

BERICHTE  
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

HEFT 87

**Biomasse-Aufkommensprognose und  
Kreislaufkonzept für den Einsatz  
von Holzaschen in der  
Bodenschutzkalkung  
in Oberschwaben**

Klaus v.Wilpert, Bernhard Bösch, Peter Bastian, Dietmar Zirlwagen,  
Frieder Hepperle, Stefan Holzmann, Heike Puhlmann,  
Jürgen Schäffer, Gerald Kändler und Udo Hans Sauter

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT  
BADEN-WÜRTTEMBERG

ABTEILUNG BODEN UND UMWELT

2011

ISSN 1436-1566

**Herausgeber:**

Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

**Redaktion:**

Damaris De  
Carina Sucker

**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](mailto:fva-bw@forst.bwl.de)  
Internet: [www.fva-bw.de](http://www.fva-bw.de)

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

Gedruckt auf 100 % chlorfrei gebleichtem Papier

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung .....	1
2	Material und Methoden .....	4
2.1	Untersuchungsregion Oberschwaben.....	4
2.2	Definition von Nutzungsszenarien .....	6
2.3	Methoden zur Herleitung der Holzaufkommensprognose .....	10
2.3.1	Herleitung des theoretischen Energieholzpotentials für den Einzelstamm .....	11
2.3.2	Herleitung des theoretischen Energieholzpotentials für das Projektgebiet.....	14
2.3.3	Herleitung des technischen Energieholzpotentials für das Projektgebiet.....	15
2.4	Schätzung der Stoffbilanz im kleinteiligen Geländebezug.....	17
2.4.1	Schätzung des Nährstoffeintrags mit dem Niederschlag.....	18
2.4.2	Schätzung der Nährstofffreisetzung mit der Mineralverwitterung.....	20
2.4.3	Schätzung des Nährelemententzugs mit der geernteten Biomasse .....	22
2.4.4	Schätzung des Stoffaustrags mit dem Sickerwasser (bzw. Interflow).....	26
2.5	Praxisbegleitende Untersuchungen zur Bewertung der technischen und ökonomischen Umsetzung eines Biomasse/Holzasche Kreislaufs .....	37
3	Nährelementkonzentrationen in Biomassekompartimenten .....	39
4	Ergebnisse der Bilanzkomponenten und der Gesamtbilanz.....	49
4.1	Holzaufkommensprognose nach Nutzungsszenarien – summarische Übersichten über die Untersuchungsregion.....	49
4.1.1	Waldflächen und Vorräte .....	49
4.1.2	Prognose des theoretischen potenziellen Biomasseaufkommens ....	50
4.1.3	Abschätzung des theoretischen Energieholzpotentials .....	53
4.1.4	Abschätzung des technischen Energieholzpotentials nach Szenarien .....	53
4.2	Stoffbilanzen nach Nutzungsszenarien – summarische Übersicht über die Untersuchungsregion .....	56
4.2.1	Das Szenario 1: konventionelle Sortierung Stammholz/Industrieholz, mechanisierte Ernte .....	60
4.2.2	Das Szenario 2: Stammholz/Industrieholz, motormanuelle Ernte .....	64
4.2.3	Das Szenario 3: Stammholz/Industrieholz, motormanuelle Ernte mit Handentrindung .....	65
4.2.4	Das Szenario 4: Stammholz/Industrieholz/Energieholz, mechanisierte Ernte .....	68
4.2.5	Das Szenario 5: Stammholz/Energieholz, mechanisierte Ernte .....	68

4.2.6	Vergleich des Elementexports mit der Biomasse zwischen den Szenarien für physiologisch wichtige Nährelemente und Spurennährelemente .....	72
5	Darstellung logistischer, technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen der Nutzungsszenarien und des Biomasse/Holzasche- Kreislaufkonzepts ...	76
5.1	Chemische Zusammensetzung und Korngrößenzusammensetzung der verwendeten Holzaschen und Dolomit-/Holzasche-Mischungen.....	76
5.1.1	Suche nach Aschelieferanten .....	76
5.1.2	Anforderungen an die beteiligten Kalkwerke .....	80
5.1.3	Chemische und physikalische Eigenschaften der im Projekt verwendeten Holzaschen .....	82
5.2	Technische Aspekte und ökonomische Kalkulation der Nutzungsszenarien unter aktuellen Marktbedingungen - Kosten der Biomassemobilisierung für energetische Nutzung.....	95
5.2.1	Überschlägige Kalkulation des erntekostenfreien Ertrags aus den Nutzungsszenarien .....	95
5.2.2	Kompensationsbedarf, Kosten der Nährelementrückführung auf dem Wege der Bodenschutzkalkung .....	99
5.3	Logistik und Kosten der Herstellung und Ausbringung von Dolomit – Holzasche-Mischungen, Analysekosten für Qualitätskontrolle .....	104
5.3.1	Logistik.....	104
5.3.2	Ausbringung im Wald.....	107
5.3.3	Kosten.....	109
6	Diskussion und Bewertung der untersuchten Nutzungsszenarien und des Biomasse/Holzasche Kreislaufkonzepts.....	111
6.1	Bewertung der Nutzungsszenarien, Vergleich mit anderen Studien ...	111
6.1.1	Nutzungspotentiale .....	111
6.1.2	Bewertung der stofflichen Nachhaltigkeit der Nutzungsszenarien ..	113
6.2	Machbarkeit des Biomasse/Holzasche Kreislaufkonzepts .....	119
6.3	Rechtliche Aspekte eines Biomasse/Holzasche Kreislaufkonzepts, administrative Lösungsansätze.....	121
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Praxis .....	125
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse und deren Bewertung.....	125
7.2	Eckpunkte für die Erhaltung der stofflichen Nachhaltigkeit bei der Holzernte .....	132
7.3	Eckpunkte für die praktische Umsetzung eines Biomasse/Holzasche Kreislaufs.....	133
8	Literatur .....	136
9	Anhang.....	140

## **7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Praxis**

Hier werden die wesentlichen Befunde der Studie und deren Interpretation in knapper Form zusammengefasst um daraus Schlussfolgerungen für die Bewertung der stofflichen Nachhaltigkeit in der Holzernte allgemein, für eine Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen der verstärkten Energieholznutzung im Wald und für die Steuerung und technische Umsetzung eines Biomasse/Holzasche Kreislaufkonzepts im Zuge der Bodenschutzkalkung zu ziehen. Diese Schlussfolgerungen sollen im Sinne praktischer Handreichungen formuliert werden.

### **7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und deren Bewertung**

Waldholz ist der größte der Energieerzeugung zugängliche Holz-Biomassepool, der durch entsprechende Nutzungsstrategien in seiner Größenordnung erheblich variiert werden kann. Die Projektregion Südwestdeutsches Alpenvorland ist eine der produktivsten Regionen Baden-Württembergs, so dass das Waldholzpotential dort eine relevante Größenordnung einnimmt. Mit der Untersuchung wurden folgende Ziele verfolgt:

- Im Sinne eines Demonstrationsprojektes sollte das zusätzliche und/oder alternativ zur konventionellen Holzernte im Wald mobilisierbare Biomassepotential für eine hinreichend große und naturräumlich diverse Projektregion abgeleitet werden.
- Durch einen Vergleich zwischen einem konventionellen, der aktuellen Nutzungstechnologie weitgehend entsprechenden Nutzungsszenario und zwei Szenarien mit unterschiedlich intensiver Energieholznutzung sollte die Auswirkung dieser unterschiedlichen Strategien auf die Erntemasse, den Stoffhaushalt der Waldböden, d.h. die stoffliche Nachhaltigkeit und den erntekostenfreien Erlös abgeschätzt werden.
- Die technischen und organisatorisch/rechtlichen Aspekte für die Etablierung eines Holzbiomasse/Holzasche Kreislaufkonzepts zur weitgehenden Rückführung der in den Aschen enthaltenen Mineralstoffe sollte untersucht und die Machbarkeit eines solchen Konzepts im großtechnischen Praxismaßstab getestet werden.

### **Holzaufkommensprognose und Stoffbilanzierung**

Mittels des Programms WEHAM (Waldentwicklung und Holzaufkommensmodellierung) wurden an allen 523 in der Projektregion liegenden Trakten der Bundeswaldinventur (BWI) Sortimentsmassen ermittelt. Über multiple lineare Regressionsbeziehungen zwischen Bodendaten aus dem 8x8 km Rasternetz der Forstlichen Umweltüberwachung und kontinuierlich aus Kartenwerken und Geländemodellen verfügbaren Geländemerkmale wurden Regionalisierungsmodelle berechnet, welche die Übertragung aller für die Erstellung von Stoffbilanzen notwendigen chemischen und physikalischen Daten auf die BWI-Trakte ermöglichte.

Stoffbilanzen wurden als die zentrale Beurteilungsgröße der stofflichen Nachhaltigkeit für die Nährelemente Calcium, Magnesium und Kalium berechnet. Dabei werden Stoffeinträge in das Ökosystem gegen Stoffausträge bilanziert. Quantitativ relevante Bilanzelemente sind hierbei:

- Nährelementeintrag mit dem Niederschlag
- Nährelementfreisetzung durch Verwitterung/Auflösung primärer Minerale
- Nährelementaustrag mit dem Sickerwasser
- Nährelementexport mit der geernteten Holzbiomasse

Für die Nährelemente Schwefel, Stickstoff, Phosphor, Eisen, Mangan und Zink wurde eine stark vereinfachte Bilanzierung durch einen Vergleich der mit der Biomasse exportierten Nährelementmengen und den durchschnittlichen Bodenvorräten in der Humusaufgabe und im Mineralboden bis 60 cm durchgeführt.

Die Berechnung der Biomassemengen und deren Verbleib wurden aus den Sortimentmassen aus WEHAM generiert. Ebenso war die Berechnung der mit der Biomasse exportierten bzw. mit der Holzasche zurückgeführten Stoffmengen durch die Verknüpfung von, chemischen Nährelementanalysen mit den Sortimentmassen aus WEHAM möglich. Hierbei wurden die Nährelementanalysen nach Biomassekompartimenten getrennt (Holz, Rinde, Äste und Reisig) an 100 Probestämmen (60 Fichten und 40 Buchen) gewonnen. Die Kalkulationen wurden nach den Hauptbaumarten Fichte und Buche getrennt durchgeführt und entsprechend der Nadel- und Laubholzanteile auf die BWI-Trakte übertragen.

### Nutzungsszenarien

All diese Berechnungen wurden für fünf Nutzungsszenarien durchgeführt:

**Szenario 1:** konventionelle Sortierung (Stammholz + Industrieholz), vollmechanisierte Holzernte. Verbleib der nicht stofflich verwerteten Biomasse (Äste, Reisig, Restderbholz) in Reisigmatten auf den Rückegassen.

**Szenario 2:** konventionelle Sortierung (Stammholz + Industrieholz) vollständig motormanuelle Holzernte, Verbleib der nicht stofflich verwerteten Biomasse auf der Bestandesfläche.

**Szenario 3:** wie Szenario 2, zusätzlich Handentrindung und Verbleib der Rinde auf der Fläche.

**Szenario 4:** konventionelle Sortierung (Stammholz + Industrieholz). Die restliche Krone wird zu Energieholz verarbeitet und als Asche auf die Waldflächen zurückgeführt.

**Szenario 5:** Nur Stammholz stofflich genutzt. Die restliche Krone und das Industrieholz einschließlich anhaftender Äste werden zu Energieholz verarbeitet und als Asche auf die Waldflächen zurückgeführt.

Die Nutzungsszenarien führen in Abhängigkeit von der Nutzungstechnik zu einer unterschiedlichen Biomassemobilisierung. Die sortenbezogenen Erntemengen summieren sich für Szenario 1 auf knapp 1,69 Mio. Vfm. Für die beiden Szenarien

mit Energieholznutzung liegt die Erntemenge mit 1,92 Mio. VFm für Szenario 4 und für Szenario 5 mit 1,98 Mio VFm um 12-15 % (230.000 bzw. 290.000 VFm) höher. Dies entspricht der technisch mobilisierbaren Energieholzmenge, die aus der Restkrone, dem Restderbholz und den anhaftenden Ästen und Zweigen besteht. Bei dieser Darstellung ist zu beachten, dass sie alle Waldbesitzarten einschließlich Privatwald einbezieht, um das physikalisch mögliche Nutzungspotential abzubilden. Sozioökonomische Eigentümerzielsetzungen wurden hier ausgeblendet.

Das aus Restkrone, Kilben und Industrieholz in der gesamten Region im Zuge der regulären Waldbewirtschaftung generierbare, technisch nutzbare, maximale Energieholzpotential in Szenario 5 umfasst ca. 350.000  $t_{\text{atro}}$  pro Jahr. In Szenario 4 werden 147.400  $t_{\text{atro}}$  pro Jahr an Energieholz mobilisiert, das sind 42 % der in Szenario 5 maximal generierbaren Energieholzmenge. Von der in Szenario 5 mobilisierbaren Energieholzmenge ist etwas mehr als die Hälfte (58 %) Industrieholz und Stammholz-Kilben, sowie 42 % zusätzlich mobilisierte Holzbiomasse aus den Restkronen und dem Derbholz anhaftenden Zweigen. Allerdings ist zu bedenken, dass die Ernteverluste in Höhe von etwas mehr als 120.000  $t_{\text{atro}}$  pro Jahr (Szenario 4) und 146.000  $t_{\text{atro}}$  pro Jahr (Szenario 5), dies sind 81 bzw. 42 % der maximal mobilisierbaren Energieholzmenge, hoch erscheinen. Durch technische Verbesserungen der Ernteverfahren könnte sicherlich ein nennenswerter Anteil dieser Ernteverluste zusätzlich der energetischen Verwertung zugeführt werden.

Bei einem Laubholzanteil an der Biomasseproduktion von ca. 33 % hat der durchschnittliche Schüttkubikmeter einen Heizwert von 961 kWh. Die in der Region maximal pro Jahr mobilisierbare Energieholzmenge beträgt ca. 1,8 Mio. Schüttkubikmeter mit einem Heizwert von 198 MW Dauerleistung pro Jahr. Zum Vergleich: der Kernreaktor Gundremmingen A hat eine elektrische Dauerleistung von 250 MW ([http://www.bfs.de/kerntechnik/ereignisse/standorte/karte\\_kw.html](http://www.bfs.de/kerntechnik/ereignisse/standorte/karte_kw.html), letzter Aufruf 02/2011). In Szenario 4, bei dem Energieholz ausschließlich aus der Restkrone gewonnen wird, wird in der Region aus Energieholz eine Heizleistung von 83 MW Dauerleistung pro Jahr generiert, das sind etwas mehr als 40 % der in Szenario 5 generierten Leistung.

Die erntekostenfreien Erlöse liegen bei dem Szenario mit konventioneller, rein auf stoffliche Verwertung orientierte Sortierung (Szenario 1) für die gesamte Untersuchungsregion bei 93,98 Mio. €, in Szenario 4 mit 97,49 Mio. € um 3,51 Mio. € höher und in Szenario 5 mit 98,47 Mio. € um nochmals knapp 0,98 Mio € höher. Das bedeutet, dass trotz der gegenüber den Industrieholzpreisen geringfügig niedrigeren Energieholzpreise und der etwas höheren Holzerntekosten beim Energieholz die merklich höheren Erntemassen (10 bis 15 %) die derzeit marktbedingt etwas geringeren Erlöse bei Energieholzaushaltung überkompensieren, so dass der Gesamterlös um 4 bis 5 % höher liegt als bei einem auf rein stoffliche Verwertung orientierten Nutzungskonzept. Das bedeutet, dass selbst unter den heutigen Marktbedingungen die Mobilisierung von Waldholz zur Energieerzeugung ökonomisch

misch sinnvoll ist. So kann trotz der Preiskonkurrenz zu Industrieholz dieses in die Energieholzmobilisierung mit einbezogen werden.

### **Bewertung der Stoffbilanzen in den Nutzungsszenarien**

In der Folge werden die einzelnen, von den Nutzungsszenarien nicht beeinflussten, nur von den Standortfaktoren gesteuerten Elemente der Stoffbilanz als Mittelwerte über alle BWI-Trakte in der Untersuchungsregion dargestellt:

- Für den Basen - Eintrag mit der Deposition wurde für die gesamte Untersuchungsregion der langjährig gemessene Mittelwert von 0,68 kmol<sub>e</sub>/ha/a für die Summe der Deposition von Calcium+Magnesium+Kalium angenommen.
- Die mittlere Basenfreisetzung (Calcium+Magnesium+Kalium) durch Mineralverwitterung wurde auf 1,21 kmol<sub>e</sub>/ha/a geschätzt.
- Der über alle BWI-Trakte gemittelte Elementaustrag mit dem Sickerwasser beträgt für Calcium 0,598 kmol<sub>e</sub>/ha/a, für Magnesium 0,168 kmol<sub>e</sub>/ha/a und für Kalium 0,019 kmol<sub>e</sub>/ha/a. Für die Summe der basischen Kationen beträgt er knapp 0,8 kmol<sub>e</sub>/ha/a.

Für die nicht von der Holzernte und ihrer technischen Umsetzung beeinflussten, natürlichen und umweltbedingten Bilanzkomponenten summieren sich die Stoffeinträge (Deposition+Mineralverwitterung) für die Summe der basischen Kationen zu durchschnittlich 1,89 kmol<sub>e</sub>/ha/a. Zieht man davon den Basenexport mit dem Sickerwasser von durchschnittlich 0,8 kmol<sub>e</sub>/ha/a ab, verbleiben ca. 1,1 kmol<sub>e</sub>/ha/a durchschnittlicher Basenüberschuss.

Der Nährelementexport mit der Holzernte ist das einzige Bilanzelement, das von den Nutzungsszenarien, d. h. von Menge und Verbleib der durch die Holzernte mobilisierten Biomassen und darin enthaltenen Nährelementen abhängt. Für Szenario 1 (kein Energieholz, vollmechanisierte Ernte) sind die Nährelementexporte im Vergleich der Nutzungsstrategien am höchsten, da alle Restholzmengen und insbesondere das nährstoffreiche Kronenmaterial auf der Rückegasse in Reisigmatten akkumuliert wird. Die Nährstoffexporte betragen für Calcium 1,01 kmol<sub>e</sub>/ha/a, für Magnesium 0,18 kmol<sub>e</sub>/ha/a, für Kalium 0,05 kmol<sub>e</sub>/ha/a und für die Summe aller Basenkationen 1,24 kmol<sub>e</sub>/ha/a.

Für das durch motormanuelle Aufarbeitung und Handentrindung besonders schonende **Szenario 3** betragen die Exporte für Calcium 0,51 kmol<sub>e</sub>/ha/a, für Magnesium 0,09 kmol<sub>e</sub>/ha/a, für Kalium 0,03 kmol<sub>e</sub>/ha/a und für die Summe aller Basenkationen 0,63 kmol<sub>e</sub>/ha/a. Das heißt, dass die Belastung für den Stoffhaushalt halbiert wird, belässt man konsequent alle nicht stofflich verwerteten Biomassen auf der Bestandesfläche. Dies setzt jedoch eine sehr kleinteilige Erntetechnik voraus, bei der die vollständige Aufarbeitung bis zur Entrindung auf der Bestandesfläche verteilt erfolgt. Für diese Anforderungen ist derzeit keine für den Bodenschutz akzeptable mechanisierte Lösung verfügbar, so dass in diesem Szenario vollständig



motormanuelle Aufarbeitung einschließlich Handentrindung angenommen wurde. Unter heutigen Arbeits- und Marktbedingungen ist dieses Verfahren ökonomisch und auch ergonomisch unrealistisch. Es sollte nur ein Gefühl für die maximal mögliche Schonung des Stoffhaushalts bei vergleichbarer Holznutzung wie in einem vollmechanisierten Verfahren vermitteln. Letzteres kommt der derzeitigen Praxisrealität in der Untersuchungsregion nahe. Der Schutzeffekt der motormanuellen gegenüber der vollmechanisierten Ernte, die de facto eine Vollbaumernte darstellt, hat eine vergleichbare Größenordnung wie die an der Ökosystemfallstudie Conventwald (Böden aus nährstoffreichem Paragneis des Kristallin-Schwarzwald) abgeleiteten Modellwerte (v. Wilpert 2008). In der Untersuchungsregion Oberschwaben ist die Ernte jedoch um ca. 20 % höher.

Das **Szenario 5** (Stammholznutzung, alle anderen Sortimente als Energieholz) generiert mit einem Gesamt-Basenexport mit der genutzten Biomasse von  $0,59 \text{ kmol}_e/\text{ha/a}$  unter der Voraussetzung einer vollständigen Basenrückführung durch Holzasche-Recycling etwa den gleichen „Schutzeffekt“ für den Stoffhaushalt wie das technisch unrealistische Szenario 3. Dies gilt, obwohl der Biomasseexport bei diesem Energieholz - maximierten Szenario durch Nutzung der Restkrone, sowie von Restderbholz und Ästen um ca. 15 % höher ist.

Die Variation der Bilanzwerte bisher dargestellter Mittelwerte ist auf der Fläche in Abhängigkeit von Beständen und Standortseigenschaften erheblich. Wenn man die räumlichen Verteilungsmuster der Biomassenexporte in der Untersuchungsregion mit denjenigen der mineralischen Nährelementexporte vergleicht, fällt auf, dass diese weitgehend identisch sind. Dies bedeutet, dass der Elementexport mit der Biomasse hauptsächlich von der Biomassemenge gesteuert wird und kaum oder gar nicht von Konzentrationsunterschieden, die durch Standortseigenschaften und/oder dem Alter bestimmt werden. Die beiden Bilanzelemente „Nährstoffnachlieferung aus Mineralverwitterung“ und „Austrag mit dem Sickerwasser“ zeigen erkennbar ein von geologischen und bodenkundlichen Randbedingungen abhängiges räumliches Verteilungsmuster. Diese Variation auf der Fläche kann auf dem Wege der Bodenschutzkalkung und des Ascherecyclings weitgehend ausgeglichen werden.

Die summarischen Stoffbilanzen (Tabelle 11) zeigen, dass in der Untersuchungsregion die Nährelementversorgung für Kalium am ehesten zu einer Mangelversorgung wird. Für dieses Element liegt die mittlere Bilanz für die Szenarien 1, 2 und 4 mit mittleren Bilanzdefiziten zwischen  $0,01$  und  $0,1 \text{ kmol}_e/\text{ha/a}$  im negativen Bereich und nur für die Szenarien 3 und 5, die aktive Maßnahmen zur Mineralstoffrückführung vorsehen, ist die Kaliumbilanz in vergleichbarer Größenordnung positiv. Für Calcium liegen die mittleren Bilanzen bei den Szenarien 1 mit einem Bilanzdefizit von  $-0,3 \text{ kmol}_e/\text{ha/a}$  deutlich im negativen Bereich, bei 2 und 4 sehr nahe am Bilanzgleichgewicht und bei den für den Stoffhaushalt schonendsten Szenarien 3 und 5 deutlich im positiven Bereich. Für Magnesium liegt die mittlere Stoffbilanz in der Region für alle Szenarien im leicht positiven Bereich und der Unterschied

zwischen den Szenarien ist relativ gering. Die Varianz um die mittleren Bilanzen ist für alle basischen Elemente erheblich.

### **Biomasse – Holzasche Kreislaufkonzept**

Ein wesentliches Projektziel war es, die technische Umsetzbarkeit zur Rückführung der mit der Biomasse aus den Waldökosystemen exportierten Nährelementmengen auszuloten. Aus diesem Grund wurde in Kooperation mit zwei Kalkwerken die Technik der Herstellung einer Dolomit-/Holzasche-Mischung als neues Produkt zur Waldkalkung entwickelt und technisch optimiert. In den beiden Projektjahren 2008 und 2009 wurde auf insgesamt 1561 ha dieses Produkt ausgebracht. Die Ergebnisse der maßnahmenbegleitenden Qualitätskontrollen der Holzaschen und des daraus hergestellten Produkts einer Dolomit-/Holzasche-Mischung zeigten, dass sinnvolle Qualitätsanforderungen an die Aschen sowie die von verschiedenen Umweltnormen geforderten Grenzwerte problemlos eingehalten werden können (Kapitel 5.1). Die Variation sowohl der chemischen Kennwerte als auch der Korngrößenzusammensetzung in der Dolomit-/Holzasche-Mischung ist niedrig, so dass man von gut standardisierten Produkteigenschaften ausgehen kann, die auch auf dem Vergabeweg konkretisiert und eingefordert werden können. Dabei können folgende Nährelementgehalte mit Sicherheit eingehalten werden:

75 Gew.%	Gesamtkarbonatgehalt (überwiegend $\text{CaCO}_3$ )
12 Gew.%	MgO-Gehalt (Toleranz 1 %)
1 Gew.%	$\text{K}_2\text{O}$ -Gehalt (Toleranz 0,2 %)
0,5 Gew.%	$\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt (Toleranz 0,1 %)

Die Kosten für die Herstellung dieser Mischung sind um etwa 10 % höher als für erdfeuchtes Dolomit-Gesteinsmehl. Die ernährungswirksamen Kalium- und Phosphorgehalte sind mit 1 und 0,5 % sehr niedrig, so dass die programmatische Forderung der vollständigen Rückführung aller mit dem Energieholz exportierten Nährelementmengen im Bezug auf diese Element nicht in vollem Umfang umsetzbar sein wird. In Kapitel 5.2.2 wurde gezeigt, dass die Rückführung der exportierten Gesamtkarbonatmenge zu realistischen Kosten von knapp 4 €/ha/a möglich ist. Jedoch ist dabei die vollständige Rückführung aller exportierten Kaliummengen durch den geringen  $\text{K}_2\text{O}$ -Gehalt in der Mischung nicht möglich. Dies ist jedoch auch nicht nötig, da die Kaliumvorräte im Boden hoch und durch die Kalkung die biologische Aktivität der Böden erhöht und dadurch die Bodenvorräte besser pflanzenverfügbar werden. Vergleichbares gilt für Phosphor.

Ein Nebeneffekt dieser Produktentwicklung ist, dass weitgehende Erfahrungen mit den umwelt- und immissionsschutzrechtlichen Rahmenbedingungen gesammelt werden konnten, die uns befähigen, gemeinsam mit den Genehmigungsbehörden den organisatorischen Rahmen für die Herstellung der Dolomit-/Holzasche-Mischung und deren genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen auf tragfähige und praxisorientierte Weise zu klären.

Die Kostenkalkulationen zeigen, dass, wird der Kompensationsbedarf an einem Mittelwert aus Gesamtkarbonatdefizit und Kaliumdefizit orientiert und der  $K_2O$ -Gehalt in der Dolomit-/Holzasche-Mischung auf 2 % angehoben, die Kompensationskosten für die Region bei 1,6 Mio. €/a liegen (bei ausschließlicher Orientierung am Gesamtkarbonatdefizit 0,55 Mio. €/a). Im Vergleich zu dem in Kapitel 5.2.1 dargestellten Mehrerlöses von knapp 4,5 Mio. €/a in der Region bei konsequenter Energieholzmobilisierung wird in Szenario 5 gegenüber Szenario 1 ein um die Kompensationskosten bereinigter Mehrerlös von 2,9 Mio. €/a generiert (wenn nur Gesamtkarbonatdefizit ausgeglichen wird 2,95 Mio. €/a).

### Schlussfolgerungen

Abschließend ist festzuhalten, dass die konventionelle Holzernte, wenn diese überwiegend vollmechanisiert erfolgt, durch Akkumulation von Reisisgmaterial auf Rückegassen in Bezug auf den Stoffhaushalt einer Vollbaumnutzung entspricht und stofflich nicht nachhaltig ist, da es derzeit keine technische Möglichkeit der Rückführung der in dieser Biomasse enthaltenen Nährelemente auf die Fläche gibt. Die Nutzungsszenarien mit Energieholzgewinnung exportieren 10-15 % mehr Biomasse. Dieser sehr moderaten Steigerung der Ernteintensität steht aber der gravierende Vorteil gegenüber, dass nach der Verbrennung des Energieholzes die in der Holzasche enthaltenen Nährelemente wieder quantitativ den Waldflächen zugeführt und auf diesen mehr oder weniger gleichmäßig verteilt werden können. Vor dem Hintergrund dieser Argumentation ist die Option einer Vermeidung von Energieholzgewinnung auf Standorten, auf denen die „Nachschaffende Kraft“ des Waldbodens nicht ausreicht, um die erhöhten Nährelementexporte auszugleichen, wie sie von Göttlein (2007), Kölling et al. (2007) und auch Meiwes et al. (2008) zumindest auf weniger nährstoffkräftigen Standorten nahelegen, zu überdenken. Dies gilt insbesondere, da die Ergebnisse dieser Studie in einer naturräumlich überdurchschnittlich gut mit Nährelementen ausgestatteten Region erarbeitet wurden. Wenn hier schon auf ca. 60 % der Fläche ein Bilanzdefizit, gleichermaßen bei konventioneller Nutzung (Szenario 1) und Nutzungsstrategien mit Energieholznutzung (Szenarien 4 und 5) besteht (Tabelle 14), würde das bedeuten, dass auf diesen Flächen sowohl konventionelle Nutzung als auch Energieholznutzung nicht oder nur noch eingeschränkt stattfinden könnten, wenn man im Sinne einer Vermeidungsstrategie nur die Biomasse nutzen wollte, die stofflich ohne technische Rückführung der Nährstoffe nicht nachhaltig sind. Die Szenarien 2 und insbesondere 3 haben gezeigt, dass mit konsequent motormanueller Ernte die konventionelle Holzernte in stofflicher Hinsicht prinzipiell nachhaltig durchgeführt werden kann, was jedoch die Holzerntekosten in prohibitiver und unrealistischer Weise erhöhen würde. Außerdem würde die umweltpolitisch sinnvolle Nutzung des nachwachsenden Rohstoffes Holzbiomasse für die Energieerzeugung nur zu geringen Anteilen des möglichen Potentials genutzt werden und auf jeden Fall gegenüber der derzeitigen Nutzung nicht wesentlich gesteigert werden können. Auf der Basis dieser Überlegungen erscheint es zwingend und sinnvoll, die Energieholzernte zu maximieren – die Ernteintensität wird dadurch nur moderat um 10 bis 15 % steigen

und damit die technische Möglichkeit zu schaffen, über einen Holzschekreislauf die durch die Ernte entstehenden Stoffhaushaltsdefizite weitestgehend wieder auszugleichen. Dabei wird in der aufgrund der Geologie gut mit Nährelementen ausgestatteten Region Oberschwaben ein Kalkungsbedarf von 2.200 ha zusätzlich zu dem neu formulierten, regenerationsorientierten Kalkungsprogramm mit einem Kalkungsbedarf von landesweit 21.000 ha entstehen. In weniger gut nährstoffversorgten Regionen ist davon auszugehen, dass dieser zusätzliche Kompensationsbedarf höher sein wird. Bei diesen Überlegungen ist jedoch immer zu bedenken, dass mit dem dargestellten Strategieansatz nicht nur die mit der Energieholzernte exportierten Nährelemente wieder auf die Waldflächen zurückgeführt, sondern auch die durch konventionelle Holzernte entstandenen Stoffhaushaltsdefizite ausgeglichen werden können.

## 7.2 Eckpunkte für die Erhaltung der stofflichen Nachhaltigkeit bei der Holzernte

- Die Studie hat gezeigt, dass auch in einer Region mit überdurchschnittlicher Standortsqualität wie Oberschwaben Nutzungsstrategien mit konventioneller Sortierung und den derzeitigen Erntetechniken stofflich nicht mehr nachhaltig sind. Dies liegt daran, dass aus ökonomischen und ergonomischen Gründen aufwendige händische Arbeitsverfahren, bei denen Rest-Biomassen und insbesondere nährstoffreiche Kronenteile auf der Fläche verteilt zurückbleiben, sukzessive durch Erntetechniken ersetzt wurden, bei denen diese Nährelementmengen der Fläche entzogen werden.
- Hinzu kommt, dass „quasi-natürliche“ Nährelementexporte über den Sickerwasserfluss durch Bodenversauerung und Verminderung der stabilen Nährelementspeicherung im Boden unnatürlich erhöht sind.
- Szenario 3 zeigt, dass prinzipiell diese Problematik durch extrem differenzierte und prohibitiv aufwendige Verfahren wie motormanuelle Aufarbeitung und Handentrindung zu entschärfen wäre. Diese Option ist jedoch ökonomisch nicht realisierbar.
- Die Nutzungsstrategien mit Energieholzgewinnung haben gezeigt, dass aus Waldholz ein erhebliches, bisher nur ansatzweise genutztes Energieholzpotential realistisch mobilisiert werden kann. Dieses umfasst in der knapp 140.000 ha großen Untersuchungsregion bis zu 350.000 t<sub>atro</sub> pro Jahr, was einer Kraftwerks-Dauerleistung von ca. 200 MW entspricht.
- Die Nutzungsstrategien mit Energieholzernte sind ökonomisch denjenigen mit konventioneller Sortierung konkurrenzfähig bis leicht überlegen.
- Energieholznutzung eröffnet die technische Möglichkeit die in der Biomasse enthaltenen Mineralstoffe wieder auf der Fläche zu verteilen. Konventionelle, vollmechanisierte Holzernte ist in Bezug auf die stoffliche Nachhaltigkeit der Wälder die belastendste Variante und eröffnet derzeit keine praktikable technische Option zur Nährelementrückführung.

- Die Kosten der Nährelementrückführung durch eine Dolomit-/Holzasche-Mischung werden vom Mehrerlös durch Energieholznutzung getragen.
- Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Nutzung von Energieholz ökologisch wie ökonomisch sinnvoll ist.

### 7.3 Eckpunkte für die praktische Umsetzung eines Biomasse/Holzasche Kreislaufs

- Für die Herstellung einer Dolomit-/Holzasche-Mischung, die dem Düngemitteltyp „Kohlensaurer (Magnesium)Kalk“ der DüMV entspricht, dürfen nur Brennraumaschen aus naturbelassenem und unbehandeltem Holz (entspricht dem NAWARO-Standard) verwendet werden, welche die Schwermetallgrenzwerte der DüMV 2008 nicht überschreiten.
- Die vorgeschriebenen Schwermetallgrenzwerte können problemlos eingehalten werden. Die vorgeschriebenen Qualitätskontrollen sowohl der verwendeten Aschen als auch des Endprodukts sind technisch und organisatorisch gelöst.
- Der Ascheanteil in der Mischung soll nicht mehr als 30 bis 50 % betragen (letzteres nur, wenn die Schwermetallgrenzwerte der DüMV ohne 50 % Toleranz eingehalten werden).
- Die Eigenschaften der Dolomit-/Holzasche-Mischung sind gut standardisiert – es ist ein definiertes Produkt.
- Sowohl die Logistik und die genehmigungsrechtlichen Probleme zu deren Herstellung wurden aufwandsarm gelöst und die chemische und physikalische Homogenität des Produkts optimiert, so dass die Ausbringung im Wald mit den vergleichbaren Qualitätsanforderungen wie die Ausbringung von erdfeuchtem Dolomit-Gesteinsmehl möglich ist.
- Zur besseren Verfügbarmachung der in den Schlacken okkludierten Nährelemente hat es sich als vorteilhaft erwiesen, bei der Herstellung der Dolomit-/Holzasche-Mischungen einen Mahlgang einzuschalten. Der Grobanteil > 2mm soll <2 % betragen (Toleranz 0,5%).
- Folgende Mindestanforderungen sollen von der Dolomit-/Holzasche-Mischung eingehalten werden, um deren Ernährungswirksamkeit und technische Handhabbarkeit zu garantieren: 75 Gew.% Gesamtkarbonatgehalt; 12 Gew.% MgO-Gehalt (Toleranz 1 %); 1 Gew.% K<sub>2</sub>O-Gehalt (Toleranz 0,2 %); 0,5 Gew.% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> –Gehalt (Toleranz 0,1 %); Feinstanteil (<0,1 mm) >=50 %; Wassergehalt 10 %.
- Die Nährelementgehalte von Kalium und Phosphor sind in der Mischung zu niedrig, als dass sie vollständig zurückgeführt werden können. Dies kann durch eine Erhöhung der Pflanzenverfügbarkeit dieser Nährstoffe durch die Kalkung kompensiert werden. Es ist jedoch eine Überwachung der Waldernährung im 5-Jahresturnus erforderlich.

- Eine Erhöhung der Kalium- und Phosphor-Gehalte kann durch eine Erhöhung der Ascheanteile von 30 auf max. 50 % erfolgen oder durch Beteiligung von Aschen aus kleineren Brennstätten, die i.d.R. höhere Kalium- und Phosphor-Gehalte aufweisen. In beiden Fällen steigen jedoch der logistische und technische Aufwand, sowie die Kosten.
- Wenn man eine Dosierung von 4 t/ha unterstellt, die auf 50 % der behandelten Flächen das Dolomit-/Holzaschegemisch per Helikopter ausgebracht wird, ergeben sich Durchschnittskosten in Höhe von 248 €/ha. Diese Kosten liegen um ca. 10 bis 15 % über den Kosten für Material und Ausbringung von erdfeuchtem Dolomitgesteinsmehl.
- Die Ausbringung soll in erdfeuchter Form erfolgen, da durch die Feuchte eine Karbonatisierung der Aschen gefördert wird und diese dann weniger alkalisch reagieren. Die Ausbringung ist per Helikopter und Verblasen möglich, wobei die Verteilgenauigkeit in beiden Fällen gut ist.