

Runder Feldtisch

Keine Entwarnung für die Waldböden

Wangen ZH, 11. Mai 2010

unter der Leitung von

Bernhard Nievergelt, Präsident AfW

aufgezeichnet von

Brigitte Wolf

www.afw-ctf.ch
info@afw-ctf.ch

Inhalt

Zusammenfassung / Résumé	3
1 Hintergrund	4
2 Referate 1. Teil (im Wald)	4
2.1 Der Wangenerwald und die IAP-Versuchsfläche	4
2.2 25 Jahre Walddauerbeobachtung – interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU	4
2.3 Modellierungen im Rahmen des IAP	7
2.4 Nährstoffeffizienz in der Landwirtschaft – Düngung, Recycling, Bodenschutz	8
3 Referate 2. Teil	9
3.1 Die Bedeutung des Grobbodens für die Waldernährung	9
3.2 Standortnachhaltigkeit – Gefährdung und Massnahmen	11
4 Diskussion der Teilnehmerinnen und Teilnehmer	13
5 Gedanken des Gesprächsleiters Bernhard Nievergelt	14
6 Liste der Teilnehmerinnen und Teilnehmer	15
7 Weblinks	16

Impressum

Herausgeberin und Bezugsquelle des gedruckten Berichts:

Arbeitsgemeinschaft für den Wald
Ebnetstrasse 21, 3982 Bitsch
Telefon 027 927 14 33
E-Mail: info@afw-ctf.ch

Fotos: Brigitte Wolf

PDF-Download: www.afw-ctf.ch

Zusammenfassung

Anlässlich der Delegiertenversammlung vom 11. Mai 2010 in Wangen ZH besuchte die Arbeitsgemeinschaft für den Wald (AfW) unter dem Titel «Keine Entwarnung für Waldböden» eine Untersuchungsfläche des interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms der Kantone Aargau, Bern, Basel-Land, Basel-Stadt, Freiburg, Solothurn, Thurgau, Zug, Zürich und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Res Guggisberg, Kreisforstmeister Forstkreis 2 des Kantons Zürich stellte als Einleitung den Wangenerwald und die Versuchsfläche vor. **Walter Flückiger** vom Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) blickte auf 25 Jahre Waldbeobachtung zurück und beleuchtete die Resultate des interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogrammes. **Sabine Braun** vom IAP sprach über Modellierungen im Rahmen des Programms. **Peter Weisskopf** und **René Flisch** vom Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) warfen einen Blick in die Landwirtschaft und referierten über Nährstoffeffizienz, Düngung, Recycling und Bodenschutz. **Ernst E. Hildebrand** vom Institut für Bodenkunde der Uni Freiburg i. Br. stellte seine Studien über die Bedeutung des Grobbodens für den Stoffhaushalt von Bäumen vor. **Sabine Augustin** vom Bundesamt für Umwelt machte sich Gedanken zur Standortnachhaltigkeit und ging den Gefährdungen und Massnahmen näher auf den Grund.

Im Anschluss an die Referate diskutierten die Referentinnen und Referenten mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern über die vielfältigen Belastungen der Waldböden und die Möglichkeiten der Waldwirtschaft und der Politik, den negativen Entwicklungen entgegenzuwirken. Dabei beschränkte sich die Diskussion auf den chemischen Bodenschutz, im Wissen darum, dass der physikalische Bodenschutz genauso wichtig ist. Dieser wird in einem zweiten Runden Feldtisch im November 2010 behandelt (Bericht unter www.afw-ctf.ch).

Résumé

A l'occasion de l'assemblée des délégués, qui s'est tenue le 11 mai 2010 à Wangen ZH, la Communauté de travail pour la forêt (CFT) a visité une placette d'observation appartenant au programme intercantonal d'observation permanente des forêts. Les cantons d'Argovie, de Berne, de Bâle-Campagne, de Bâle-Ville, de Fribourg, de Soleure, de Thurgovie, de Zoug, de Zurich ainsi que l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sont réunis par ce programme. La visite placée sous le titre « Keine Entwarnung für Waldböden » était consacrée aux sols forestiers.

Res Guggisberg, garde forestier auprès du canton de Zurich, a présenté, en introduction, la forêt de Wangen ainsi que le terrain d'observation. **Walter Flückiger** de l'Institut de biologie végétale appliquée (IBA) a présenté une rétrospective des 25 années d'observation de la forêt et il a mis en avant les résultats du programme d'observation permanente. **Sabine Braun** de l'IBA a évoqué les cas modèles du programme. **Peter Weisskopf** et **René Flisch** de l'Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) ont donné un aperçu du thème par rapport à l'agriculture en abordant l'efficacité des nutriments, l'apport d'engrais, le recyclage et la protection du sol. **Ernst E. Hildebrand** de l'institut de pédologie de l'université de Freiburg i. Br. a présenté ses études concernant l'importance du sol grossier pour le métabolisme des arbres. **Sabine Augustin** de l'Office fédéral de l'environnement a présenté ses idées concernant la durabilité des lieux et a analysé les dangers et mesures à prendre.

Suite à ces présentations, les intervenants ont discuté avec les participants sur les différents impacts pour les sols forestiers et sur les possibilités d'agir dans le cadre de l'exploitation forestière et de la politique, afin d'aller à l'encontre des évolutions négatives. Cette discussion s'est limitée à la protection chimique du sol en sachant que la protection physique est toute aussi importante. Celle-ci fera l'objet d'une deuxième table ronde, en novembre 2010 (voir rapport sur www.afw-ctf.ch).

1 Hintergrund

Im Frühling 2009 veröffentlichte das Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) im Auftrag der neun Kantone Aargau, Bern, Basel-Land, Basel-Stadt, Freiburg, Solothurn, Thurgau, Zug, Zürich und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) den dritten Bericht über die Gesundheit des Waldes (IAP 2009). Der Bericht zeigt, dass sich die Wachstumsbedingungen für den Wald in den letzten 25 Jahren an vielen Orten verschlechtert haben. Vor allem die hohen Stickstoffeinträge machen dem Wald und seinen Bäumen zu schaffen. Sie führen unter anderem zur Versauerung der Böden und zu einem Verlust von Nährstoffen. Die Ergebnisse der 25-jährigen Waldbeobachtung zeigen dringenden Handlungsbedarf.

Jüngste Forschungsergebnisse aus Deutschland geben Anlass zur Hoffnung, dass sich die Waldbäume ein Stück weit selbst zu helfen wissen. Studien zeigen, dass der Grobboden in Waldökosystemen weitaus mehr in die Stoffkreisläufe eingebunden ist, als bisher angenommen, und ein hohes Potenzial an kurz- bis mittelfristig verfügbaren Nährstoffen aufweist. Bindeglied zwischen den Nährstoffvorräten in Steinen und dem Stoffhaushalt der Bäume sind nährstoffadsorbierende Pilzgewebe.

Der steigende Bedarf an Energieholz und die damit einhergehende Vollbaumnutzung bringen ein neues Problem für die Nährstoffversorgung der Waldböden mit sich. Werden neben dem Stammholz auch Äste, Nadeln und Laub geerntet, hat dies einen enormen Nährstoffverlust zur Folge. Die Rückführung von Nährstoffen muss diskutiert werden. Eine Möglichkeit stellt das Ausbringen von Holzasche im Wald dar.

2 Referate 1. Teil (im Wald)

2.1 Der Wangenerwald und die IAP-Versuchsfläche

Res Guggisberg, Kreisforstmeister Forstkreis 2 des Kantons Zürich

Die Gemeinde Wangen liegt auf 500 m ü. M. und verzeichnet rund 1000 mm Niederschlag pro Jahr. Die Fläche beträgt 790 ha. Rund ein Viertel davon (200 ha) ist von Wald bedeckt. 130 ha sind Privatwald, was die Bewirtschaftung nicht einfach macht. Eine alte Korporation von 1840 schreibt die Rechte fest. Früher wurde im Wangenerwald vor allem Brennholz genutzt, später setzte man stark auf Fichte. Erst in jüngerer Zeit wurden vermehrt auch Laubbäume gefördert. 1986 sah die Baumzusammensetzung wie folgt aus: 56% Fichte, 3% Tanne, 1% Föhre, 17% Buche, 23% andere Laubbäume.

Die natürliche Waldgesellschaft auf der besuchten Fläche im Rahmen des «Runden Feldtisches» ist ein Waldmeister-Buchenwald mit Rippenfarn (7*), für welchen eine Empfehlung von 40% Laubholz gilt.

Nach den trockenen Sommern 2003, 2004 und 2005 starben im Wangener Wald viele Fichten infolge eines Befalls mit der Fichtenquirlschildlaus und mit Borkenkäfern ab. Nähere Untersuchungen durch das IAP ergaben, dass an diesem Phänomen eine sehr tiefe Kaliumversorgung beteiligt ist. Mit einer Dauerbeobachtungsfläche sollte nach den Ursachen und nach möglichen Massnahmen für eine Verbesserung gesucht werden.

2.2 25 Jahre Walddauerbeobachtung – interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU

Walter Flückiger, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP)

Vor 26 Jahren wurde das Interkantonale Walddauerbeobachtungsprogramm ins Leben gerufen. Damals richtete das IAP in der Schweiz 52 Dauerbeobachtungsflächen ein, später kamen 131 weitere Flächen hinzu (Abbildung 1). Auf diesen Flächen wird der Zustand der Bäume und des Bodens regelmässig überprüft. Jährlich werden Kronenverlichtung, Kronenverfärbung, Fruktifikation (bei der Fichte) und Parasitenbefall untersucht. Alle vier Jahre werden Stammzuwachs, Triebzuwachs, Fruktifikation (bei der Buche), Nährstoffstatus in Laub und Nadeln (N, P, K, Ca, Mg, Mn), Parasiten an Zweigen sowie Verfärbungen an Laub und Nadeln registriert. Alle acht bis zehn Jahre stehen Bodenchemie, Regenwurmpopulation, Vollkluppierung, Baumhöhe und Kronenprojektion auf dem Programm. Alle 15 bis 20 Jahre werden Bodenvegetation, Jungwuchs und Verbiss untersucht. In ausgesuchten Flächen werden im Auftrag des BAFU zudem weitergehende Experimente, Untersuchungen und Modellberechnungen durchgeführt.

Stickstoffeintrag

Inzwischen kristallisierten sich als Hauptproblem für die Waldböden und damit für die Bäume die hohen Stickstoffeinträge über die Luft heraus. Unzählige Untersuchungen und Studien haben die negativen Folgen der Stickstoffdepositionen, die insbesondere aus der Landwirtschaft, aber auch aus Industrie und Verkehr kommen, aufgezeigt. Vor allem im Mittelland und im Südtessin sind die Stickstoffeinträge sehr hoch. Verbreitet finden sich Stickstoffdepositionen von 20 bis 30 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr, Einträge von 30 bis 40 kg sind keine

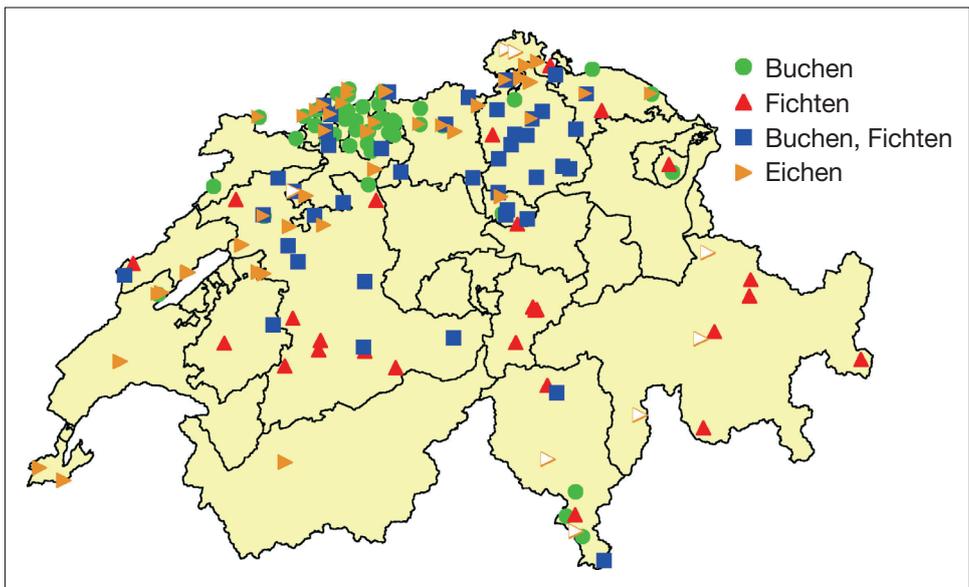


Abb. 1: Beobachtungsflächen des interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramm.

Seltenheit, und vereinzelt werden sogar über 40 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr registriert (Abbildung 2). Als kritischer Eintragswert gelten 10 bis 20 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr. Als Indikator für die Stickstoffsättigung eines Ökosystems gilt die Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser, die im Flachland 4 bis 5, im Gebirge 1 bis 2 kg pro Hektare und Jahr nicht übersteigen sollte.

Phosphormangel

Eine Folge davon ist beispielsweise eine kontinuierliche Abnahme des Phosphors in den Blättern von Bäumen. Zwar gibt es im Boden genügend Phosphor, die Bäume haben aber ein Problem bei der Aufnahme. Es kommt zu einem Phosphormangel. Während 1984 lediglich auf 10% der Versuchsflächen ein Phosphormangel festge-

stellt wurde, waren 2007 bereits 80% der Flächen betroffen. Bei den Buchen musste in den letzten Jahren zudem vermehrt ein Magnesiummangel beobachtet werden.

Dass bei Buchen ein Zusammenhang zwischen einem zu hohen Stickstoffeintrag und der Blattkonzentration an Phosphor, Kalium und Magnesium besteht, zeigte ein Düngungsexperiment in Hochwald im Kanton Solothurn und auf einer Versuchsfläche am Zugerberg (Abbildung 3). Bei ausgewachsenen Buchen und Fichten konnte zudem ein Zusammenhang zwischen Phosphorkonzentration im Laub und Wachstum festgestellt werden. Phosphormangel führt zu einem Wachstumsrückgang, wie dies in einer Untersuchung an 560 Buchen und 330 Fichten festgestellt werden konnte.

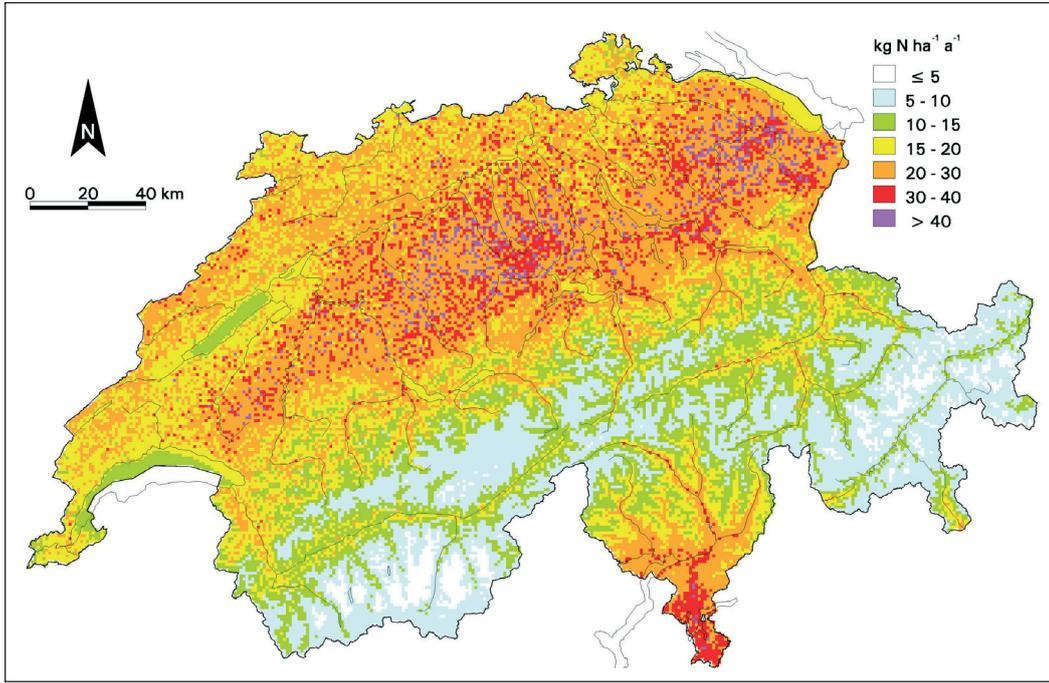


Abb. 2: Modellierter Stickstoffeintrag in Wälder und andere Ökosysteme in der Schweiz.

Kaliummangel

Auf der betrachteten Fläche im Wangenerwald zeigen die Fichten eine Vergilbung der Nadeln. Grund dafür ist ein Kaliummangel, welcher zu physiologischem Trockenstress führt. Trockenstress wiederum führt zu einem erhöhten Risiko, dass die Fichten von der Schildlaus und vom Borkenkäfer befallen werden. Ein Versuch im Wangenerwald zeigte: Fichten, die mit Kalium gedüngt wurden, hatten nicht nur signifikant höhere Kaliumkonzentrationen in den Nadeln (Abbildung 4), sondern wiesen im Splintholz auch signifikant mehr Harzgänge auf als ungedüngte Fichten (Abbildung 4). Auch in diesem Fall hat der hohe Stickstoffeintrag wohl zum Kaliummangels beigetragen.

Eutrophierung

Der hohe Stickstoffeintrag führt zu einer Eutrophierung der Waldböden. Sehr schön zeigt sich dies am verstärkten Wachstum der Brombeere. Je höher die Stickstoffdeposition, desto grösser der Bedeckungsgrad des Waldbodens mit Brombeeren.

Bodenversauerung

Der hohe Stickstoffeintrag führt zudem zu einer Auswaschung von basischen Nährstoffen und damit zu einer Versauerung der Waldböden. Basensättigung und pH-Wert haben in den letzten Jahren abgenommen. Es besteht ein

deutlicher Zusammenhang zwischen dem pH-Wert im Boden und der Regenwurmdichte. Bei einem pH-Wert unter 4 können im Boden praktisch keine Regenwürmer mehr gefunden werden. Die Regenwürmer haben bekanntlich eine grosse Bedeutung für die Waldböden. Sie haben einen positiven Einfluss auf Streuabbau, Bodendurchmischung, Drainage, Bodendurchlüftung und die Bildung von stabilen Krümelaggregaten. Im Wangenerwald finden sich zwar viele Streubewohner, aber wenige Vertikal- und Horizontalbohrer wie Regenwürmer.

Je saurer der Waldboden ist, desto mehr Mangan gibt es im Boden. Sinkt der pH-Wert jedoch unter 4, nimmt auch das Mangan wieder ab. In hohen Mengen wirkt Mangan als Gift für die Bäume. Es kommt zu einer Anreicherung von Mangan in den Blättern.

Wurzeloberfläche

Ein weiterer Einfluss des Stickstoffeintrags beziehungsweise der Versauerung des Waldbodens auf die Waldbäume zeigt sich im Bereich der Wurzeln. Zwar verändert sich die Biomasse der Wurzeln mit steigendem Stickstoffgehalt nicht wesentlich, der Längenanteil der Feinstwurzeln (bis 2 mm Durchmesser) nimmt aber deutlich ab. Dies bedeutet, dass dem Baum weniger Wurzeloberfläche zur Verfügung steht. Zudem ist die Durchwurzelungstiefe in sauren Böden schlechter. Dadurch steigen Trockenstress und Anfälligkeit für Windwurf.

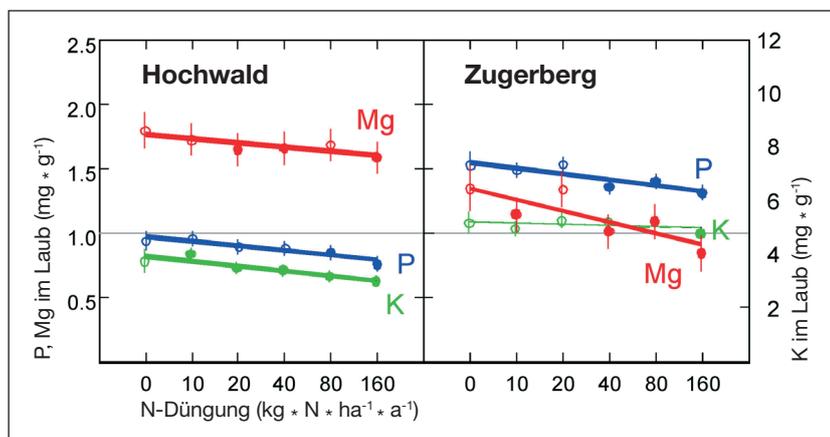


Abb. 3: Einfluss einer Stickstoffdüngung auf die Blattkonzentrationen verschiedener Mineralien bei Buchen.

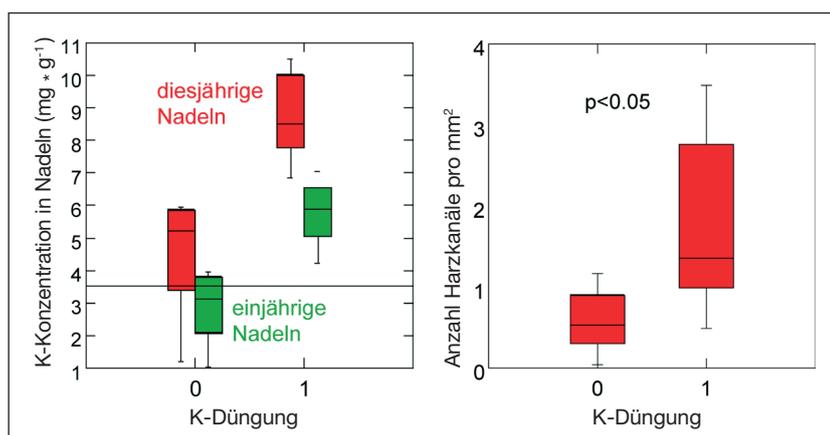


Abb. 4: Kaliumkonzentration in Fichtenadeln (links) und Harzkanäle im Splintholz der Fichten im Kalium-Düngeversuch in Wangen.

2.3 Modellierungen im Rahmen des IAP

Sabine Braun, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP)

Zurzeit steigt in der Schweiz der Bedarf an Energieholz. Diese an sich erfreuliche Entwicklung bringt ein neuartiges Problem bei der Holznutzung mit sich. Immer öfter wird nicht mehr nur das Stammholz aus dem Wald genommen, sondern der ganze Baum inklusive Rinde, feine Äste, Nadeln und Laub. Dies hat einen enormen Nährstoffverlust zur Folge. Während die Vollbaumnutzung nur 30% mehr Biomasse bringt als die Stammnutzung, werden dem Wald doppelt bis viermal so viel Nährstoffe (Kalzium, Phosphor, Stickstoff, Kalium und Magnesium) entzogen (Abbildung 5 und 6). Bei der Fichte ist der Phosphorentzug bei der Vollbaumnutzung sogar sechsmal so hoch wie bei der Stammnutzung. Weit aus die meisten Mineralsalze finden sich in den Nadeln und dem Laub. Die Vollbaumernte verstärkt somit die negativen Folgen der Bodenversauerung zusätzlich.

Die Vollbaumnutzung bringt nur einen vermeintlichen Gewinn; denn langfristig nimmt die Volumenzunahme der Bäume aufgrund des Nährstoffverlustes ab. Eine Untersuchung aus Österreich hat gezeigt, dass der Volumenzuwachs von Fichten abhängig ist vom Ernteverfahren. Der Volumenzuwachs ist am grössten, wenn nur das Schaftholz genutzt wird, etwas kleiner, wenn der trockene Vollbaum genutzt wird, und deutlich niedriger, wenn der grüne Vollbaum geerntet wird (Abbildung 7).

Wangenerwald im Vergleich zu den anderen Beobachtungsflächen

Die Untersuchungen im Wangenerwald haben gezeigt, dass Basensättigung und Nährstoffsituation im Vergleich zum Durchschnitt aller Dauerbeobachtungsflächen eher

schlecht sind. Die Basensättigung ist gerade mal halb so hoch wie im Durchschnitt. Der Nährstoffgehalt im Buchenlaub und in den Fichtennadeln, welcher in den letzten 25 Jahren allgemein stark abgenommen hat, ist im Wangenerwald vergleichbar zu den übrigen Flächen. Eine Ausnahme bildet das Kalium, das im Wangenerwald sowohl in den Fichtennadeln als auch im Buchenlaub deutlich niedriger ist als im Durchschnitt der Flächen. Das Mangan als Versauerungsindikator ist im Buchenlaub doppelt so hoch, in den Fichtennadeln sogar dreieinhalb Mal so hoch wie der Durchschnitt.

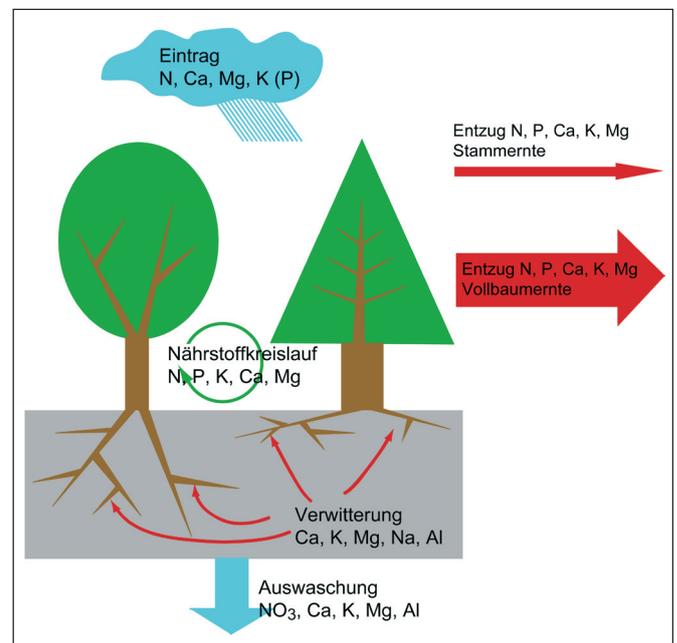


Abb. 5: Nährstoffkreislauf im Wald bei Stammernte und Vollbaumernte.

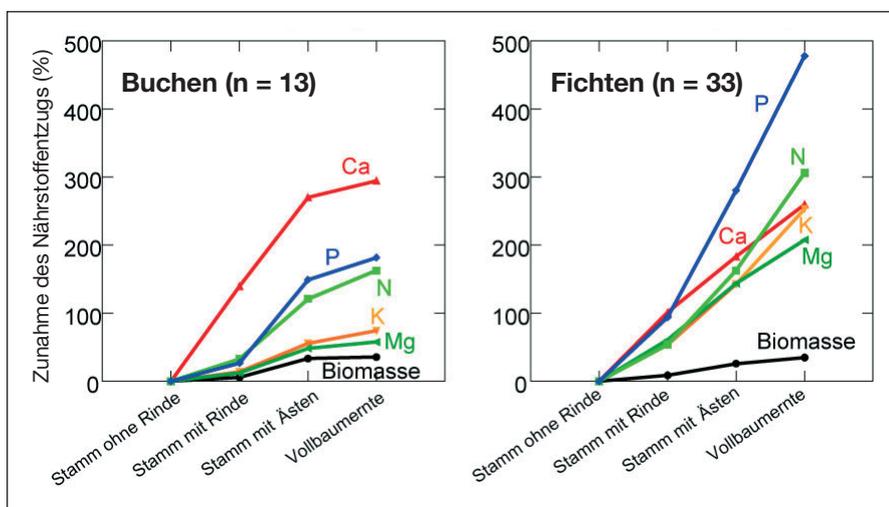


Abb. 6: Nährstoffentzug bei Buchen und Fichten bei unterschiedlichen Ernteszenarien (Stamm ohne Rinde, mit Rinde, mit Ästen, Vollbaumernte).

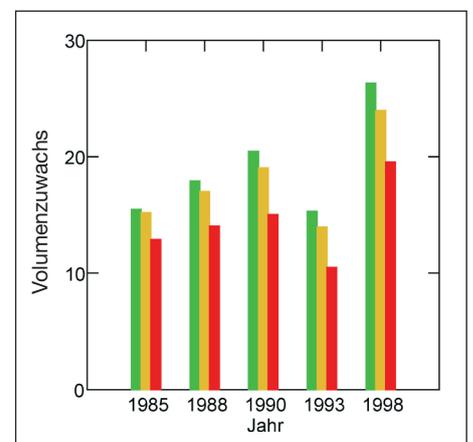


Abb. 7: Laufender Volumenzuwachs von Fichten in Abhängigkeit von der Nutzungsintensität. Grün = Schaftholz, gelb = Vollbaum trocken, rot = Vollbaum grün.

2.4 Nährstoffeffizienz in der Landwirtschaft – Düngung, Recycling, Bodenschutz

René Flisch und Peter Weisskopf, Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)

Die Nährstoffeffizienz ist in der Landwirtschaft ein wichtiger Grundsatz. Bei der Düngung geht es darum, möglichst wenig Stickstoff zu «verlieren». Die Ziele für eine effiziente Düngung in der Landwirtschaft können folgendermassen definiert werden:

- Deckung des Nährstoffbedarfs der Pflanzen
- einwandfreie Qualität der Ernteprodukte
- minimaler Nährstoffeinsatz für standortgerechte Erträge
- maximale Nährstoffeffizienz
- minimale Nährstoffverluste
- Erhaltung der nachhaltigen Bodenfruchtbarkeit

Es gibt verschiedenen Möglichkeiten, Nährstoffverluste zu vermeiden und die Belastung für Luft- und Gewässer möglichst klein zu halten, so zum Beispiel:

- Ausbringen von stickstoffhaltigen Düngern nur bei unmittelbarem Bedarf der Pflanzen
- Sparsames Güllen bei ungünstigen Topografie-Verhältnissen
- exaktes Verteilen des Düngers
- keine Gülle und flüssige Dünger bei heissem, trockenem und windigem Wetter
- Ausbringen von flüssigem Dünger nur auf saugfähigem Boden während der Vegetationszeit
- verlustarme Ausbringetechnik (z.B. Schleppschlauchverfahren)
- Sickerungshilfen für flüssigen Dünger (Lockerung der Bodenoberfläche)

Eine wichtige Stickstoffquelle sind die Hoftiere selbst. Bei der Freilandhaltung gelangt viel mehr Stickstoff in die Umgebung als bei der Stallhaltung. Dies führt zu einem Zielkonflikt mit dem Tierwohl und dem Tierschutzgesetz. Auf Viehhaltungsbetrieben ist auch das Management und die Lagerung der Hofdünger zentral (rasches Sammeln von Harn und Kot, Lagerung in geschlossenen Behältern). Der Umgang mit Hof- und Recyclingdüngern ist wesentlich schwieriger als derjenige mit Handelsdüngern (Mineraldüngern). Viele Massnahmen zur Verminderung der Stickstoffverluste sind mit Kosten für die Bauern verbunden.



Abb. 8: Sabine Braun (rechts) bringt den Teilnehmern die Resultate der IAP-Untersuchungen im Wangenerwald näher.

3 Referate 2. Teil

3.1 Die Bedeutung des Grobbodens für die Waldernährung

Ernst E. Hildebrand, Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Freiburg i. Br.

Im Südschwarzwald gibt es Waldstandorte mit weniger als 32 kg pflanzenverfügbarem Magnesium pro Hektare im Boden. Obwohl das sehr wenig ist, können nur wenige Mangelsymptome wie Vergilbung beobachtet werden. Die Erklärung dafür ist in den Podsolböden zu suchen: Die meisten Baumwurzeln sind im Oberboden und in der Streu zu finden.

Nährelementpotenzial des Grobbodens

Den Boden kann man in einen Grob- und einen Feinboden unterscheiden. Zum Grobboden oder zu den «Steinen» rechnet man die Bestandteile mit einem Durchmesser von mehr als 2 Millimeter, zum Feinboden beziehungsweise zur Feinerde die kleineren Bestandteile. Die pflanzenverfügbaren Nährstoffe befinden sich im Feinboden (Zeitskala: Jahre). Aus dem Grobboden oder den Steinen erfolgt durch Verwitterung ein langfristiger Import von Nährstoffen (Zeitskala: Jahrzehnte bis Jahrhunderte).

In einer Studie im Südschwarzwald bei Freiburg i. Br. wurden Steine aus dem Waldboden genauer untersucht. Dabei zeigte sich, dass pflanzenverfügbares Magnesium nicht nur im Feinboden, sondern auch im Grobboden zu finden ist. An einigen Standorten befindet sich das Magnesium sogar zur Hälfte oder sogar zu drei Vierteln in den Steinen. Zudem ist die Basensättigung in allen Bodentiefen in den Steinen viel höher als in der Feinerde (Abbildung 9).

Falls dieses Magnesium in den Steinen für die Wurzeln von Bäumen zugänglich ist, erklärt sich auch, warum die Bäume trotz «Magnesiummangel» in der Feinerde keine Mangelsymptome zeigen. Das Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Freiburg i. Br. ging deshalb der Frage nach, ob und in welchem Ausmass der Grobboden zur Ernährung der Bäume beitragen kann.

Der Grobboden als Lebensraum: gibt es eine Steinsphäre?

Der Nachweis gestaltete sich schwierig. Es war nicht einfach, die Steine von Feinerdematerial zu reinigen, ohne allfällige Wurzeln zu zerstören. Schliesslich konnte aber in einem aufwändigen Verfahren gezeigt werden, dass Pilzhyphen in kleinste Poren und Fisuren von Steinen hineinwachsen und sich dank eigener Säure sogar in die Steine

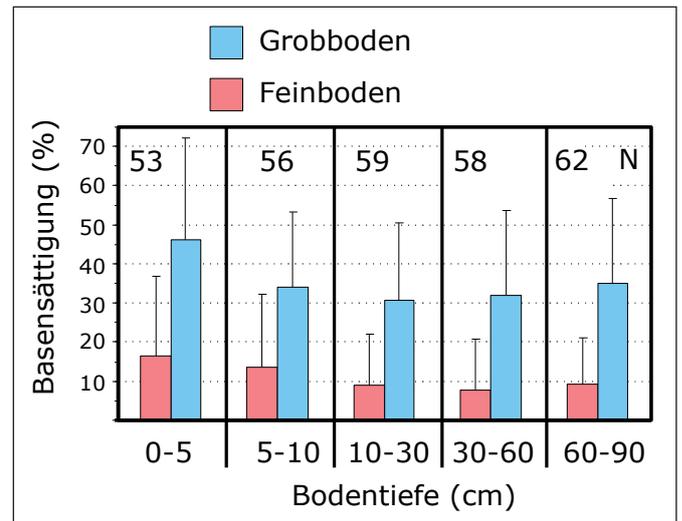


Abb. 9: Basensättigung im Grob- und im Feinboden.

hineinfressen können. Es wurden zwar keine Baumwurzeln in den Steinen gefunden, sehr wohl aber Pilzhyphen, welche mit den Bäumen eine Mykorrhiza eingehen (Abbildung 10). In der Feinerde, welche an den Steinen klebte, war die Basensättigung höher als weiter von den Steinen entfernt. Die Steine im Boden bilden demnach einen «Hotspot» an Nährstoffverfügbarkeit.

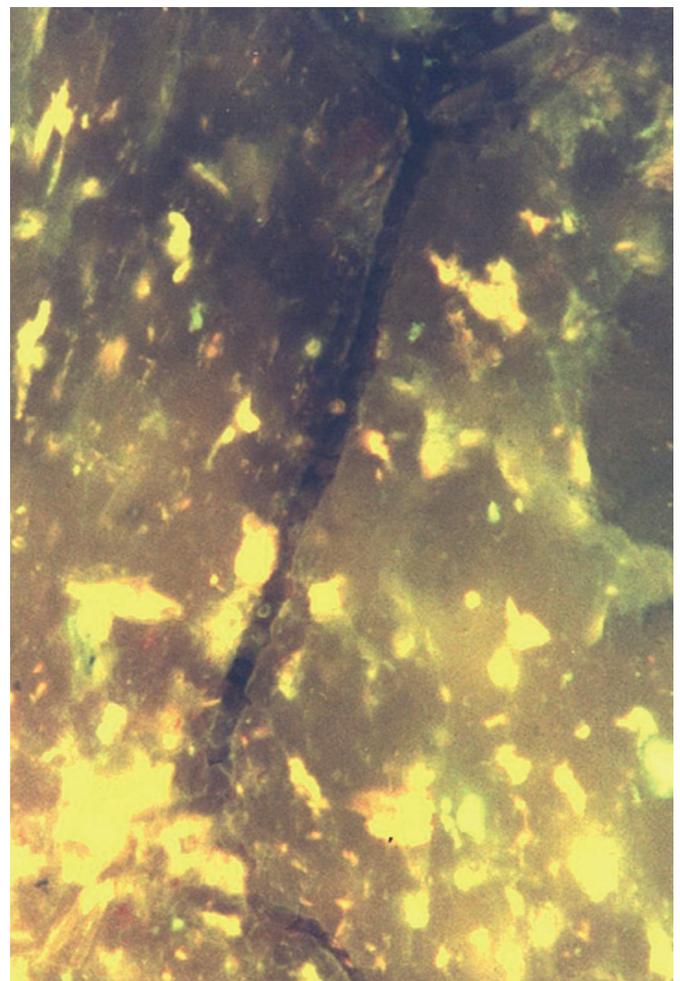


Abb. 10: Pilzhyphen in einem Stein.

Normalerweise wird von den Bodenkundlern die Grenze des Ökosystems zwischen dem Boden und den Steinen gezogen. Nach den neusten Erkenntnissen bilden die Steine jedoch einen «fließenden» Übergang zum Boden und können sogar dem Lebensraum zugerechnet werden. Je saurer der Boden, desto stärker werden die Steine durch Pilzhyphen besiedelt. Dadurch kann die Nährstoffaufnahme verbessert werden.

Mikrokosmenversuche

In einem «Mikrokosmosversuch» wurde die Nährstoffaufnahme von Fichtenkeimlingen in drei unterschiedlichen Versuchsanordnungen miteinander verglichen:

- 1) Fichtenkeimlinge mit Steinen, Quarz und Mykorrhiza
- 2) Fichtenkeimlinge mit Steinen und Quarz
- 3) Steine, Quarz und Mykorrhiza ohne Fichtenkeimlinge

Als Nährstoffe wurden NH_4^+ und K^+ , aber kein Magnesium hinzu gegeben. Die Frage war, bei welcher Versuchsanordnung die Fichtenkeimlinge Magnesium aus den Steinen gewinnen können.

Am meisten Nährstoffe aufnehmen konnten die Fichtenkeimlinge in Kombination mit der Mykorrhiza. Am wenigsten Nährstoffe gewinnen konnten die Keimlinge ohne Mykorrhiza (Abbildung 11).

In einem zweiten Versuch zeigte sich folgendes Bild: Mit Mykorrhiza war der Kalium-, Kalzium- und Magnesiumgehalt der Fichtenkeimlinge nach Versuchsende viel höher als ohne Mykorrhiza (Behandlung mit einem Fungizid) (Abbildung 12).

Fazit

Die Steine in Waldböden bilden einen eigenen Lebensraum. Neben der «Rhizosphäre» kann man auch von einer «Steinsphäre» sprechen. Die Steine stellen eine «stille Reserve» für die Ernährung der Bäume dar. Die Gewinnung von Mineralien aus den Steinen ist für die Mykorrhiza jedoch schwierig, und es ist anzunehmen, dass diese Möglichkeit nur bei einem Mineralienmangel genutzt wird. Diese Vermutung wird durch die Beobachtung gestützt, dass in basenreichen Böden kaum Mykorrhiza in den Steinen gefunden werden.

Wie gross das nutzbare Reservoir an Mineralien in den Steinen ist, ist bisher schwierig abzuschätzen. In Granit beispielsweise ist die nutzbare Oberfläche geringer als in Gneis, der mehr Fisuren aufweist. Über Dolomit besteht kaum Bedarf an zusätzlichen Mineralien. Noch unklar ist der Einfluss von Stickstoff auf die Fähigkeit der Mykorrhiza, Nährstoffe aus den Steinen zu gewinnen. Stickstoff kann das Gleichgewicht zwischen Baum und Mykorrhiza beeinträchtigen.

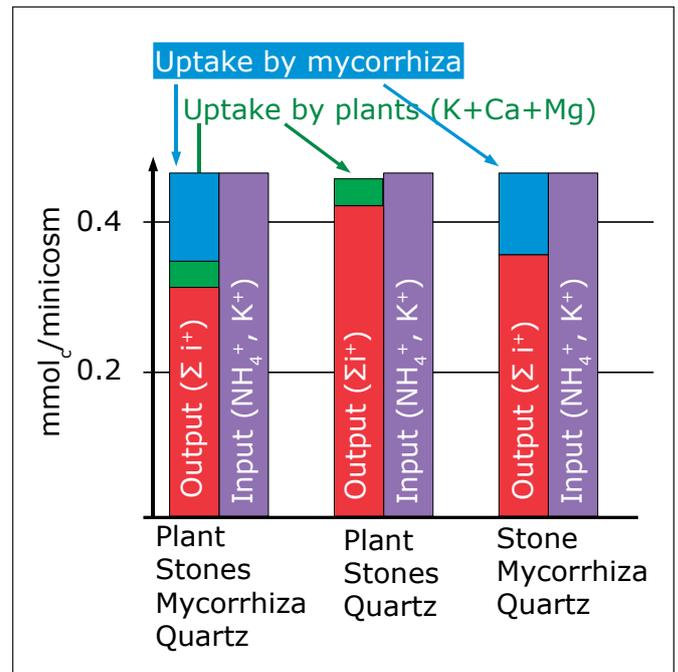


Abb. 11: Resultate der Mikrokosmenversuche mit Fichtenkeimlingen.

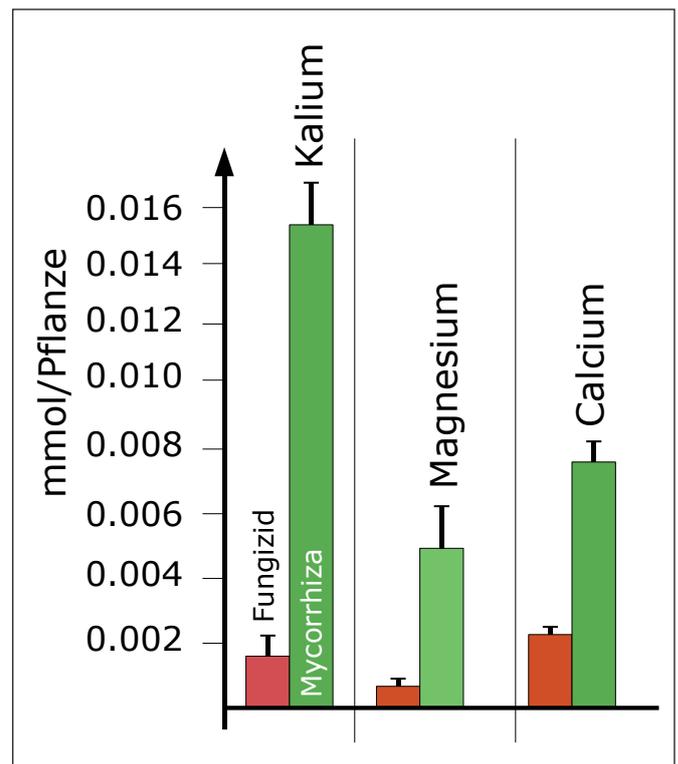


Abb. 12: K-, Mg- und Ca-Gehalt bei Versuchsende in den Fichtenkeimlingen, mit (grüner Balken) und ohne (roter Balken) Mykorrhiza.

3.2 Standortnachhaltigkeit – Gefährdungen und Massnahmen zur Erhaltung

Sabine Augustin, Bundesamt für Umwelt

Hartig schrieb bereits 1804: «Jede weise Forstdirektion muss die Waldungen ... so zu benutzen suchen, dass die Nachkommenschaft ebenso viel Vorteil daraus ziehen kann, als sich die jetzt lebende Generation zueignet ...». Etwas weiter gefasst, beschreibt Nachhaltigkeit die Nutzung eines regenerierbaren, natürlichen Systems in einer Weise, dass dieses System in seinen wesentlichen Eigenschaften erhalten bleibt.

Was ist Standortnachhaltigkeit?

Nach Artikel 20 des Waldgesetzes (WaG) ist der Wald so zu bewirtschaften, dass er seine Funktionen dauernd und uneingeschränkt erfüllen kann. Im Umweltschutzgesetz (USG) wird in Artikel 1 darauf verwiesen, dass «... die natürlichen Lebensgrundlagen, insbesondere die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens ...» dauerhaft erhalten bleiben sollen.

Viele die Nachhaltigkeit gewährleistenden Eigenschaften werden durch die Funktionsfähigkeit der Böden bestimmt. Nach der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö), Artikel 2, gilt Boden als fruchtbar, «wenn er eine für seinen Standort typische artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft und typische Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist.»

Intakte Ökosysteme

Intakte Ökosysteme sind gekennzeichnet durch ungestörte Strukturen und Funktionsabläufe, eine hohe Anpassungsfähigkeit an wechselnde Umweltbedingungen, Widerstandsfähigkeit gegenüber biotischem und abiotischem Stress sowie eine gleich bleibende Identität (etwa: Artenzusammensetzung). Dies gilt, sofern die äusseren Bedingungen langfristig konstant bleiben. In einem solchen Zustand sind Ökosysteme gekennzeichnet durch:

- Stoffkreisläufe, die sich in einem standortgerechten Fließgleichgewicht befinden
- Nahrungsketten, welche, den standörtlichen Verhältnissen entsprechend, vollständig sind
- die räumlich und zeitlich bedarfsgerechte Bereitstellung von Nährstoffen für die Pflanzen

Störungen der Stoffkreisläufe durch einseitige Zufuhr oder Entnahme von Nährstoffen haben Auswirkungen auf die Vorräte und/oder die Verfügbarkeit von Nährstoffen für die Bestände. Sie wirken sich meist negativ auf die Funktionsfähigkeit der Böden aus.

Gefährdungen der Nachhaltigkeit

Potenzielle Gefährdungen für eine nachhaltige Waldnutzung ergeben sich infolge unterschiedlicher Gründe:

Historische Belastungen durch Streunutzung

Nachhaltige Nutzung von Wald heisst, dass mit der Ernte nicht mehr Nährstoffe exportiert werden, als aus natürlichen Quellen nachgeliefert werden. Die Übernutzung von Wäldern in der Vergangenheit führte zur Verarmung des Bodens und einem verminderten Wachstum. Diese Zusammenhänge wurden schon früh erkannt. So schreibt Fankhauser: «Die nachteilige Wirkung der Streunutzung zeigt sich bald mehr, bald weniger hervortretend, je nachdem der Boden kräftiger oder magerer, feuchter oder trockener ist und die Bäume flacher oder tiefer wurzeln. Der kräftige Lehmboden erträgt die Streunutzung besser als der dürre Sandboden; der Kalkboden leidet mehr als der feuchte Bruchboden. Die Buche, welche grössere Ansprüche an die Bodenkraft macht, wird im Wuchse mehr zurückgebracht, als die selbst im Steingeröll wuchernde Weisserle ... Je jünger die Bestände sind, in denen man die Streue sammelt, desto mehr leiden sie darunter; je älter, desto eher können sie es ertragen; je vollständiger die Streue und je mehr damit auch noch gute Walderde weggenommen wird, desto mehr empfindet sie der Wald.»

Messungen der Nährstoffentzüge durch eine Streunutzung belegten die negativen Auswirkungen für den Nährstoffhaushalt der Wälder.

Nährstoffentzüge durch eine Streunutzung in kg/ha :

	Kalium	Calcium	Phospor
Buchenlaub	10,6	97,8	11,1
Fichtennadeln	5,3	64,0	8,0
Föhrennadeln	5,1	18,4	4,1
Moos	22,0	19,3	10,3

Intensivierte Biomasseentnahme und Übernutzung

Heute können sich aus der intensivierten Holznutzung für energetische Zwecke durch Vollbaumnutzung (inklusive Blätter und Nadeln) ähnliche Probleme wie bei der historischen Streunutzung ergeben. Bei einer zusätzlichen Nutzung der Baumkronen werden die Nährstoffentzüge im Vergleich zur Stammholznutzung nahezu verdoppelt (+ 44%). Solche Nährstoffentzüge über die natürliche Nachlieferung hinaus führen langfristig zu einer Verarmung der Standorte.

Anthropogene Stickstoffeinträge

In der Schweiz werden in rund 95% der Wälder die kritischen Eintragsraten für Stickstoff überschritten. Der Stand der Kenntnisse zur Wirkungsweise erhöhter Stick-

stoffeinträge in Wälder ist in Abbildung 13 dargestellt. Diese Vorstellungen zur zeitlichen Entwicklung der Wirkungen permanent erhöhter N-Einträge wurden empirisch aus vielen europäischen Untersuchungen gewonnen oder sie beruhen auf allgemeinen Gesetzmässigkeiten (z.B. dem Gesetz vom Minimum von J. von Liebig).

Die unter dem Begriff «Stickstoff-Sättigung» zusammengefassten Phänomene resultieren letztlich aus der kontinuierlichen N-Anreicherung im Ökosystem und der damit verbundenen Änderungen von ökosystemaren Prozessraten. Stickstoff greift direkt oder indirekt in alle Nährstoffkreisläufe und Kompartimente eines Waldökosystems ein. «Indirekt» meint hier, dass je nach Ausgangssituation verschiedene Puffermechanismen wirksam werden, wodurch zwischen Ursache und Wirkung unterschiedlich lange Zeitspannen liegen können. Dies macht die Unterscheidung von Wirkungen natürlicher Einflussfaktoren oft schwierig. Zudem werden die Wirkungen vom Klima modifiziert.

Klimawandel:

Langfristig stellt der Klimawandel eine Gefährdung dar, über dessen Auswirkungen derzeit nur spekuliert werden kann. Seit etwa 1970 stiegen die Temperaturen in der Schweiz um rund 1,7 °C. Insbesondere die (ungeklärte) künftige Niederschlagsverteilung erschwert Prognosen für den Wald. Es ist von grossen regionalen Unterschieden auszugehen.

3. Massnahmen zu Erhaltung

Der gesetzliche Auftrag ist die nachhaltige Gewährleistung von Ökosystem-Dienstleistungen.

Der Bund muss deshalb zunächst für Klarheit sorgen betreffend der zu erwartenden direkten und indirekten Gefährdungen des Waldes durch anthropogene Belastungen (Deposition, Nutzung, Klimawandel), der Voraussetzungen für die Erhaltung der nachhaltigen Nutzung der Wälder und seiner Resilienz sowie der hierfür geeigneten Massnahmen.

Betroffene Sektoren sind neben der Waldpolitik auch die Landwirtschafts- und Verkehrspolitik.

Hinsichtlich der Biomassenutzung im Wald werden Planungsgrundlagen benötigt, die Auskunft über die Nährstoffvorräte und die Belastbarkeit der Wälder geben. Die Bedeutung der Nährstoffentzüge bei verschiedenen Nutzungsverfahren sollte anhand von Modellstudien untersucht werden. Dabei sollten die Einflüsse der Baumarten und des Nutzungsverfahrens untersucht werden. Nur so können die künftige Nutzung (Beschränkungen ja / nein?) und die Kompensation von Nährstoffverlusten (Nährstoffrückführung durch Holzasche ja / nein?) geregelt werden.

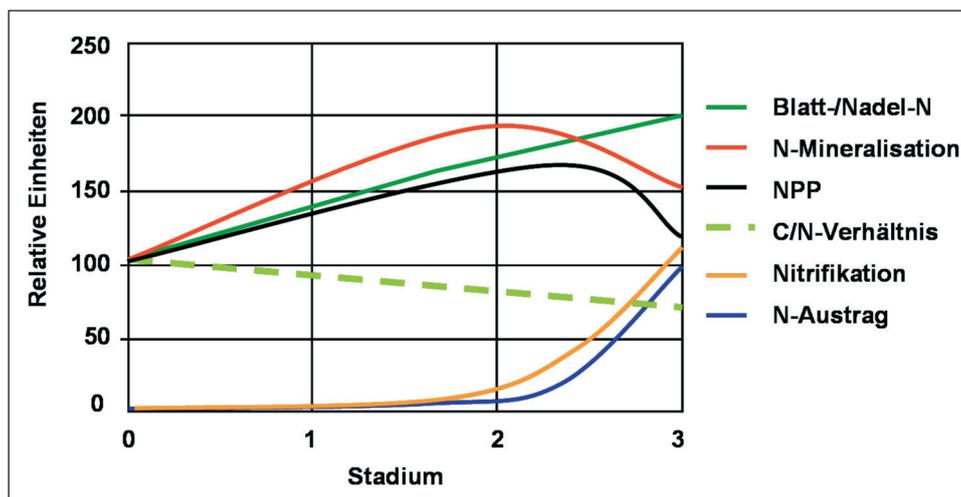


Abb. 13: Vorstellungen zum Verlauf der N-Sättigung in Waldökosystemen, adaptiert nach Aber et al. (1989), Aber et al. (1998) und Emmett (2007). NPP = Nettoprimärproduktion; C/N-Verhältnis = Kohlenstoff zu Stickstoff-Verhältnis.

4 Diskussion der Teilnehmerinnen und Teilnehmer

Die Statements geben die Meinung einzelner Teilnehmer wieder und müssen nicht einem Konsens entsprechen. Um die Lesbarkeit zu erhöhen, wurde die Reihenfolge der Statements zum Teil geändert. Die einzelnen Aussagen wurden teilweise zusammengefasst und nach Themen geordnet.

Fichten mit Problemen

Die Fichten an der betrachteten Stelle draussen im Wald haben noch ein anderes Problem als die besprochenen Nährstoffprobleme. Die Bäume stehen zu dicht. Die Folge davon: Sie wachsen zu stark in die Höhe (dem Licht entgegen) und haben zu wenig Raum für die Krone. Das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser ist zu gross. Dadurch steigt die Anfälligkeit für Windwurf. Bei Lothar zeigte sich, dass nicht die windexponierten Bäume am Waldrand (mit schöner Krone) dem Sturm zum Opfer fielen, sondern die zu dünnen und hohen Bäume im Waldesinnern.

Einfluss des Bodens

Die verschiedenen Waldböden reagieren sehr unterschiedlich auf Stickstoffeintrag. Bei hohem Eintrag wird ein Teil des Stickstoffs mit dem Sickerwasser ausgewaschen. Dies ist aber abhängig von der Art des Bodens (z.B. Kies oder Gley). Auf Gleyböden beispielsweise wachsen gerne stickstoffliebende Pflanzen. Böden von Wäldern, welchen viel organisches Material entnommen wurde, nehmen vermehrt Stickstoff auf.

Nährstoffverluste beim Holzschlag

Was passiert mit den Mineralsalzen bei einem Holzschlag, wenn das Material in den Rückegassen liegen bleibt? Die Nährstoffe bleiben zwar im Wald, die Nährstoffverteilung ist aber sicher nicht ideal.

Problem Vollbaumernte

Es gäbe doch eine einfache Lösung für die Probleme, welche mit der Vollbaumernte entstehen: Das oberste Viertel des Baumes muss im Wald bleiben! Beim Laubholz wird das meist so gehandhabt, weil der Aufwand der Vollbaumernte zu gross ist. Beim Nadelholz hingegen ist die Vollbaumernte einfach.

Rückführung der Mineralsalze nach der Ernte

Auf den meisten Standorten wird bei einer Vollbaumernte eine Rückführung der Mineralsalze mit der Zeit unausweichlich sein. Bei einer Düngung muss aber mit Nebenwirkungen gerechnet werden. Dann haben wir im Wald bald landwirtschaftliche Verhältnisse und nähern uns landwirtschaftlichen Produktionsmethoden an.

Ausbringen von Asche

Das Ausbringen von Asche wäre sicher eine gute Möglichkeit. Wir müssen aber Methoden finden, wie wir die Asche nebenwirkungsfrei in den Wald zurückbringen können. Heute wird die Asche auf Feststoffdeponien gebracht, weil sie zu viel Kupfer und Cadmium enthält. Allerdings stammen diese Schwermetalle aus den Bäumen selbst.

Eine Studie der WSL zeigt, dass Chrom(VI) ein Problem sein kann, weil es sich mit organischem Material zu Chrom(III) verbinden kann. Man weiss aber noch zu wenig darüber. In Deutschland unterliegt die Asche der Düngemittelverordnung und nicht der Abfallverordnung.

Mögliche Forderungen für die Waldbewirtschaftung

Wie kann der Waldbewirtschaftler zur Schonung des Bodens beitragen?
Mögliche Massnahmen:

- Vorsicht bei der Vollbaumnutzung: Standorte definieren, wo keine Vollbaumnutzung zugelassen werden darf und wo Asche ausgebracht werden kann/soll,
- Baumarten mit schnellem Stoffumsatz fördern (z.B. Ahorn), aber: auf sauren Böden kann man nicht beliebig Baumarten einführen
- Durchmischung der Wurzeltiefe und Förderung von vitaleren Bäumen mit mehr Wurzeln
- Weniger hohe Baumzahlen und angepasste Waldstruktur
- Waldweide an bestimmten Orten, jedoch nicht auf sauren Standorten
- Wissen über die Böden fördern

4 Gedanken des Gesprächsleiters Bernhard Nievergelt

Der Boden ist heute komplizierter als früher. Neue Einsichten in die Biologie und Chemie der Waldböden – «outdoor» präsentiert im Wangener Wald und «indoor» bei annähernd Hörsaalverhältnissen – haben die Teilnehmenden gefordert und zu intensivem Mit- und Nachdenken angeregt. Der anständige Umgang mit dem Boden ist in der Tat anspruchsvoller geworden, seit in den letzten Jahren in bemerkenswerter Häufung immer neue Fenster in der Bodenkunde und im Bodenschutz aufgegangen sind. Eigentlich ist dies erfreulich, auch wenn als Motivator für eine vertiefte Forschung ein gesellschaftlicher Schock gewirkt hatte, ein seitens der Natur vor drei Jahrzehnten unübersehbar gesetztes Signal. Kronenverlichtung und sterbende Bäume in vielen Wäldern erschreckten damals Fachleute, Bevölkerung und Politiker. Mahnende Statistiken über die Zunahme von Luftschadstoffen wurden unvermittelt breit wahrgenommen. Und man wurde gewahr, dass in den Bäumen und vor allem in den Böden ungenügend erforschte, komplexe Prozesse im Gang waren. Das Signal der Natur hatte dazu geführt, dass man begriff: Der Lebensraum Boden muss in seiner ganzen Grammatik dringend besser verstanden werden. Als logische Folge wurden europaweit gezielt Forschungsprogramme aufgelegt.

Ein Grundproblem beim Bodenschutz liegt darin, dass viele massgebende Prozesse verborgen im Boden ablaufen und sich nicht in oberirdisch sichtbaren Indikatoren spiegeln. Erschwerend kommt hinzu, dass die kleinräumig ausgeprägte landschaftliche Vielfalt unseres Landes auch für den Lebensraum Boden gilt. Mit den 183 vom Institut für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) eingerichteten Dauerbeobachtungsflächen (mit insgesamt rund 10'000 Buchen und Fichten), auf denen seit 1984 Veränderungen registriert werden, dürfte es gelungen sein, der Vielfalt optimal Rechnung zu tragen.

Mit Bezug auf einzelne breit registrierte Prozesse liegen Ansätze zu einer wirksamen Therapie im Bereich der Landwirtschaft und des Verkehrs. Ich denke dabei zum Beispiel an den hohen Stickstoffeintrag und die damit verbundene Bodenversauerung und den sich verschlechternden Nährstoffstatus. Lokal einsetzbare Massnahmen gegen erkannte schwerwiegende Negativentwicklungen bedingen aber, dass die besondere Situation der Böden bekannt ist. Neben dem Oberboden ist dabei auch der Grobboden beziehungsweise der oft steinige Untergrund als langfristiger Speicher von Stoffen wie Magnesium zu beachten.

Den Behörden möchte man deshalb beliebt machen, Versuche beispielsweise mit dem Austragen von Asche in unbürokratischer Weise lokal zuzulassen, unter der Voraussetzung allerdings, dass solche Versuche mit wissenschaftlichen Methoden kontrolliert und begleitet werden. Der unseren Sinnen weitgehend verschlossene Boden erfordert offenes Denken. Handlungsbedarf ohne Hast ist ausgewiesen. Versuche dieser Art im Nahbereich von Dauerbeobachtungsflächen oder auf angenähert identischen Standortverhältnissen dürften auch helfen, heikle Prozesse besser zu verstehen – beispielsweise in der Frage, ob es bei einem registrierten Mangel an einzelnen Elementen am Vorhandensein oder an deren Verfügbarkeit liegt.

Bei aufwendigen, landesweit auf zahlreichen Stichprobeflächen basierenden Erhebungen lohnt es sich zu fragen, ob sich im Kontakt beziehungsweise im angestrebten Datenvergleich zu andern zielverwandten Projekten die – allenfalls gegenseitige – Interpretationsbasis weiter verbreitern liesse. Ausgehend von den Walddauerbeobachtungen des IAP und den registrierten beunruhigenden Veränderungen könnte es sinnvoll oder mindestens prüfenswert sein, bei einer Reihe dieser Testflächen auch die im Landsforstinventar erfassten Daten aufzunehmen.

6 Liste der Teilnehmerinnen und Teilnehmer

Augustin Sabine	Bundesamt für Umwelt, Postfach, 3003 Bern, sabine.augustin@bafu.admin.ch
Braun Sabine	Institut für angewandte Pflanzenbiologie, Sandgrubenstr. 25/27, 4124 Schönenbuch, sabine.braun@iap.ch
Bürgi Anton	Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, anton.buergi@wsl.ch
Deuchler Niklaus	Wildtier Schweiz, Paradiesstrasse 38, 8802 Kilchberg, klaus.deuchler@sunrise.ch
Flisch René	Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholzstr. 191, 8046 Zürich, rene.flisch@art.admin.ch
Flückiger Walter	Institut für angewandte Pflanzenbiologie, Sandgrubenstr. 25/27, 4124 Schönenbuch, walter.flueckiger@iap.ch
Furrer Roland	Waldwirtschaft Schweiz, Rosenweg 14, 4501 Solothurn, furrer@wvs.ch
Glauser Christa	Schweizer Vogelschutz/Birdlife Schweiz, Postfach, 8036 Zürich, christa.glauser@birdlife.ch
Guggisberg Res	ANL, Abteilung Wald, Forstkreis 2, Zürcherstrasse 9, 8620 Wetzikon, andreas.guggisberg@bd.zh.ch
Hildebrand Ernst E.	Institut für Bodenkunde, Bertoldstr. 17, DE-79098 Freiburg i.Br., ernst.hildebrand@bodenkunde.uni-freiburg.de
Mollet Pierre	Schweizerische Vogelwarte Sempach, Luzernerstrasse 6, 6204 Sempach, pierre.mollet@vogelwarte.ch
Nievergelt Bernhard	Arbeitsgemeinschaft für den Wald, Burenweg 52, 8053 Zürich, b.nievergelt@swissonline.ch
Nievergelt Heidi	Unterdorfstrasse 18C, 8602 Wangen ZH, heidi.nievergelt@bluewin.ch
Nievergelt Paul	Unterdorfstrasse 18C, 8602 Wangen ZH, heidi.nievergelt@bluewin.ch
Niggli Rolf	Verband Schweizerischer Vereine für Pilzkunde, Hauptstrasse 69, 4566 Kriegstetten, rolf.niggli@vsvp.com
Stocker Richard	ProSilvaSchweiz, Zopf 110b, 5708 Birrwil, richard.stocker@waldwesen.ch
Stössel Albert	Jagd Schweiz, Naasstrasse 37, 6315 Morgarten, a.stoessel@bluewin.ch
Stutz Hans-Peter	Amt für Landschaft und Natur, Weinbergstrasse 15, 8090 Zürich, hans-peter.stutz@bd.zh.ch
Vollenweider Fritz	Präsident Holzkorporation Brütisellen, Hegnaustrasse 54, 8602 Wangen, frischest@gmx.ch
Weisskopf Peter	Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Reckenholzstr. 191, 8046 Zürich, peter.weisskopf@art.admin.ch
Wildhaber Werner	Xylurg, Wiesenstrasse 18, 8307 Effretikon, werner.wildhaber@swissonline.ch
Wolf Brigitte	Arbeitsgemeinschaft für den Wald, Ebnetstrasse 21, 3982 Bitsch, b.wolf@bluewin.ch
Zimmermann Erica	Bundesamt für Umwelt, Abteilung Wald, Postfach, 3003 Bern, erica.zimmermann@bafu.admin.ch



Abb. 14: Walter Flückiger berichtet über das Interkantonale Walddauerbeobachtungsprogramm.

7 Weblinks

- IAP (2009): Wie geht es unserem Wald? 25 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU. Ergebnisse von 1984 bis 2008. www.waldbeobachtung.ch/meta/download.htm
- Zusammenfassung des Berichts und Kurzbroschüre: www.waldbeobachtung.ch/meta/download.htm
- Walddauerbeobachtungsprogramm: www.waldbeobachtung.ch
- Institut für angewandte Pflanzenbiologie: www.iap.ch
- Publikationsliste von Ernst Hildebrand: www.bodenkunde.uni-freiburg.de/mitarbeiter/ernhil
- Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART: www.agroscope.admin.ch/org/00275/index.html?lang=de
- Waldboden auf der BAFU-Website: www.bafu.admin.ch/wald/01198/01207/index.html?lang=de
- Bodenschutz auf der BAFU-Website (Leitbild Bodenschutz 2007): www.bafu.admin.ch/bodenschutz/index
- Buwal (2005): Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht Schriftenreihe Umwelt Nr. 384 SRU-384-D, BAFU 2005: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00557/index.html?lang=de>
- BAFU-Workshop vom 24. März 2010 zum Thema «Holzasche und Wald»: www.bafu.admin.ch/aktionsplan-holz/10302/10303/index.html?lang=de
- WSL-Merkblatt für die Praxis Nr. 45 «Physikalischer Bodenschutz im Wald» (2009): www.wsl.ch/dienstleistungen/publikationen/pdf/9701.pdf