

SCHRIFTENREIHE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 40

Klaus v. Wilpert

**Waldbauliche Steuerungsmöglichkeiten
des Stoffhaushalts von Waldökosystemen**
—
**am Beispiel von Buchen- und Fichtenvarianten der
Conventwald – Fallstudie**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG

ABTEILUNG BODEN UND UMWELT

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zitiervorschlag:

WILPERT V., KLAUS (2008): Waldbauliche Steuerungsmöglichkeiten des Stoffhaushalts von Waldökosystemen am Beispiel von Buchen- und Fichtenvarianten der Conventwald- Fallstudie Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 40) Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ., Habil., 2008

ISSN 1436-1566

ISBN 978-3-933548-41-2

Die Herausgeber:

Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Redaktionskomitee:

Prof. Dr. J. Huss
Prof. Dr. W. Konold
Dr. K. v. Wilpert
Dr. H. Volk

Umschlaggestaltung:

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Druck:

Eigenverlag der FVA, Freiburg

Bestellungen an:

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
Wonnhaldestraße 4
79100 Freiburg i. Br.
Tel. 0761/4018-0, Fax 0761/4018-333
E-Mail: fva-bw@forst.bwl.de
Internet: www.fva-bw.de

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Gedruckt auf 100 % chlorfrei gebleichtem Papier

*Es zeichnet einen gebildeten Geist aus,
sich mit jenem Grad an Genauigkeit zufrieden zu geben,
den die Natur der Dinge zulässt,
und nicht dort Exaktheit zu suchen,
wo nur Annäherung möglich ist*

Aristoteles 384-322 v.Chr.
Nikomachische Ethik, 1.1

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung und Ziele der Untersuchung	2
1.2	Definitionen	4
2	UNTERSUCHUNGSMETHODEN UND METHODISCHE ERGEBNISSE	7
2.1	Regionale und standörtliche Rahmenbedingungen	7
2.2	Strukturbezug der Geländeinstallation	10
2.3	Varianz der Stoffkonzentrationen im Saugkerzenwasser in den Strukturstraten	13
2.4	Voraussetzungen der Stoffflussberechnungen	14
2.4.1	Aufbereitung der Klimadaten für die Modellierung	15
2.4.1.1	Korrektur der Globalstrahlungsdaten	15
2.4.1.2	Korrektur der Luftfeuchtedaten	19
2.4.1.3	Korrektur der Lufttemperaturdaten	21
2.4.1.4	Korrektur der Niederschlagsdaten	22
2.4.2	Korrektur der Stoffkonzentrationen in der Bodenlösung	24
2.5	Eichung des Wassehaushaltsmodells in den Strukturstraten und Stoffflussberechnung	30
2.5.1	Modellierung des Wasserhaushalts	30
2.5.2	Stoffflussberechnung	39
2.6	Erfassung von Strukturstraten aus Luftbildern auf Bestandesebene	42
2.6.1	Auswertung der Luftbilder von 1991	43
2.6.2	Bildmaterial	43
2.6.3	Aufbereitung der Luftbilder	43
2.6.4	Auswertung der Luftbilder von 1999	45
2.6.5	Entwicklung der Bestandesstruktur im Mischbestand	45
2.6.4	Diskussion der Luftbildauswertungen	47
2.7	Stoffpools im Boden	48
2.8	Biomasse- und Stoffpools in Beständen, Naturverjüngung und Bodenvegetation	56
2.8.1	Bestimmung von Stoffpools und Stoffsenken in der Bestandesbiomasse	56
2.8.2	Bestimmung von Stoffpools und Stoffsenken in der Naturverjüngung	59
2.8.3	Bestimmung von Stoffpools und Stoffsenken in der Bodenvegetation	64

2.9	Modellierung des zeitlichen Verlaufs von Stoffausträgen in Beständen und Lücken	66
2.9.1	Ableitung der glatten Trendkomponente durch Anpassung einer nichtlinearen Funktion	66
2.9.2	Modellierung der Stoffausträge nach Bestandes- und Behandlungsvarianten	80
2.9.3	Prüfung der Anpassungsgüte der glatten Trends	88
2.10	Erstellung der Stoffbilanzen für waldbauliche Behandlungsmodelle	90
2.10.1	Definition der Behandlungsmodelle	90
2.10.2	Berechnung der Stoffausträge für Behandlungsmodelle	92
2.10.3	Berechnung der Depositionsverläufe für Umtriebszeiten	96
2.10.4	Berücksichtigung der Stoffeinträge aus der Silikatverwitterung	97
2.10.5	Berechnung der Stofffixierung mit der geernteten Biomasse und der umlaufenden Stoffpools	98
2.10.6	Berechnung von Stoffbilanzen	99
3	ERGEBNISSE	101
3.1	Räumliche Muster in Beständen	101
3.1.1	Deposition nach Bestandestypen	101
3.1.2	Wasserbilanzen nach Bestandesstrukturen	104
3.1.3	Stoffflüsse in unterschiedlichen Untersuchungsbeständen	106
3.1.4	Stoffflüsse in Kahlschlag und Femellücken	108
3.1.5	Stoffflüsse nach Kronensituationen	111
3.1.6	Bedeutung von Sulfat und Nitrat für den Stofffluss	115
3.1.7	Bodenchemische Muster in der Festphase	120
3.1.8	Elementpool Bestandesbiomasse	131
3.1.9	Bewertung der Stoffsenke Naturverjüngung und Bodenvegetation	135
3.2	Zeittrends im Stoffhaushalt	139
3.2.1	Stoffflusstrends in den Bestandestypen	140
3.2.2	Störung und Resilienz des Stoffhaushalts nach Hiebsmaßnahmen	151
3.2.3	Störung und Resilienz des Stoffhaushalts im und nach dem Trockenjahr 2003	156
3.3	Stoffbilanzen für waldbauliche Behandlungsmodelle	157
3.3.1	Kumulative Verläufe der Depositionen in den waldbaulichen Behandlungsmodellen	158
3.3.2	Stoffaufnahme mit der Biomasse	162
3.3.2.1	Umlaufende Stoffpools	162
3.3.2.2	Fixierung von Stoffmengen in der geernteten Biomasse	166
3.3.3	Verlauf der Stoffausträge mit dem Sickerwasser	169
3.3.4	Stoffbilanzverläufe bei den waldbaulichen Behandlungsmodellen	175
3.3.5	Gesamtbilanzen bei den waldbaulichen Behandlungsmodellen	181

4	DISKUSSION	191
4.1	Repräsentativität und Relevanz der Messungen	191
4.2	Bewertung des Modellkonzeptes	194
4.3	Beurteilung der Bilanzgrößen und Bilanzverläufe	199
4.4	Vergleich mit dem prozessorientierten Ökosystemmodell SAFE	204
4.5	Systemnachhaltigkeit und Optimierung der Nicht - Holzproduktionsfunktionen	206
	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Praxis	209
	Summary and conclusions for the practice	213
	Danksagung	217
	Literatur	219
	Abbildungsverzeichnis	229
	Tabellenverzeichnis	236
	Anhang	238

5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS

Waldbauliche Behandlungsstrategien zielen primär darauf ab, Qualität und Wachstum von Holz zu beeinflussen, allerdings werden dabei auch indirekt die Rahmenbedingungen für das Ausmaß der Geschlossenheit von Stoffkreisläufen in Waldökosystemen gesetzt. Waldbauliches Handeln bedeutet die räumliche und zeitliche Festlegung von Hiebsmaßnahmen. Es stehen stark disproportionale Verfahren mit Kahlschlagphase, und einer Öffnungstendenz des Stoffkreislaufs sowie dauerwaldorientierte Verfahren mit mehr oder weniger gleichmäßig über das Bestandesleben verteilten Femelhieben einander gegenüber, bei denen der Stoffkreislauf in hohem Maße geschlossen bleibt. Durch langjährige Stickstoff- und Säureeinträge ist das Regelvermögen der Waldböden weitgehend aufgebraucht und die Standorte haben einen Teil ihrer stabilisierenden Wirkung verloren. Damit muss an waldbauliche Behandlungsstrategien neben Optimierung von Holzwachstum und Sortenvielfalt die Anforderung gestellt werden, den Stoffhaushalt von Waldökosystemen auch unter den heutigen Umweltbedingungen möglichst geschlossen zu halten.

In der Ökosystem-Fallstudie Conventwald, am Westabfall des Mittleren Schwarzwaldes, 18 km östlich Freiburg, wird seit 1991 der Stoff- und Wasserhaushalt von Waldökosystemen untersucht, die sich hinsichtlich Baumartenzusammensetzung und Bestandesstruktur unterscheiden. Die einzelnen waldbaulichen Varianten sind in dieser Studie unter möglichst identischen Standortsbedingungen, mit Distanzen zwischen den Versuchsparzellen von weniger als 500 m, räumlich sehr eng benachbart. Ziel der Untersuchungen ist es, den Spielraum für eine Stabilisierung des Stoffhaushalts zu identifizieren, den Forstpraxis und Waldbau unter dem Einfluss aktuell wirksamer Umweltveränderungen noch haben. Das Untersuchungsgebiet liegt in einer Höhenlage von 700-860 m ü. N.N., hat tiefgründig entwickelte, weitgehend versauerte Braunerden aus dunklem, glimmerreichem Paragneis und weist Gesamtsäure- und Gesamt-Stickstoffeinträge auf, die im Vergleich zum übrigen Land im oberen Drittel der Depositionsbelastung liegen. Der Stickstoffvorrat im Boden ist mit bis zu 30 t ha⁻¹ sehr hoch und legt nahe, dass dieser Standort ein fortgeschrittenes Stadium der Stickstoffsättigung repräsentiert. Damit sind die Ergebnisse der Arbeit insbesondere für Standorte mit hoher Stickstoffverfügbarkeit repräsentativ. Dies entspricht dem stark von Depositionen geprägten Stoffhaushalt in Waldökosystemen in Zentral – Europa.

Mit diesem Datenmaterial wurden für insgesamt 50 Struktureinheiten in den Misch- und Reinbeständen der Fallstudie einzeln Stoffflüsse für den gesamten Beobachtungszeitraum berechnet. Diese Struktureinheiten können als zeitlich begrenzte Phasen von waldbaulichen Behandlungskonzepten aufgefasst werden. So wurden beispielsweise die Stoffflussberechnungen von Kahlschlag, Naturverjüngung, Baumholz und Altholz zu einem Stoffaustragsmodell für einen Buchenkahlschlagbetrieb kombiniert. Die Stoffhaushaltsreaktion von Durchforstungen wurde auf der Basis von im Jahr 2002 angelegten Kleinlücken (Entnahme von 1-2 herrschenden Bäumen) modelliert. Größere Femellücken mit und ohne Vorverjüngung wurden zur Beschreibung von Stoffausträgen nach Femelhieben verwendet. Bei der Definition von waldbaulichen Behandlungsmodellen wurden Annahmen getroffen, die an

den Umwelt-, Boden- und Wuchsverhältnissen der Conventwaldstudie orientiert sind. In den einzelnen Strukturelementen und für alle in der Stoffhaushaltsbilanz relevanten Anionen und Kationen wurden die Abläufe der Stoffausträge über der Zeit mittels nichtlinearer Regressionsmodelle parametrisiert. Anhand dieser konnten dann die Stoffausträge für 5 waldbauliche Behandlungsmodelle über die gesamten Umtriebszeiten hinweg berechnet werden. Dies waren Fichten- und Buchenreinbestände nach Kahlschlag (Umtriebszeit 100 und 130 Jahre), Buchenfemelschlagbetrieb mit und ohne gesicherter Vorverjüngung in den Femelphasen (Umtriebszeit 150 Jahre) sowie ein Buchen/Tannen/Fichtenmischbestand (40, 30, 30 %) im Dauerwaldbetrieb (nominale Umtriebszeit 200 Jahre).

Am Standort Conventwald wurden in verschiedenen Bestandesaltern und für die oberirdischen Biomassekompartimente Stammholz, Rinde, Zweige und Nadeln chemische Elementgehalte bestimmt und im Jungwuchs bzw. Baumholz an Einzelbäumen sektionsweise Kompartimentmassen bestimmt. Damit konnte in Verbindung mit Ertragstafeln die Elementfestlegung in der Baubiomasse für diesen Standort abgeschätzt werden. Durch die getrennte Betrachtung von Biomassekompartimenten konnten dabei die Nutzungsintensitäten „nur Holzernte“, „Ernte von Holz und Rinde“ und „Vollbaumernte“ in ihrer Bedeutung für die Stoffbilanz abgebildet werden. Die Depositionsmessungen der Fallstudie ermöglichten die Einbeziehung von Stoffeinträgen für die Elemente Ammonium, Nitrat, Sulfat, Mb-Kationen und Gesamtsäure. Die Mb-Kationenfreisetzung durch Silikatverwitterung wurde unter Einbeziehung der Verwitterungszonen des Bodenskeletts für alle waldbaulichen Behandlungskonzepte gleichbleibend mit $1,232 \text{ kmol}_c\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ in die Stoffbilanzen mit einbezogen.

Die Gesamtbilanzen für die 5 waldbaulichen Behandlungsmodelle ergaben neben dem zu erwartenden deutlichen Unterschied zwischen Fichtenkahlschlagbetrieb und den Buchenmodellen auch innerhalb der Buchenmodelle eine deutliche Differenzierung. Unerwartet hoch war der Unterschied zwischen der Nutzungsintensitäten „nur Holz“ und „Holz in Rinde“, letztere repräsentiert die derzeit gängige Praxis.

Es wird klar erkennbar, dass bei der derzeitigen Nutzungsintensität die Mb-Kationenbilanz nur bei den schonendsten waldbaulichen Behandlungsmodellen „Buchen/Tannen/Fichtendauerwald“ und „Buchenfemelschlag“ mit 80 % Vorverjüngung schwach positiv ist. Beim Buchenkahlschlagbetrieb ist diese bereits mit Verlusten von $0,3 \text{ kmol}_c\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ deutlich negativ. Die Mb-Kationenbilanz beim Fichtenkahlschlagbetrieb ist mit jährlichen Verlusten von $2 \text{ kmol}_c\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ und höher, so hoch, dass in absehbarer Zeit deutliche Systemreaktionen nicht auszuschließen sind. Erste Reaktionen könnten sich beispielsweise in einer reduzierten Wachstums- und damit einer reduzierten Aufnahme für Mb-Kationen zeigen. Dieser Bilanzverlust wird in ca. 40 Jahren, also in weniger als der Hälfte eines Fichtenumtriebs, rechnerisch zur vollständigen Abschöpfung der austauschbaren Ionenvorräte im Feinboden führen. Die Bestandesernährung kann dann theoretisch nur noch über den austauschbaren Basenvorrat im Bodenskelett erfolgen.

Die Stickstoffbilanz wird nur im Fichtenbestand bei allen Nutzungsintensitäten sowie bei Vollbaumnutzung und allen waldbaulichen Varianten negativ. Dies belegt eine durch forstbetriebliche Maßnahmen kaum zu steuernde Entwicklung in Richtung Stickstoffsättigung.

Die Schwefelbilanz ist für alle waldbaulichen Behandlungsvarianten deutlich negativ, die Unterschiede zwischen Nutzungsintensitäten sind jedoch für diesen Parameter minimal. Beide Befunde, sowie die Verteilung des Schwefelvorrats im Mineralboden deuten auf eine

Remobilisierung depositionsbedingter Schwefelvorräte hin und lassen eine Interpretation des durchgängigen Nettoschwefelaustrags als Resultat interner Stoffumsetzungen nicht zu. In der Variante mit den höchsten Bilanzverlusten für Schwefel, dem Fichtenreinbestand mit Kahlschlag, wird es etwas weniger als 100 Jahre dauern, bis die im Mineralboden zwischengespeicherten Schwefelmengen abgeflossen sind. Das bedeutet, dass über diesen Zeitraum, auch bei deutlicher Reduktion der Schwefeleinträge durch Luftreinhaltemaßnahmen die früheren Schwefelpositionen den Stoffhaushalt beeinflussen werden.

Die zusammenfassenden Schlussfolgerungen für die Praxis sind:

- Auch unter heutigen Depositionsbedingungen lassen sich die Puffereigenschaften von Waldstandorten durch waldbauliche Behandlung und variierende Nutzungsintensität so beeinflussen, dass Waldböden weder Mb-Kationen noch Pufferkapazität verlieren.
- Unerwartet hoch ist der Einfluss der Nutzungsintensität. D.h. praxisübliche Erntetechniken wie beispielsweise Ernte von Holz in Rinde sind in dieser Hinsicht, insbesondere bei natürlich schwach gepufferten Substraten, zu überdenken. Vollbaumnutzung, wie sie z.B. zur Intensivierung des Biomasseaufkommens für energetische Nutzung vordergründig wünschenswert erscheinen mag, führt sogar auf Standorten wie dem Conventwald mit überproportional guter Basenausstattung im Ausgangsgestein in allen waldbaulichen Varianten zum Verlust von Alkalinität (Mb-Kationen).
- Unter den waldbaulichen Behandlungsvarianten ist die bezüglich der Erhaltung der Pufferkapazität und pflanzenverfügbaren Mb-Kationenvorräte mit Abstand unpfleglichste Variante der Fichtenreinbestand mit Kahlschlag. Buchenreinbestand mit Kahlschlag und Buchenfemelschlagbetrieb ohne Vorverjüngung weisen eine ausgeglichene bis leicht negative Mb-Kationenbilanz auf und sind sich sehr ähnlich. Bei praxisüblicher Ernte von Holz in Rinde weisen Buchenfemelschlagbetrieb mit gesicherter Vorverjüngung und Buchen/Tannen/Fichtendauerwald eine leicht positive Mb-Kationenbilanz in vergleichbarer Größenordnung auf. Letzteres belegt, dass durch sehr vorsichtige Bestandesbehandlung (25 % längere Umtriebszeit, Verteilung der Hiebe auf 10 statt 5 Femelphasen) die Belastung für den Stoffhaushalt durch den 60 % igen Nadelholzanteil überkompensiert werden kann.
- Das waldbauliche Steuerungspotential bezüglich der Tendenz zu zunehmender Stickstoffsättigung ist deutlich stärker begrenzt als bei der Mb-Kationenbilanz. Hierbei ist zu bedenken, dass bei Varianten, die wie beispielsweise der Fichtenkahlschlagbetrieb der Stickstoffsättigung entgegenwirken, dieses mit einem erhöhten Nitrataustrag im Sickerwasser einhergeht und damit das Risiko für die Hydrosphäre überproportional hoch ist.
- Der Einfluss der waldbaulichen Behandlung auf den Sulfataustrag ist minimal, dieser ist überwiegend vom Schwefelvorrat im Boden und dessen Löslichkeit abhängig. Im Fichtenreinbestand, der Variante mit den höchsten Schwefelvorräten, beträgt die Zeitdauer bis diese „abgeflossen“ sein werden etwas weniger als 100 Jahre, ein Zeitraum in dem mit Nachwirkungen ehemaliger Sulfatdepositionen auf den Stoffhaushalt zu rechnen ist.

-
- Die Geschlossenheit des ökosystemaren Stoffhaushalts betrifft nicht nur Standortqualität und Produktivität von Wäldern, sondern gleichzeitig die Nachhaltigkeit von mittelbaren Waldfunktionen wie die Erhaltung wertvollen, schadstoff- und elektrolytarmen Wassers, die Senkenwirkung der Wälder für Treibhausgase und ihre Habitateigenschaften für naturnahe, seltene und schützenswerte Lebensgemeinschaften. Die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber forstlichem Handeln wird sich in Zukunft auch von der Nachhaltigkeit dieser mittelbaren Waldfunktionen herleiten und nicht nur von der Tatsache, dass im Wald Holz produziert wird.

6 SUMMARY AND CONCLUSIONS FOR THE PRACTICE

Silvicultural management strategies aim to optimize quantity and quality of wood production. However, they also provide boundary conditions for closedness or openness of element cycles in forest ecosystems. Silviculture implies patterns of harvest in space and time. There are very disproportional management strategies with clear-cutting phase where the element budget tends to be open. Continuous cover treatment with gap-oriented harvesting, when more or less equally distributed over the whole rotation period, creates rather closed element cycles. Long lasting air borne deposition of nitrogen and acids has depleted the buffering and filtering capacity of forest soils in Central Europe (thus also in the Black Forest) to a large extent and thus deteriorated site quality. Besides optimization of forest productivity it is an important task for silvicultural management strategies to keep the element budget of forest ecosystems as closed as possible under the regime of given environmental conditions.

In the “Conventwald” forest ecosystem study the element and water budgets are being monitored since 1991. The study site comprises several variants with varying tree species composition and silvicultural treatment. The study site is located at the western slope of the Middle Black Forest, 18 km east of Freiburg, in South-West Germany. The sub-plots have more or less identical site conditions and are situated in close vicinity with less than 500 m distance. The main goal of the investigation is to identify the potential of forest management and silviculture for stabilizing the element budget under the influence of the actual environmental conditions.

The study site is situated at 750–860 m a.s.l. and characterized by deeply developed, acidified Cambisols on dark Paragneis bedrock with high base content. The anthropogenic deposition load of acids and nitrogen is in the upper third of the range of the measurements in Baden-Wuerttemberg. The high soil nitrogen pool of up to 30 t ha⁻¹ nitrogen suggests that the “Conventwald” site represents a far developed stage of nitrogen saturation. Thus, the results of this study are predominantly representative for sites with high nitrogen availability. This meets the fact, that most of Central Europe's forest ecosystems are strongly influenced by N-depositions.

Measurements from 50 different structure units and silvicultural treatments served as a basis for calculating individual element fluxes and budgets for mixed and monocultured stands of the case study. Those structure units were considered as distinct phases in stand development under the precondition of different silvicultural management regimes.

As a result the matter fluxes of e.g. a clear-cut, beech regeneration, a pole-aged beech stand and an old aged beech stand, were re-arranged at a virtual model time axis. This allowed for generating the element budget of a monocultured beech management strategy with clear-cut regeneration, considering the whole rotation period. The disturbance in the element budget caused by thinning was modeled using the results from experimental gaps that have been created in 2002 by cutting 1–2 dominant trees, in a beech and a spruce pole aged stand respectively. Greater “femel gaps” with and without pre-regeneration served to describe element leaching after gap oriented harvesting. The definition of silvicultural man-

agement schemes considered the specific conditions of deposition, soil and site quality at the “Conventwald” forest ecosystem. The course of element fluxes attributed to the individual structure units was parameterized by means of non-linear regression models. These models have been combined to yield element fluxes covering whole rotation periods of five different silvicultural management regimes. Those were monocultured stands of spruce and beech after clear-cut regeneration (rotation period 100 and 130 years), beech stands with gap-oriented regeneration with and without pre-regeneration in the femel phases (rotation period 150 years) and finally a beech/silver-fir/spruce mixed stand (40/30/30%) with continuous cover management (nominal rotation period 200 years).

The element contents of the tree biomass have been determined in the above ground biomass compartments timber, bark, twigs and needles/leaves at different stand ages at the study site, as well as the biomass of these compartments. Thus, element fixation in the different biomass compartments of biomass through biomass growth could be assessed by combining the chemical data with growth dynamics taken from yield tables. The harvesting intensities were distinguished through differentiation between element pools of biomass compartments: harvesting “timber without bark”, “timber with bark” and “full tree harvesting” (all aboveground biomass compartments). The effects of these harvesting intensities on element balances have been examined which allowed for assessing their degree of sustainability. The deposition measurements of the “Conventwald” forest study enabled to model the input fluxes of nitrogen compounds, sulfate, basic metal (Mb) cations and total acidity. Mobilization of Mb cations by weathering of primary silicates was included in the models with a constant rate of $1,23 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. This rate of silica weathering includes the contribution of pre-weathered zones in the soil skeleton.

The total element balances for the five silvicultural management regimes resulted in a clear difference between spruce and beech, and also in a significant differentiation among the beech variants. The difference in element budgets among the harvesting intensities “timber without bark” and “timber with bark”, the latter representing the actual practice, was unexpectedly high.

The study reveals that the Mb cation balance can only be constantly equilibrated or kept slightly positive under the most cautious management regimes, i.e. the continuous cover mixed-species stand and gap oriented harvesting with safe pre-regeneration in beech stands. That applies to the influence of the actual deposition regime. The beech regime with clear-cut regeneration results in a clearly negative balance with a mean Mb cation loss of $0,3 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. In spruce stands with clear-cutting however, the mean Mb cation loss amounts to $2 \text{ kmol}_e \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ and higher. This is an order of magnitude at which severe inferences and damages on ecosystem functions cannot be excluded. One possible reaction could be a reduction in tree growth and thus resulting in lower uptake rates of Mb cations. Without reactions of adaptation this balance deficit would lead to the total loss of the exchangeable Mb cation pool in the fine soil within 40 years which is less than half of a rotation period in spruce. This underlines the importance of the nutritional potential of the coarse soil fraction.

The nitrogen balance is negative just for the spruce stands at all harvesting intensities, as well as for full tree harvesting at all variants of silvicultural management. This supports the hypothesis of increased nitrogen saturation of the forest ecosystems in the western part of

the Black Forest which cannot be substantially controlled by management options. The sulfur balance is negative for all silvicultural treatments with minimal differences among them. This outcome combined with the Sulfate pools in the mineral soil and their distribution among the stand types indicates re-mobilization processes of formerly deposited sulfur being stored in the mineral soil. Internal sulfate cycles cannot explain the net sulfate leaching and its relation to stand types in a conclusive way. The sulfur pool in the soil will need a little bit less than 100 years until it will be totally leached under the spruce/clear-cut regime, the variant with the highest balance loss for sulfur. That means that the element budget of forest ecosystems will be substantially influenced by the consequences of former sulfur depositions, despite the great reduction of sulfur deposition due to air purification policy.

Summarized conclusions for the practice are as follows:

- The buffering capacity of forest ecosystems can be maintained by means of silvicultural management strategies – even under the influence of the present deposition conditions. This means that Mb cation balances can principally be kept closed.
- The influence of harvesting intensity on the Mb-cation balance is unexpectedly high which means that harvesting intensities actually performed in practice have to be re-considered, especially at poor sites. Although full tree harvesting might be a desirable option with respect to the need of intensifying biomass export from forests for energy production, it leads to a substantial loss of alkalinity (Mb-cations) even at rich sites such as the Conventwald area.
- The spruce/clear-cut regime is by far the least sustainable management tool concerning the preservation of buffering capacity and plant available Mb cation pools in the soil. The beech/clear-cut- and beech femel regimes without safe pre-regeneration result in equilibrated or slightly negative Mb-cation balances and are quite similar to each other. The most careful regimes, beech femel with safe pre-regeneration and beech/silver-fir/spruce continuous cover, display slightly positive Mb-cation balances. The latter demonstrates that the tendency towards disequilibrium of the element budget as attributed to the 60 % conifers in the mixed stand can be over-compensated by a very careful management regime (25 % longer rotation period and distributing the harvest to 10 instead of 5 femel periods).
- The potential of silviculture to counteract the ecosystems trends towards nitrogen saturation is much lower than the potential to save the Mb cation pool and thus the acid buffering capacity of soils. Treatments, with the lowest tendency towards nitrogen saturation displayed the highest nitrate leaching. Thus, they are loaded with a disproportionately high risk for the hydrosphere.
- The influence of silviculture on sulfate leaching is minimal. Sulfate leaching mainly depends on the magnitude of the sulfur pool in the soil. It will take a little bit less than 100 years until the deposition borne sulfur pool will be totally mobilized in the spruce stand which is the variant with the highest sulfur pool. Obviously the element cycles of forest ecosystems are influenced by the after-effects of former sulfur deposition over a long period of time.

- Closed element cycles in forest ecosystems do not only influence quality and productivity of forest sites but also the sustainability of non-wood production functions of forest ecosystems. Thus, besides wood production, other forest functions like production of high quality water with low pollution, the function of forests as a sink for greenhouse gases, habitats for protected wildlife etc. are maintained in a sustainable way. The acceptance of forest management practices by the society will depend in the future also on how sustainable these non-wood production services will be generated.