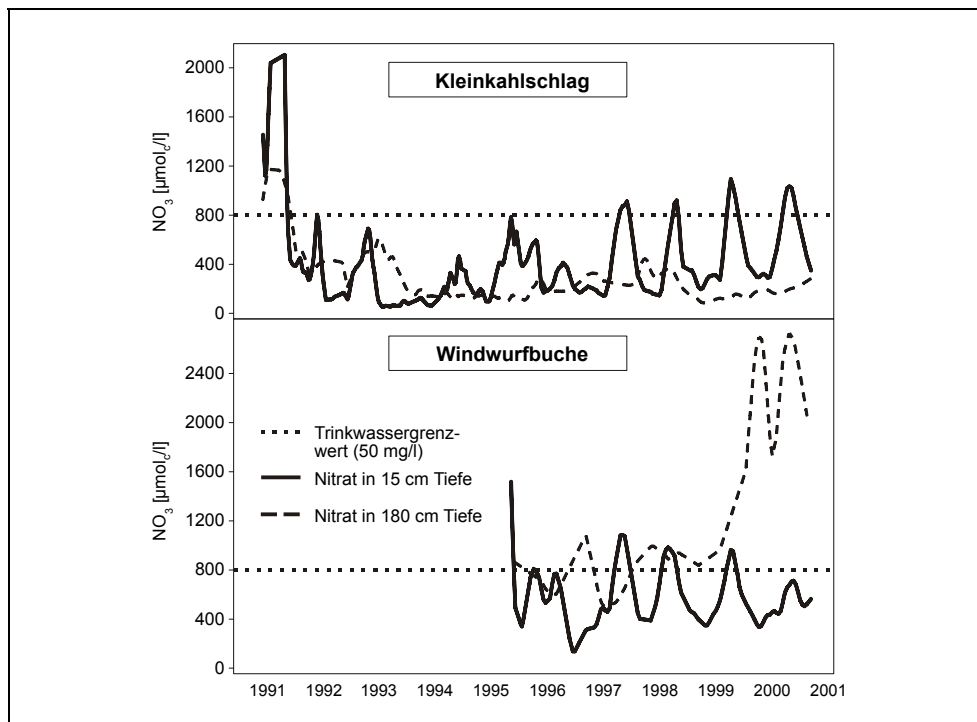


**Abb. 4:** Bodenchemische Drift unter einer absterbenden Wollausbuche zwischen 15 und 180 cm Bodentiefe. Geglätteter Verlauf der Messwerte. Ökosystemstudie Conventwald



**Abb. 5:** Nitratkonzentrationen in 15 cm Tiefe im Bereich einer absterbenden Wollausbuche (vgl. Abb.4), einer Windwurfbuche (Sturmbruch Januar 1995) und im ungestörten Buchen-Grundbestand. Geglätteter Verlauf der Messwerte. Ökosystemstudie Conventwald.

Insbesondere vor dem Hintergrund der Trinkwasservorsorge stellt sich die Frage, wie lange Nitratfreisetzungen im Boden nach einer Bestandesstörung anhalten können. Eine relativ lange Zeitreihe liegt uns in der Conventwaldstudie für eine Kleinkahlschlagsfläche vor, die im Sommer 1989 entstanden ist (Abb. 6, oben).

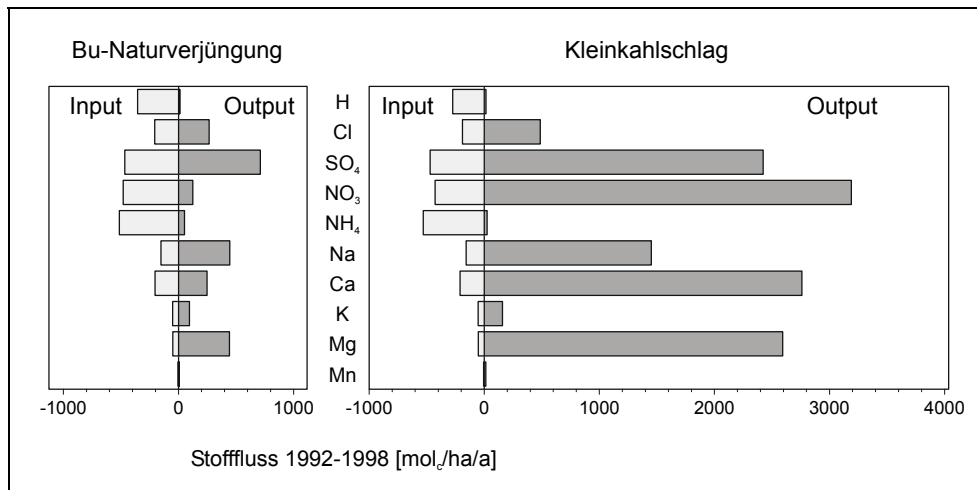


**Abb. 6:** Nitratkonzentrationen in 15 und 180 cm Tiefe auf einer Kleinkahlschlagsfläche (Kahllegung Sommer 1989) und im Bereich einer Windwurfbuche (Sturmbruch Januar 1995). Geglätteter Verlauf der Messwerte. Ökosystemstudie Conventwald

Der Messbetrieb wurde 2 Jahre nach Kahllegung begonnen. Bedingt durch eine aufkommende nitrophile Schlagflora klingen die Nitratschübe in den ersten 5 Jahren nach Kahllegung stark ab. Eine Interpretation der Daten der ersten drei Messjahre hätte die These gestützt, dass Stoffhaushaltsstörungen nach Kahlschlägen schon nach relativ kurzer Zeit wieder abklingen können. Die Messungen wurden aber weiter fortgeführt. Es zeigte sich, dass nach dieser Phase der relativen Beruhigung die  $\text{NO}_3$ -Werte wieder anstiegen, so dass selbst nach mehr als 10 Jahren die  $\text{NO}_3$ -Konzentrationen in 15 cm Tiefe immer noch den Störeinfluss widerspiegeln. Diese Zeitreihen sind ein Beispiel für die Notwendigkeit langfristiger Messkampagnen in der Waldökosystemforschung bzw. für die Unsicherheiten, die bei der Interpretation zu kurzer Zeitsegmente auftreten können. Nach 10 Jahren liegen die  $\text{NO}_3$ -Werte in 15 cm Tiefe sogar über den Werten der erst 1995 entstandenen Windwurfücke.

Dagegen ist die Bodensickerung unter der geschlossenen Buchen-Naturverjüngung quasi  $\text{NO}_3$ -frei und entspricht in etwa den Werten des ungestörten Buchen-Mischbestandes. Bei nur geringen Unterschieden auf der Stoffeintragsseite unterscheiden sich die Stoffausträge bei der Buchen-Verjüngung im Kleinkahlschlags- und Naturverjüngungsverfahren drastisch (Abb. 7). Während bei der Buchen-Naturverjüngung nur  $0.18 \text{ kmol}_c \text{ N} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$  (= 2.5 kg N) in den Aquifer ausgewaschen werden, sind dies beim Kleinkahlschlag  $3.2 \text{ kmol}_c \text{ N} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$

(= 44.8 kg N !). Entsprechend hoch sind die Verluste an Neutralkationen (v.a. Ca und Mg). Die Gegenüberstellung der Input- und Outputflüsse in Abb. 7 zeigt, dass eine ökosysteminterne Generierung von  $\text{NO}_3$  und  $\text{SO}_4$ , d.h. die Remobilisierung früher eingetragener N- und S-Mengen maßgeblich für die Auswaschung von Neutralkationen beim Kleinkahlschlag sind und nur ein relativ geringer Anteil auf die direkte Deposition von Luftschadstoffen zurückgeht.



**Abb. 7:** Input-Output-Analyse 1992-1998. Input = Deposition, Output = Stoffflüsse in 180 cm Tiefe. Vergleich einer Buchen-Naturverjüngungsfläche (linke Abb.) mit einem Kleinkahlschlag (rechte Abb.).

Diese Fallbeispiele zeigen, dass flächenmäßig bedeutsame Stoffhaushaltsstörungen, wie ein Kleinkahlschlagseingriff, die hydrochemische Gewässerqualität unter dem Einfluss der aktuell wirkenden Stoffeinträge über längere Zeiträume massiv beeinträchtigen können. Daher beinhaltet die Vermeidung von großflächigen Stoffhaushaltsstörungen, wie sie z. B. durch Kahlschläge ausgelöst werden, einen wichtigen Gewässerschutzaspekt. Die Fallbeispiele zeigen aber auch, dass selbst einzelstammweise Bestandeseingriffe im Rahmen der regulären „guten Bewirtschaftungspraxis“ ein relevantes Störpotential für Stoffhaushalt und Hydrosphäre besitzen. Nun ist Waldbau ohne steuernde Eingriffe in das Kronendach im Rahmen der Durchforstung oder Endnutzung nicht denkbar. Eine gewisse Stabilisierungsfunktion des gestörten Stoffhaushalts nach Bestandeseingriffen dürfte der Begleitvegetation zukommen. Im Zusammenhang mit Verjüngungsverfahren wird z.B. von der Vorverjüngung unter Schirm ein besonderes Präventionspotential erwartet.

Die Unterschiede der  $\text{NO}_3$ -Konzentrationen zwischen Ober- und Unterboden (15 und 180 cm) lassen die Fähigkeit der Vegetationsdecke, im Wurzelraum Stickstoff zurückzuhalten erkennen (Abb. 6). Auf der Kleinkahlschlagsfläche treten im Oberboden zwar die höchsten Nitratkonzentrationen auf, die – wohl aufgrund der günstigen Lichtverhältnisse – schnell aufkommende Schlagflora und spätere Buchen-Verjüngung nehmen so viel Nitrat auf, dass im Austrag (bei 180 cm) die Nitratspitzen deutlich gedämpft sind.

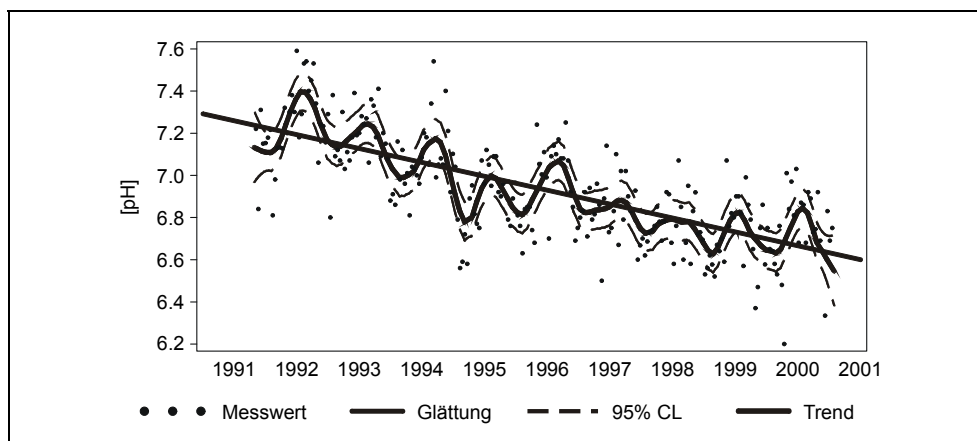


Anders ist dies bei der Windwurfbuche, wo durch den infolge der geringen Lückengröße reduzierten Lichtgenuss die Etablierung einer aufnahmefähigen Vegetationsdecke behindert ist und so die aus der Mineralisierung des Wurzelwerks der Windwurfbuche stammenden Nitratmengen in 180 cm Tiefe verstärkt ausgetragen werden.

### Einzugsgebietsstudie Conventwald

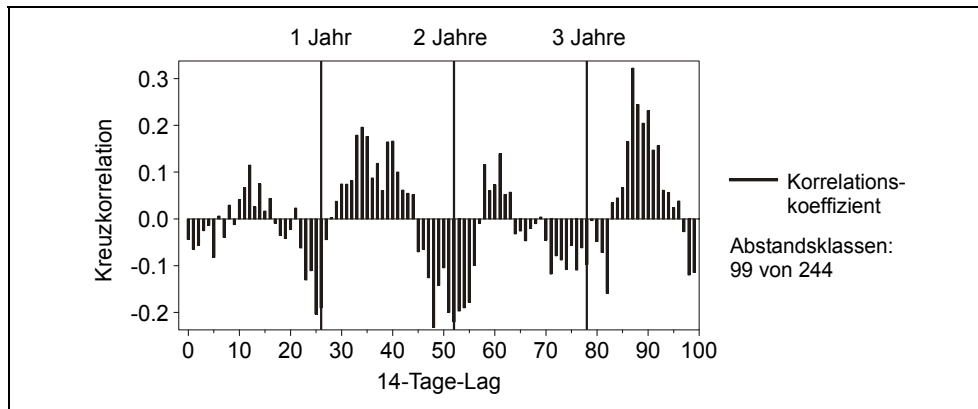
Die bisherige Betrachtung ging davon aus, dass die Bodensickerung in 180 cm Tiefe die Grundwasserbildung prägt, hat also Puffer- und Umwandlungsprozesse im Aquifer unberücksichtigt gelassen, die einer direkten Messung meist nicht zugänglich sind. Im Conventwald haben wir im Rahmen einer Einzugsgebietsstudie die Möglichkeit, Bachdaten und Sickerwasserdaten der Bodensickerung zu vergleichen. Aufstockender Bestand im ca. 9 ha großen Einzugsgebiet ist ein 160jähriger Buchen-Mischbestand (v. WILPERT et al. 1996, 2000; ZIRLEWAGEN & v. WILPERT 1999, 2001).

Trotz der naturnahen, buchenreichen Bestockung zeigt die zeitliche Entwicklung der pH-Werte im Vorfluter des Einzugsgebietes ein deutliches saisonales Muster mit signifikantem Trend zur Versauerung auf (Abb. 8).



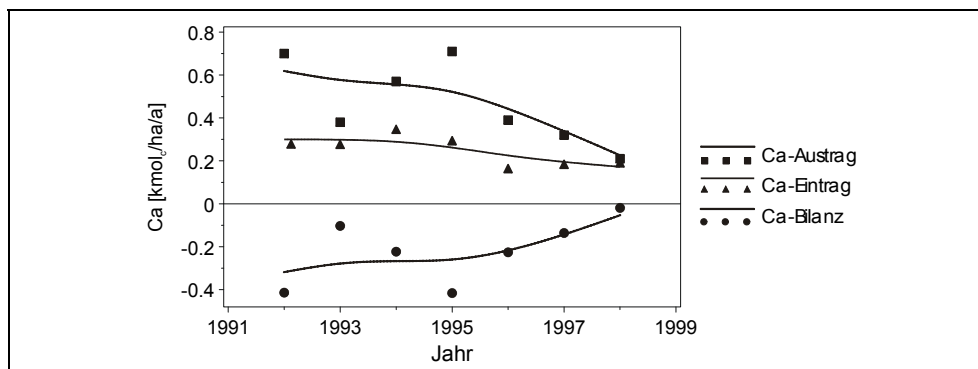
**Abb. 8:** Zeitliche Entwicklung der pH-Werte im Vorfluter des Conventwald-Einzugsgebietes zwischen 10.1991 und 02.2001.

Dieser Trend lässt sich nicht auf die zeitliche Entwicklung von Sulfat- oder Nitratkonzentrationen im Bach zurückführen. Als einziger hydrochemischer Parameter zeichnet Ca die Entwicklung des pH nach. Ähnliche zeitliche Entwicklungen wurden auch im Buchen-Mischbestand in 180 cm Tiefe gemessen. Durch Kreuzkorrelation lässt sich nachweisen, dass eine zeitlich versetzte Abhängigkeit zwischen Bach- und Lysimeterdaten besteht, wobei ausgeprägte Abhängigkeiten mit einer zeitlichen Verschiebung von jeweils einem halben Jahr auftreten (Abb. 9).



**Abb. 9:** Kreuzkorrelation von pH-Werten zwischen Lysimeterdaten aus 180 cm Tiefe (Buche/Mischbestand im Einzugsgebiet) und Daten des Conventwald-Vorfluters.

Eine Erklärungsmöglichkeit für den Versauerungstrend der Bach- und Lysimeterdaten bietet die Ca-Bilanz des Bodens unter dem Buchen-Mischbestand. Sie zeigt einen deutlichen Rückgang. Anfang der 90er Jahre wurde noch ca. die Hälfte des Ca-Austrages aus dem Boden gespeist, während er Ende der 90er Jahre weitgehend vom Ca-Eintrag gesteuert wird. Die interne Pufferkapazität ist unter dem Buchen-Mischbestand offensichtlich erschöpft (Abb. 10). Im Aquifer, der sich im Kohlensäurepufferbereich befindet, führt dieser Abbau der Pufferkapazität des Bodens zu der beobachteten pH-Absenkung. Dies bedeutet, dass sich auch im naturnahen buchenreichen Mischbestand ein deutlicher Trend einer depositionsbedingten Standortsdrift mit den entsprechenden Konsequenzen für die Gewässerqualität abzeichnet. Es ist allerdings anzunehmen, dass diese Standortsveränderung unter einem Fichten-Reinbestand wesentlich gravierender wäre.



**Abb. 9:** Zeitliche Entwicklung der Ca-Bilanz im Buchen-Mischbestand des Conventwald-Einzugsgebietes zwischen 1992 und 1998.

## 4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der Conventwaldstudie zeigen deutlich, dass die Funktion von Wäldern als Trinkwasserspeicher unter dem Einfluss von Stickstoff- und Säureeinträgen gefährdet ist. Waldbaulich können die Folgen zumindest teilweise dadurch eingegrenzt werden, dass durch verstärkten Laubholzanbau die Menge der durch den Wald ausgekämmten Immissionen vermindert werden kann. Dieser Depositionseffekt würde durch unterschiedliche starke interne Versauerungstendenzen zwischen Laub- und Nadelbäumen und durch das Nitrataufnahmevermögen der Buche noch verstärkt werden. Die Vermeidung von Kahlschlägen kann einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung von Stoffhaushaltsstörungen leisten und beinhaltet damit einen wichtigen Gewässerschutzaspekt. Selbst kleinflächige Störungen des Bestandesgefüges zeigen drastische Auswirkungen auf den Stoffkreislauf, wobei der Begleitvegetation, insbesondere der Naturverjüngung, eine wesentliche Stabilisierungsfunktion zukommen dürfte.

## Literaturverzeichnis

BML (Hrsg.) (2000): Critical Loads für Waldökosysteme – Methoden und Ergebnisse für Standorte des Level II-Programms. Arbeitskreis A der Bund-Länder Arbeitsgruppe Level II. 71 S.

SMIDT, S.; BLOCK, J.; JANDL, R.; GEHRMANN, J. (1999): Trends von Luftschadstoffkonzentrationen und –depositionen an Waldmessstationen in Österreich und Deutschland. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 116 (3), 193-209.

v. WILPERT, K.; KOHLER, M.; ZIRLEWAGEN, D. (1996): Die Differenzierung des Stoffhaushalts von Waldökosystemen durch die waldbauliche Behandlung auf einem Gneisstandort des Mittleren Schwarzwaldes. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Heft 197, 94 S. + 40 S. Anhang.

v. WILPERT, K.; ZIRLEWAGEN, D.; Kohler, M. (2000): To what extent can silviculture enhance sustainability of forest sites under the immission regime in central Europe? Water, Air and Soil Pollution 122, 105-120.

ZIRLEWAGEN, D.; v. WILPERT, K. (1999): Bedeutung kleinräumiger Störungen des Bestandesgefüges für Stofftransporte mit der Bodenlösung. Berichte Freiburger Forstliche Forschung 7, 137-142.

ZIRLEWAGEN, D.; v. WILPERT, K. (2001): Modeling water and ion fluxes in a highly structured, mixed-species stand. Forest Ecology and Management 143, 27-37.