

# Wie geht es unserem Wald?

## 34 Jahre Walddauerbeobachtung

Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH und der Zentralschweizer Kantone mit Beteiligung des BAFU | Bericht 2013-2017



UMWELTFACHSTELLEN



INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PFLANZENBIOLOGIE SCHÖNENBUCH

## Impressum

Eine Information der kantonalen Forstämter Aargau, Bern, Basellandschaft, Basel-Stadt, Graubünden, Solothurn, Thurgau, Zug und Zürich und der Umweltfachstellen der Zentralschweiz mit Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

### Auftraggeber

Kanton AG: Marcel Murri, Alain Morier | Kanton BE: Adrian Meier, Walter Beer, Roger Schmidt | Kantone BS/BL: Ueli Meier | Kanton GR: Dr. Ueli Bühler, Marco Vanoni, Reto Hefti | Kanton SO: Jürg Froelicher | Kanton TG: Gerold Schwager, Daniel Böhi | Kanton ZG: Dr. Martin Winkler | Kanton ZH: Erich Good, Dr. Konrad Nötzli | Umweltfachstellen der Zentralschweiz: Dr. Gérald Richner, David Widmer | BAFU Abteilung Wald: Dr. Sabine Augustin | BAFU Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien: Dr. Reto Meier

### Auftragnehmer

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie

### Autoren

Sabine Braun, Sven Hopf, Lucienne de Witte, unter Mitwirkung von: Delphine Antoni, Dieter Bader, Sabine Bulliard, Walter und Heidi Flückiger, Moïse Groelly, Caroline Stritt, Roland Woëffray

### Disclaimer

Diese Studie wurde im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, der Zentralschweizer Kantone und des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

#### Herausgeber

Institut für  
Angewandte Pflanzenbiologie (IAP)  
Sandgrubenstrasse 25  
CH-4124 Schönenbuch  
Telefon +41 61 485 50 70  
www.iap.ch

#### Französischer Titel

Notre forêt, comment se porte-t-elle?

#### Italienischer Titel

Com'è lo stato di salute dei nostri boschi?

#### Englischer Titel

How is our forest?

#### Design | Herstellung

krause-graphics.com | Lörrach

© IAP Schönenbuch | Januar 2018

# Wie geht es unserem Wald?

## 34 Jahre Walddauerbeobachtung

Interkantoniales Walddauerbeobachtungsprogramm im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH und der Zentralschweizer Kantone mit Beteiligung des BAFU | Bericht 2013-2017

Programme d'observation permanente intercantonal des forêts des cantons d'AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, des offices de l'environnement de la Suisse centrale et de l'OFEV

Résultats de 2013 à 2017 | Rapport 5

Programma intercantonale di monitoraggio permanente dei boschi nei Cantoni di AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH e degli uffici per l'ambiente della Svizzera Centrale con la partecipazione dell'UFAM.

Risultati dal 2013 al 2017 | Rapporto 5

Intercantonal Permanent Forest Observation Program of the Cantons AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH, of the environmental offices of Central Switzerland and of the Federal Office for the Environment (FOEN)

Results from 2013 to 2017 | Report 5



Schönenbuch, Januar 2018

INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PFLANZENBIOLOGIE SCHÖNENBUCH

## Inhaltsverzeichnis

Wichtigste Erkenntnisse aus 34 Jahren Walddauerbeobachtung	6	<b>7 Stickstoffauswaschung und Bodenversauerung</b>	<b>58</b>
Klimawandel	8	7.1 Stickstoffauswaschung	60
Stickstoffbelastung	10	7.1.1 Vergleich mit Grenzwerten	60
Bodenversauerung	12	7.1.2 Entwicklung	61
Nährstoffnachhaltigkeit	13	7.1.3 Mittlere N-Auswaschung in Beziehung zu Standortfaktoren	61
Ozon	14	7.2 Bodenversauerung	63
<b>1 Einleitung</b>	<b>16</b>	7.2.1 Entwicklung in den Beobachtungsflächen mit Bodenlösungsmessungen	63
<b>2 Bonitierung des Kronenzustands</b>	<b>17</b>	7.2.2 Entwicklung in den Stickstoffversuchsflächen	66
2.1 Kronenverlichtung	17	7.3 Auswaschung von Phosphor + organischem Stickstoff	67
2.2 Baummortalität	19	7.4 Abschliessende Bemerkungen zu Bodenlösungsmessung	68
2.2.1 Mortalität von Buchen	19	7.5 Beziehung zwischen Vegetation und Basensättigung	69
2.2.2 Mortalität von Fichten	20	7.5.1 Beziehung zwischen Basensättigung + Zeigerarten	69
2.2.3 Mortalität von Eichen	22	7.5.2 Beziehung zwischen Basensättigung + Vegetationseinheit	70
2.2.4 Sturmschäden und Waldbrand	23	7.6 Regenwürmer und ihre Beziehung zur Bodenchemie und den Feuchteverhältnissen	71
2.2.5 Wirkung von Trockenheit und Ernährung auf die Mortalität	24	<b>8 Mykorrhizierung von Buchen in einem Stickstoffgradienten</b>	<b>74</b>
2.3 Monitoring Eschentriebsterben	25	8.1 Einleitung	74
2.4 Phytopathologische Untersuchungen an Ahorn	27	8.2 Vorgehen	74
<b>3 Nährstoffversorgung</b>	<b>28</b>	8.3 Ergebnisse	76
3.1 Entwicklung	28	8.4 Diskussion	79
3.2 Nährstoffkonzentrationen und Stickstoffdeposition	30	<b>9 Nährstoffbilanzen</b>	<b>81</b>
3.3 Nährstoffkonzentrationen und Bodenlösung	32	9.1 Nährstoffkonzentrationen in Rinde und Holz	81
3.4 Nährstoffkonzentrationen und Ozonbelastung	32	9.2 Nährstoffentzug bei Ernte verschiedener Baumfraktionen	83
3.5 Ernährungsversuche Alvanu, Davos, Klosters	33	9.3 Phosphor-Eintrag und Phosphor-Austrag	83
<b>4 Triebwachstum und Fruchtbehang</b>	<b>34</b>	9.4 Berechnung der Durchwurzelungstiefe	84
4.1 Triebwachstum	34	9.5 Berechnung von Nährstoffbilanzen	86
4.2 Fruchtbehang bei Buchen	35	9.6 Verallgemeinerung der Nährstoffbilanzrechnungen	88
4.3 Verfärbungen	37	9.6.1 Modellierung Oberhöhenbonität	88
4.3.1 Interkostalchlorosen	37	9.6.2 Modellierung der Nährstoffbilanzen	90
4.3.2 Photobleaching	38	9.7 Empfehlungen für gefährdete Standorte	92
<b>5 Stammzuwachs</b>	<b>40</b>	9.7.1 Förderung des Jungwuchses	93
5.1 Entwicklung und Artenvergleich	40	9.7.2 Ernteverfahren	93
5.2 Welche Faktoren erklären den Stammzuwachs?	41	9.7.3 Baumartenwahl und biologische Aktivität des Bodens	93
5.2.1 Stammzuwachs der Buchen von 1984-2014	42	9.7.4 Humusbewirtschaftung	95
5.2.2 Stammzuwachs der Fichten von 1992 bis 2014	46	9.8 Nährstoffrecycling mit der Laubstreu	95
5.2.3 Diskussion des Stammzuwachses 1984-2014	49	<b>10 Trockenheit</b>	<b>96</b>
5.3 Dendrochronologische Untersuchungen	50	10.1 Wasserfluss im Stamm	98
<b>6 Auswirkung erhöhter Stickstoffeinträge</b>	<b>52</b>	10.2 Tiefe der Wasseraufnahme	99
6.1 Stickstoffeinträge in der Schweiz	52		
6.2 Stickstoffeinträge in Walddauerbeobachtungsflächen	54		
6.2.1 Freilandniederschlag und Kronentraufe	54		
6.2.2 Eintrag von Ammoniakstickstoff	55		
6.2.3 Vergleich Kronentraufe – Einzelkomponenten	55		
6.3 Auswirkungen auf den Wald	56		
6.3.1 Nadeljahrgänge bei Fichten	57		

10.3	Trockenheitsindikatoren	100
10.3.1	Verwendete Trockenheitsindikatoren	101
10.3.2	Vergleich der Indikatoren	104
10.3.3	Gleichungen für die Bewertung des Trockenstresses in Klimaszenarien	106
10.3.4	Projektion in die Zukunft	107
10.4	Kohlenstoff- und Sauerstoffisotope in Jahrringen	108
10.4.1	Probenumfang und Berechnungen	108
10.4.2	Ergebnisse der Isotopenanalysen	110
10.5	Sauerstoffisotope in Xylemwasser	112
<b>11</b>	<b>Ozon</b>	<b>113</b>
11.1	Entwicklung und Wirkung auf Pflanzen	113
11.2	Ozonschäden an den Gipfeltrieben	114
11.3	Länge der Vegetationsperiode zur Evaluation der Ozonbelastung	115
<b>12</b>	<b>Bodenverdichtung</b>	<b>116</b>
12.1	Regenwürmer	116
12.2	Regeneration der Wasserleitfähigkeit	117
<b>13</b>	<b>Literatur</b>	<b>118</b>
<b>14</b>	<b>Anhang</b>	<b>128</b>
14.1	Statistische Auswertung und Tabellen	128
14.1.2	Polynomially distributed lag model zur Berechnung der Tiefe der Nährstoffaufnahme	136
14.1.3	Polynomially distributed lag model für die Beziehung mit Klimaparametern im Jahresverlauf	136
14.2	Glossar	138

## Wichtigste Erkenntnisse aus 34 Jahren Walddauerbeobachtung

### Kernaussagen:

- Die Phosphorversorgung ist bei Buchen und Fichten um 25 bzw. um 15% gesunken und liegt heute im akuten Mangelbereich.
- Das Stammwachstum von Buchen hat seit 1987 um 31% abgenommen, während bei den Fichten keine klare Entwicklung sichtbar ist.
- Stickstoffeinträge über 25 Kilogramm pro Hektar und Jahr hemmen das Wachstum von Buchen und Fichten.
- Hohe Stickstoffeinträge verstärken die Wirkung von Trockenheit auf das Stammwachstum von Buchen und auf die Mortalität von Fichten.
- Interaktionen zwischen Stickstoff und Trockenheit sowie warmen Wintern spielen eine wichtige Rolle bei der Erklärung der Wachstumsabnahme bei den Buchen.
- Hohe Stickstoffeinträge vermindern die Mykorrhizierung von Buchenwurzeln und die Artenvielfalt, während die Basensättigung die Artenzusammensetzung der Mykorrhizapilze beeinflusst.
- Der Fruchtbehang bei den Buchen hat seit 2000 stark zugenommen.
- Die Bodenversauerung ist in den letzten 34 Jahren fortgeschritten.
- Das Risiko für Windwurf ist auf basenarmen Böden deutlich erhöht.
- Obwohl das Eschentriebsterben sich seit 2008 in der Schweiz ausgebreitet hat, gibt es noch befallsfreie Eschen.
- Im Gegensatz zu Buchen und Fichten reagiert die Kronenverlichtung der Eichen nicht auf Trockenheit.
- Eine Vollbaumernte ist aus Sicht der Nährstoffbilanzen nicht nachhaltig, vor allem nicht unter den aktuellen Stickstoffeinträgen.



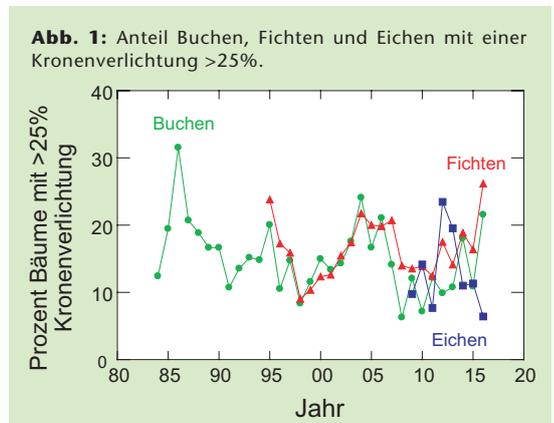
**Foto 1:** Trockenschäden in der Gegend von La Sarraz (VD), aufgenommen 29.07.2015.

Die **Walddauerbeobachtung** ist ein wertvolles Instrument zur Erkennung und zur Dokumentation schleichender Veränderungen in den Wäldern. Während in den 1980er Jahren, zu Beginn des Walddauerbeobachtungsprogramms, der Fokus auf den Auswir-

kungen des sauren Regens und auf den Ozonwirkungen lag, erlangten später auch die Auswirkungen erhöhter Stickstoffeinträge auf Wälder Aufmerksamkeit. Die neuesten Entwicklungen im Schweizer Wald weisen darauf hin, dass der Klimawandel ein wichtiger Faktor geworden ist für die Waldgesundheit. Die von uns beobachteten Entwicklungen sind daher das Ergebnis vielfältiger anthropogener Belastungsfaktoren. Die Ergebnisse und unser Fazit aus 34 Jahren Walddauerbeobachtung werden in den folgenden Abschnitten, vorgestellt, mit Verweisen auf den ausführlichen Teil des Berichtes.

Die Beobachtungen in den Schweizer Wäldern während der letzten vier Jahre haben das Augenmerk auf die fortschreitende Klimaveränderung

gelenkt. Dazu gehört die lang anhaltende **Trockenheit** im Sommer 2015, in dem sich die Baumkronen in mehreren Landesteilen braun verfärbten, so zum Beispiel in Flaumeichenwäldern im Wallis und in La Sarraz VD (Foto 1). Trockenheit spielt, zusammen mit Spätfrost, warmen Wintern, starkem Fruchtbehang und Ozonbelastung, auch eine wichtige Rolle bei der Kro-



nenverlichtung von Buchen und Fichten, während bei den Eichen kein Trockenheitseffekt sichtbar ist (Kap. 10). Das wird auch im Verlauf der Kronenverlichtung deutlich, der bei Buchen und Fichten ziemlich synchron, bei



**Foto 2:** Buche mit extrem starkem Fruchtbehang.

den Eichen eher gegenläufig zu den beiden anderen Arten ist (Abb. 1, Kap. 2.1.). Eine starke Vergilbung, die bei der letzten Gipfeltriebernte im August 2015 festgestellt wurde, hängt wahrscheinlich ebenfalls mit der Hitze und der Trockenheit zusammen.

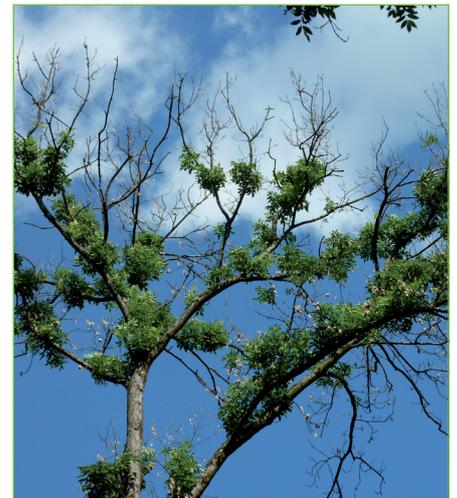
Bei den Buchen ist seit einigen Jahren die Frequenz von **Mastjahren** erhöht, und es wird eine grössere Menge an Früchten gebildet (Kap. 4.2). In der forstlichen Literatur wird von einem Mastjahr gesprochen, wenn mehr als 150 Früchte pro m<sup>2</sup> Bodenfläche gezählt werden. Das extremste Mastjahr wurde bisher 2011 beobachtet, mit im Mittel etwa 430 Früchten pro m<sup>2</sup>. Im Jahr 2014 waren es ca. 360 Früchte pro m<sup>2</sup>. Im Jahr 2016 gab es wiederum

ein starkes Mastjahr, wobei die Buchen bei der Bonitierung oft eher braun als grün aussahen und die Blätter auffallend klein waren (Foto 2). Ob es sich dabei um einen neuen Rekord handelt, kann aber erst bei der nächsten Gipfeltriebernte im Jahr 2019 beurteilt werden, da die Früchte dann rückwirkend gezählt werden. Diese Entwicklung hat einen negativen Einfluss auf das Wachstum der Bäume, da die erhöhte Fruchtbildung viele für den Baum wichtige Ressourcen verbraucht.



**Foto 3:** Borkenkäferbefall in der Fläche Scheidwald (BE).

Wenn Fichten absterben, ist meistens ein Befall mit dem **Borkenkäfer** involviert (Foto 3). Dieser greift bevorzugt geschwächte Bäume an, wie z.B. während längerer Trockenperioden. In den Hitzesommern 2015 und 2016 hatte er ausgezeichnete Bedingungen, und der Befall erreichte 2017 das zweithöchste Ausmass seit Beginn der Beobachtungen. Allerdings zeigen die Datenanalysen auch, dass die Trocken-



**Foto 4:** Geschädigte Esche.

heitswirkung auf den Borkenkäferbefall durch hohe Stickstoffbelastung oder Nährstoffmangel (Kalium, Magnesium) massiv verstärkt wird (Kap. 2.2.2.). Das heisst, dass die Kombination von Klimastress und Umweltbelastung die Fichten zusätzlich schwächt. Bei den Buchen erhöhen Trockenheit oder Phosphormangel die Mortalität (Kap. 2.2.1).

Das **Eschentriebsterben** ist eine aus Asien eingeschleppte Krankheit, die erstmals in den 1990er Jahren in Polen nachgewiesen wurde und sich von dort rasch über ganz Europa ausbreitete (1). 2008 wurden die Welkesymptome erstmals auch in der Nordwestschweiz registriert (2, Foto 4), von wo aus sich die Krankheit innert sieben Jahren über das gesamte Land ausbreitete. Das IAP startete 2013 ein Monitoringprojekt, um mehr über den Krankheitsverlauf herauszufinden und resistente Bäume zu finden. Von den 204 ausgewählten gesunden Eschen wurden 2017 noch 22% als optisch symptomfrei eingestuft (Kap. 2.3).

Seit den neunziger Jahren haben die **Sturmschäden** im Mittel, abgesehen von den Extremjahren 1990 und 1999, zugenommen (Foto 5, Kap. 2.2.4). Zudem haben frühere Datenanalysen gezeigt, dass auf stark versauerten Böden vermehrt Bäume mitsamt dem Wurzelteller umgeworfen werden. Bei hohen Stickstoffeinträgen und bei starker Bodenversauerung ist das Wurzelwerk

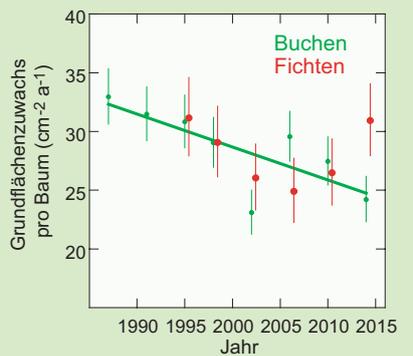
**Foto 5:** Sturmschäden in Giswil (OW).



geschwächt und die Bäume fallen darum dem Sturm schneller zum Opfer, wie zum Beispiel 2017 in Giswil OW (Foto 5, Kap. 2.2.4).

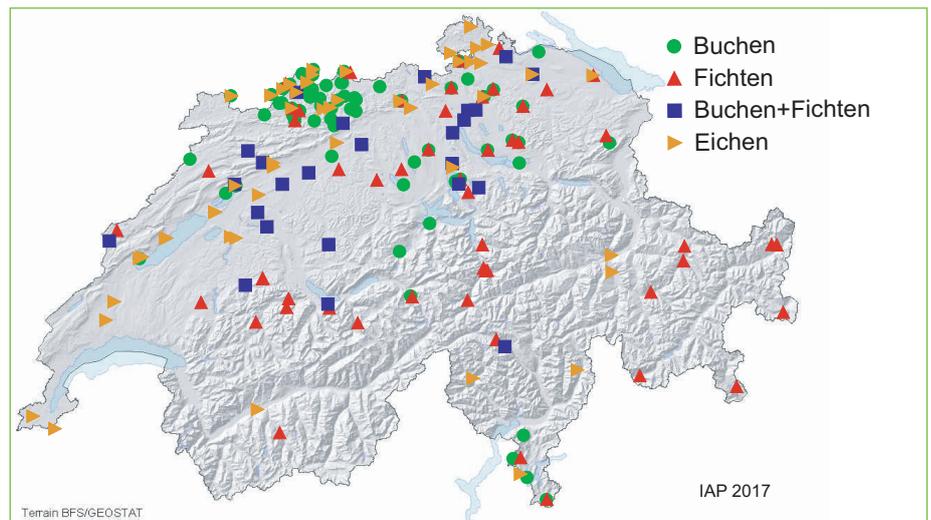
Das **Stammwachstum** hat bei den Buchen seit 1987 deutlich abgenommen (Abb. 2, Kap. 5.1.). Bei den Fichten wurde eine Abnahme bis 2006 beobachtet, seither steigt das Wachstum wieder an. Im Mittel aller Flächen, auf denen Eiche und Buche gemeinsam vorkommen, hat die Eiche einen etwas geringeren Zuwachs als die Buche.

**Abb. 2:** Entwicklung des Grundflächenzuwachses pro Baum für Buchen und Fichten.



Während die Zunahme der Sturmschäden, des Fruchtbehangs bei der Buche oder der Kronenverfärbungen als Folge von extrem langen Trocken- oder Hitzeperioden Phänomene betreffen, die gut sichtbar sind, können Veränderungen des Gesundheitszustands der Bäume (Kap. 2.1), der Nährstoffversorgung (Kap. 3), des Stammzuwachses (Kap. 5.1) und der Bodenversauerung (Kap. 7.2) nur mittels standardisierter und wiederholter Messungen festgestellt werden. Die

**Abb. 3:** Beobachtungsflächen des IAP.



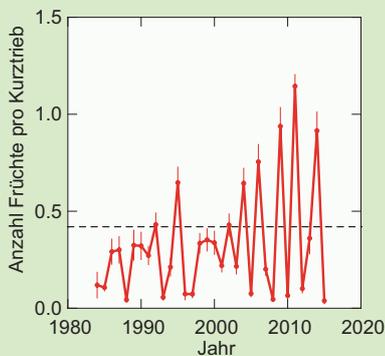
langjährige Walddauerbeobachtung an einem umfangreichen Baumkollektiv (Abb. 3) ist deshalb ein ausgezeichnetes Instrument, um forstwirtschaftlich wichtige Entwicklungen im Wald, zeitliche und räumliche Veränderungen im Waldökosystem aufzuzeigen und den Beitrag verschiedener Faktoren zu den beobachteten Veränderungen zu entflechten.

## Klimawandel

Der Einfluss des Menschen auf das Klima wurde durch den Weltklimarat („Intergovernmental Panel on Climate Change“, 3) gut dokumentiert. In der Schweiz haben die Temperaturen seit 1864 bereits um 1.8°C zugenommen (4). Bei den Niederschlagsmengen ist zwar kein Trend zu beobachten, aber hohe Temperaturen erhöhen die Verdunstung und damit den Trockenstress. Jahre mit langandauernden Trocken- und extremen Hitzeperioden waren in den letzten beiden Jahrzehnten deutlich häufiger. Unsere Walddauerbeobachtungsflächen erstrecken sich über

einen weiten Gradienten von Temperatur und Trockenheit und sind daher für die Analyse von Klimaeffekten auf natürliche Wälder optimal geeignet. Gemäss unseren Auswertungen hat eine erhöhte Temperatur allein geringe Auswirkungen auf die Waldbäume,

**Abb. 4:** Verlauf des Fruchtbehangs bei der Buche. Gestrichelte Linie: Mastgrenze (150 Früchte/m<sup>2</sup>). Balken=95%-Vertrauensbereich.



abgesehen davon, dass warme Winter (erhöhte mittlere Temperaturen von Dezember bis März) den Stammzuwachs von Fichten hemmen, wobei hohe Stickstoffeinträge diesen Effekt verstärken. Bei den Buchen wirken sich warme Winter nur dann hemmend auf das Wachstum aus, wenn die Stickstoffbelastung hoch ist oder die Bäume schlecht mit Magnesium versorgt sind (Kap. 5.2). Erhöhte Temperatur (5) und eine erhöhte Verdunstungskraft der Luft (Dampfdrucksättigungsdefizit) spielen auch beim Fruchtbehang der Buchen eine entscheidende Rolle (Kap. 4.2). Wie oben bereits erwähnt, hat der Fruchtbehang im Laufe der Beobachtungszeit stark zugenommen. Da ein hoher Fruchtbehang wiederum deutlich negativ mit dem Stammzuwachs und positiv mit der Kronenver-

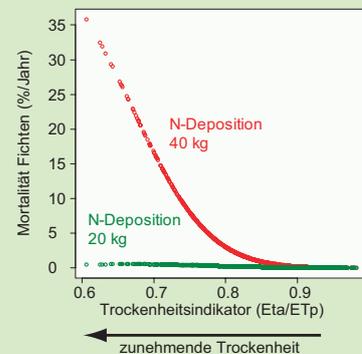
lichtung korreliert ist, kann die Buche nicht von erhöhten Temperaturen profitieren, sondern wird in ihrer Vitalität gar vermindert.

Für die Forstpraxis relevant ist die Wirkung von Trockenheit auf das Stammwachstum. Die zugrundeliegenden Prozesse sind weniger gut bekannt (6). Die Auswertungen aus der Walddauerbeobachtung zeigen, dass die Trockenheitswirkung auf das Stammwachstum am besten durch die Standortwasserbilanz erklärt wird. Das ist die über eine Vegetationsperiode aufsummierte Differenz zwischen der Summe von Niederschlag und Bodenwasserspeichervermögen sowie der potentiellen Verdunstung (=Evapotranspiration). Bei Buchen ist die Trockenheitsempfindlichkeit des Stammwachstums unter hohen Stickstoffeinträgen und bei unausgeglichener Kalium-Versorgung deutlich erhöht. Diese Interaktionen des Stickstoffeintrags mit Trockenheit und Wintertemperatur spielen wahrscheinlich eine wichtige Rolle bei der Erklärung des beobachteten Wachstumsrückgangs bei den Buchen.

Akuter Trockenstress führt zu einem Unterdruck in den Wasserleitgefässen. Bei dieser hohen Wasserspannung bilden sich Luftblasen in den Leitgefässen und das Wasserleitsystem der Pflanzen wird beeinträchtigt (Embolie oder Kavitation). Für die Trockenheitstoleranz verschiedener Baumarten ist entscheidend, ob dieser Prozess schon bei den im langjährigen Mittel natürlich auftretenden Wasserspannungen von Bedeutung ist oder ob es einen «Sicherheitsabstand» zu den ex-

tremen Werten gibt (7, 8). Ein Baum stirbt, wenn ein bestimmter Anteil der Leitgefässe ihre Funktion eingebüsst hat (9). Durch Schliessen der Spaltöffnungen können die Waldbäume bis zu einem gewissen Grad dem Trockenstress entgegenwirken. Unsere Analysen von Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopen in Stammscheiben lassen die Schlussfolgerung zu, dass dieser Prozess bei Buchen effizienter abläuft als bei den Fichten (Kap. 10.4.). Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung von Wasserstress ist die Aufnahme von Wasser aus tieferen Bodenschichten. Auch dieser Prozess kann mit der Analyse von Sauerstoff- und Wasserisotopen in Regenwasser, Boden, Zweigen und Blättern untersucht werden (Kap. 10.5). Die in Zusammenarbeit mit dem Paul-Scherrer-Institut (PSI) erarbeiteten Ergebnisse zeigen, dass Fichten das Wasser aus einer geringeren Bodentiefe aufnehmen als Buchen und Eichen. Die Bedeutung tieferer Bodenschichten wurde auch bei Wasserflussmessungen an Eichen in Möhlin AG deutlich. Während der Trockenperiode im Sommer 2015 nahm die Wasserspannung im

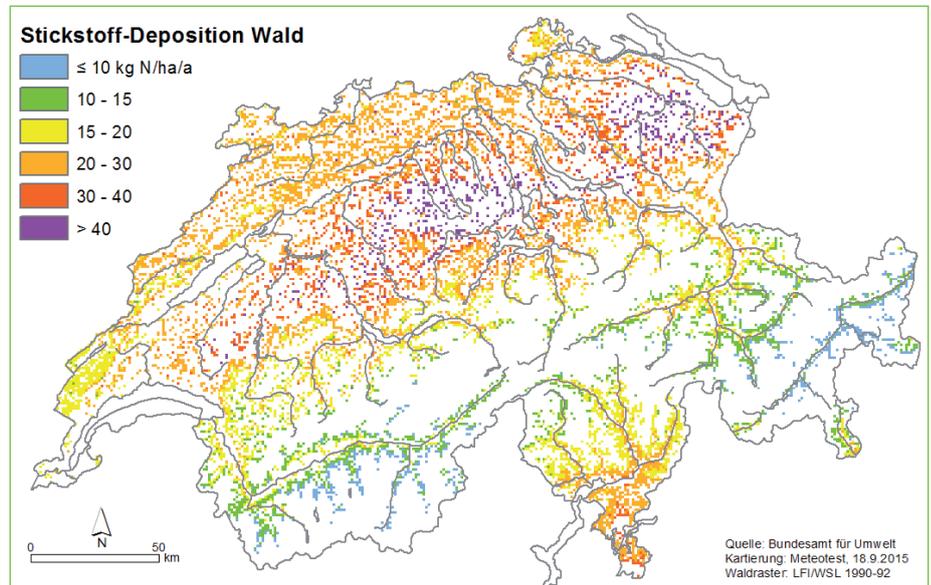
**Abb. 5:** Interaktion zwischen Trockenheit und der Stickstoffdeposition auf die Mortalität von Fichten. Vorhersagen aufgrund eines multivariaten Regressionsmodells unter Mittelung aller anderen Parameter.



Stamm deutlich zu. Trotzdem, und obwohl die Bodenwassersonden bis in 60 cm Tiefe kein pflanzenverfügbares Bodenwasser mehr anzeigten, fand immer noch Wasserfluss in reduziertem Umfang statt. Fehlen tiefere Bodenschichten, so entwickeln selbst Flaumeichen Trockenschäden, wie das Beispiel von La Sarraz VD zeigt (Foto 1).

Bei ausgewachsenen Waldbäumen in unseren Breitengraden spielt das direkte hydraulische Versagen der Leitgefässe aber wahrscheinlich keine so wichtige Rolle für die Mortalität wie der Befall mit Schwächeparasiten wie Borkenkäfer, Hallimasch oder Buchenrindennekrose. Vor dem Absterben zeigen Buchen und Eichen über mehrere Jahre eine verminderte Vitalität, was auf einen Parasitenbefall hinweist. Bei allen drei Baumarten ist die Trockenheit für die Mortalität über mehrere Jahre von Bedeutung (Kap. 2.2). Der beste Trockenheitsindikator für die Mortalität unserer Baumarten ist das Verhältnis zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration (Kap.10.3). Dieses Verhältnis kann mit hydrologischen Modellen berechnet werden und besagt, wie stark die Verdunstung bei Trockenheit eingeschränkt wird. Die Wirkung von Trockenheit auf die Sterberate von Fichten wird zudem durch Stickstoffeinträge und Nährstoffungleichgewichte verstärkt (Abb. 5, Kap. 2.2).

Als Folge des Klimawandels hat sich der Blattaustrieb der Buchen hin zu früheren Zeitpunkten verschoben (Kap. 11.2). Die Blattverfärbung tritt ebenfalls leicht früher ein, was vermutlich auf Trockenheitseinflüsse zurückgeführt werden kann. Insgesamt verlängerte sich zwischen 1980 und 2015 die



**Abb. 6:** Karte der modellierten Stickstoffeinträge in den Wald für das Jahr 2010 (BAFU/Meteotest).

Vegetationsperiode um etwa 10 Tage.

### Stickstoffbelastung

Landwirtschaft (Foto 6), Verkehr und Industrie emittieren eine grosse Menge von reaktiven Stickstoffverbindungen, die mit dem Regen (Nassdeposition), als Aerosol oder gasförmig (Trockendeposition) über die Luft in Ökosysteme gelangen. Wegen ihrer grossen Oberflächenrauigkeit sind Wälder eine besonders effiziente Senke für diese Verbindungen. Die Einträge können in der Schweiz mehr als 50 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr ( $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ ) erreichen (Abb. 6). Waldökosysteme sind gegenüber Einträgen von Stickstoff empfindlich. Dass erhöhte Stickstoffeinträge zu Problemen in Waldökosystemen führen können, wurde schon in den 1980er Jahren erkannt (10, 11). Unter dem UNECE-Übereinkommen für weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (LRTAP-Konvention) wurden Grenzwerte für Stickstoffeinträge (Critical Loads) in verschiedene Ökosyste-

me erarbeitet (12). Diese betragen für Laubwald in gemässigten Zonen 10-20  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , für Nadelwald 5-15  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Diese Critical Loads werden auf über 95% des Schweizer Waldes überschritten (13).

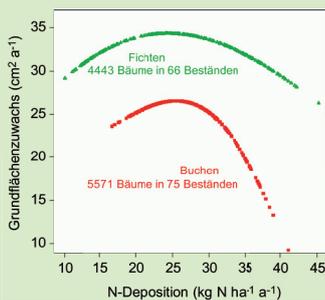


**Foto 6:** Gülleausbringung mit dem Druckfass erhöht die Stickstoffbelastung.

Infolge Luftreinemassnahmen hat der Eintrag von Stickstoff in den letzten Jahren leicht abgenommen. In der Kronentraufe (das ist der Niederschlag, der durch die Baumkrone den Boden erreicht) ist dies jedoch nicht überall

messbar. So blieben die Stickstofffrachten in der Fichtenkronentraufe in Muri AG stabil, während sie in Brislach BL bis heute zugenommen haben. In Sagno TI sind die Stickstofffrachten zwischen 2003 und 2006 gesunken, zwischen 2006 und 2015 stiegen sie wieder leicht an. Trotz der Abnahme bleibt die Stickstoffbelastung deutlich zu hoch.

**Abb. 7:** Beziehung zwischen dem Stammzuwachs von Buchen und Fichten und der Stickstoffdeposition. Für diese Grafik wurden alle anderen Variablen ausser der Stickstoffdeposition gemittelt (14).



Stickstoff ist ein essentieller Pflanzennährstoff, der das Wachstum oft steigert. Seit den 1980er Jahren wird über ein erhöhtes Waldwachstum berichtet (14), das dem Stickstoff zugeschrieben wurde. Eine Wachstumssteigerung ist allerdings nur möglich, solange auch

**Foto 7:** Stammzuwachsmessung.

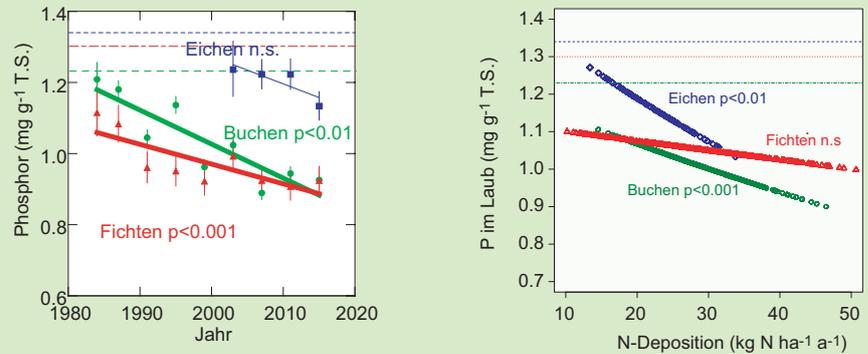


die anderen für Bäume lebenswichtigen Nährstoffe wie Phosphor, Kalium und Magnesium genügend vorhanden sind. Darum ist diese Wachstumsstimulation begrenzt und abhängig von den Nährstoffvorräten im Waldboden und der Fähigkeit zur Nährstoffaufnahme. Dies kommt in unseren Daten der Walddauerbeobachtung zum Ausdruck: Bei Eintragungswerten von weniger als 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹ wird eine leichte Steigerung des Wachstums gefunden (Foto 7, Abb. 7, Kap. 5.1). Bei höheren Eintragungswerten zeigen Fichten eine leichte und Buchen eine massive Wachstumsabnahme (Kap. 5.2). Bei dieser Wachstumsabnahme spielen Veränderungen der Nährstoffkonzentrationen in den Bäumen und Interaktionen zwischen dem Stickstoffeintrag

grossen Teil verantwortlich für die in den letzten 34 Jahren von uns beobachteten Wachstumsabnahme bei den Buchen.

Eine weitere Wirkung der erhöhten Stickstoffbelastung ist das Nährstoffungleichgewicht in den Blättern und Nadeln der Bäume. Die bei allen Baumarten von uns beobachtete Abnahme der Blattkonzentrationen von Phosphor, bei der Buche auch diejenige von Kalium und Magnesium (Kap. 3), ist vermutlich eine Folge der einseitigen Überversorgung mit Stickstoff. Die Veränderungen haben dazu geführt, dass die Phosphorkonzentrationen bei Buchen und Fichten und die Magnesiumkonzentrationen bei Buchen heute im akuten Mangelbereich

**Abb. 8:** Entwicklung der Phosphorkonzentrationen im Laub bei Buchen, Fichten und Eichen (links) und Beziehung zwischen den Phosphorkonzentrationen und dem modellierten Stickstoffeintrag (rechts). Gestrichelte Linien: Schwellenwert für ausreichende Ernährung nach Göttlein (16).



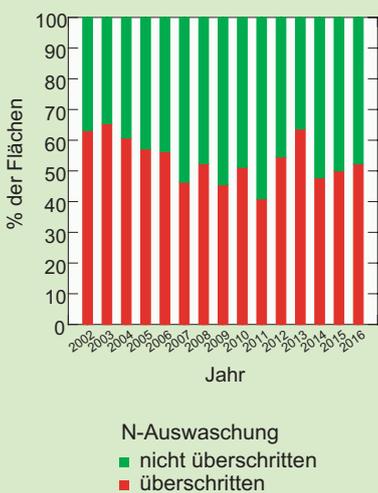
und Klimafaktoren (Trockenheit, Wintertemperaturen) eine entscheidende Rolle. Hohe Stickstoffeinträge und damit verbundene Nährstoffungleichgewichte steigern die hemmende Wirkung von Trockenheit und führen auch dazu, dass durch warme Winter der Stammzuwachs von Buchen gehemmt wird (Kap. 5.2). Diese Wechselwirkungen sind wahrscheinlich zu einem

liegen. Die Konzentrationsverhältnisse zwischen Stickstoff und Phosphor bei Buchen und Fichten sind markant höher als die Grenzwerte für eine harmonische Ernährung und steigen mit zunehmendem Stickstoffeintrag an (Abb. 8). Unter hoher Stickstoffbelastung können Buchen zudem weniger gut auf die Kalium- und Phosphor-Vorräte des Bodens zurückgreifen, was darauf

hinweist, dass die Nährstoffaufnahme gestört ist. Die Ernährung der Eichen ist insgesamt etwas besser.

Das Nährstoffgleichgewicht in den Bäumen ist vermutlich auch verantwortlich für eine verminderte Resistenz gegenüber Parasiten und Trockenheit. Bei der Fichte äussert sich diese Interaktion durch eine zunehmende

**Abb. 9:** Überschreitungshäufigkeit der Schwellenwerte für N-Auswaschung.



Mortalität unter Trockenheit, wenn gleichzeitig die Stickstoffeinträge hoch und die Kalium- oder Magnesiumkonzentration in den Nadeln im Ungleichgewicht stehen (Kap. 2.2.2). Bei der Buche nimmt die Mortalität bei tiefen Phosphorkonzentrationen im Laub ebenfalls zu (Kap. 2.2.1).

Von den Pflanzen nicht aufgenommenen Stickstoff wird als Nitrat aus dem Boden ausgewaschen. Dies gilt als Anzeichen für übermässige Stickstoffbelastung. Die UNECE hat dafür Grenzwerte definiert (17), die in der Schweiz nach Höhenlage differenziert werden.

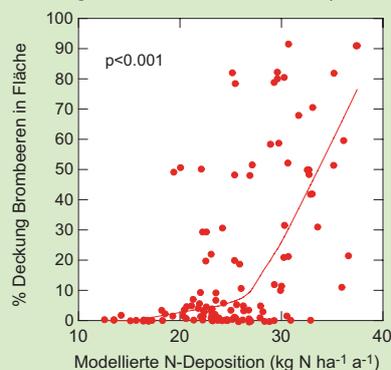
Diese Grenzwerte werden heute in rund der Hälfte unserer Flächen mit Bodenlösungsmessungen überschritten (Abb. 9), trotz einer leichten Abnahme der Nitratauswaschung seit 2005.

Die Stickstoffbelastung führt im Waldökosystem auch zu Veränderungen in



**Foto 8:** Brombeerdecke (Frienisberg BE).

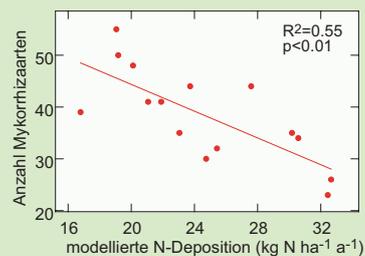
**Abb. 10:** Deckungsgrad von Brombeeren in lichten Stellen der Waldbeobachtungsflächen in Beziehung zur modellierten Stickstoffdeposition.



**Foto 9:** Mehrere Mykorrhizapilzarten, z.B. *Cenococcum geophilum* und *Laccaria amethystina*, auf einer Buchenwurzel aus Zugerberg Vordergeissboden (ZG).



**Abb. 11:** Anzahl Mykorrhizaarten an Buchenwurzeln in einem Gradienten der Stickstoffdeposition (18).



der Krautschicht und bei der Zusammensetzung der Bodenmikroorganismen. Pflanzenarten, die nicht stickstoffliebend, oft aber gefährdet sind, nehmen ab, stickstoffliebende Arten wie Brennnessel oder Holunder dagegen zu. Dazu gehört auch die Brombeere, deren Deckungsgrad bei Stickstoffeinträgen von >20-25 kg N ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> exponentiell ansteigt (Abb. 10, Foto 8). Die von uns untersuchte Diversität der Mykorrhizapilze an Buchenwurzeln nimmt mit zunehmender Stickstoffbelastung ab (18, Kap. 10.4, Foto 9). Dabei wird der Mykorrhizierungsgrad der Feinwurzeln, d.h. der Anteil der pilzbesetzten Wurzelspitzen, ebenfalls vermindert (Abb. 11). Interessanterweise werden auch Arten, die für die Phosphoraufnahme eine wichtige Rolle spielen, bei hohen Stickstoffeinträgen seltener.

## Bodenversauerung

Infolge von Luftreinemassnahmen ist der Eintrag von Schwefelverbindungen, d.h. der klassische «saure Regen», stark zurückgegangen. Nach wie vor hoch ist jedoch der Stickstoffeintrag, der ebenfalls versauernd wirkt. Zunächst wird Ammonium im Boden unter Freisetzung von Säureionen in Nitrat umgewandelt. Von den Pflan-

zen und Mikroorganismen nicht aufgenommenes Nitrat wird aus dem Boden ausgewaschen und nimmt dabei positiv geladene Ionen mit. Dazu gehören die sog. «basischen Kationen» Kalzium, Kalium, Magnesium und Natrium, bei tiefen pH-Werten Mangan und Aluminium (Abb. 12). Dieser Prozess führt zu Bodenversauerung. Dabei nimmt

die Basensättigung, d.h. der Anteil der basischen Kationen an den Kationenaustauschern des Bodens ab. Zur Überwachung der Versauerung eignet sich die Bodenlösung, die mit fest installierten Saugkerzen aus dem Boden gesammelt wird. Bei Versauerung sinkt in der Bodenlösung das Verhältnis zwischen den basischen Kationen und Alu-

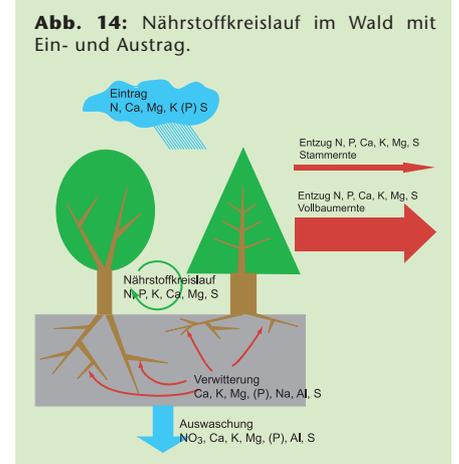


**Foto 10:** Verarbeitung von Buchenkronen zu Hackschnitzeln (Möhlin AG).

pilze, weniger starke Durchwurzelung oder Nährstoffungleichgewichte wie z.B. Magnesiummangel bei Buchen. Weiter nimmt das Risiko für Windwurf auf versauerten Böden stark zu (19).

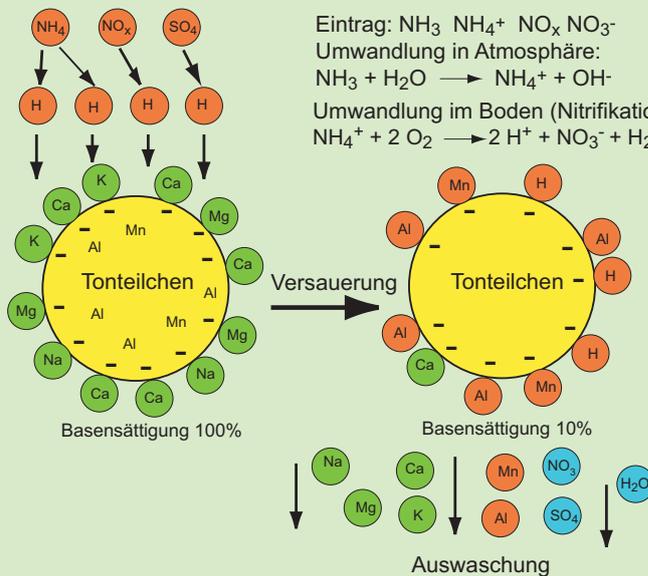
Der aktuelle Zustand der Basensättigung des Bodens kann mit Hilfe von Karten der Vegetationseinheiten und der Geologie berechnet werden (Kap. 7.5). Damit ist eine Risikoabschätzung für Waldgebiete möglich. Für die Kantone AG, BL, BS, FR, SO, TG und ZH wurden Basensättigungskarten im Masstab 1:5'000 erstellt.

### Nährstoffnachhaltigkeit bei Vollbaumernte

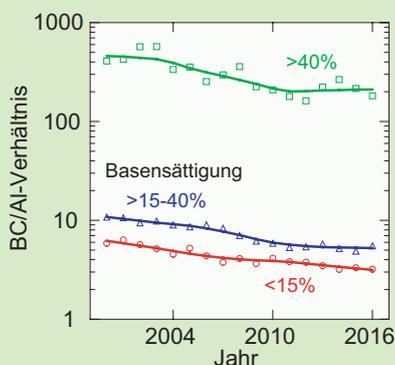


**Abb. 14:** Nährstoffkreislauf im Wald mit Ein- und Austrag.

**Abb. 12:** Schematische Darstellung der Bodenversauerung und Nährstoffauswaschung.



**Abb. 13:** Entwicklung des Versauerungsindikators BC/Al-Verhältnis in der Bodenlösung von Waldflächen, in denen der Boden bereits unterschiedlich stark versauert ist. Daten aus dem Oberboden (0-30 cm). Basensättigung <15%: sehr stark versauert, >15-40%: stark versauert, >40%: basenreich.



minium, das sog. BC/Al-Verhältnis. Unsere Messungen zeigen ein deutliches Fortschreiten der Versauerung (Abb. 13), auch wenn an einigen Standorten sich eine Verlangsamung der Bodenversauerung beobachten lässt, die wahrscheinlich auf eine Abnahme des Stickstoffeintrags zurückgeführt werden kann.

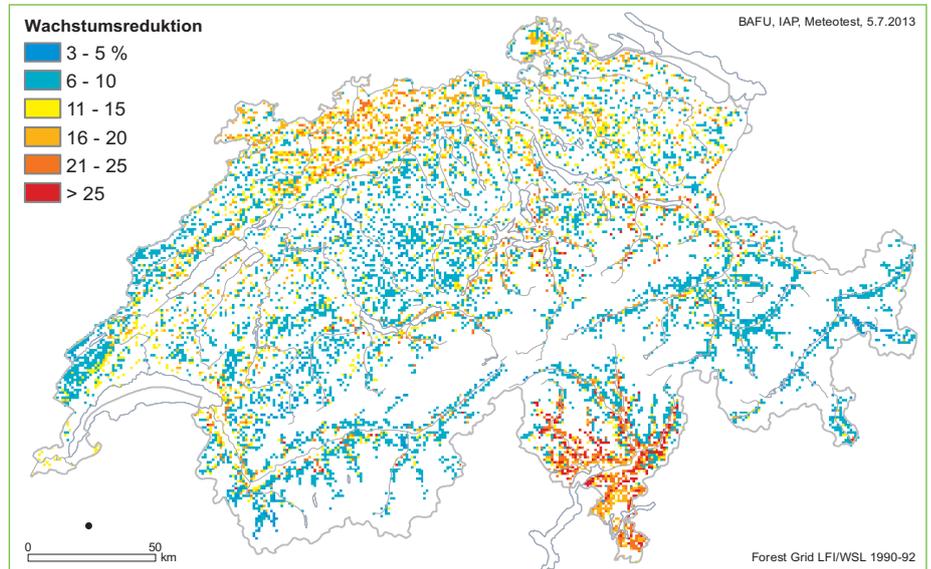
Mögliche Folgen einer fortschreitenden Bodenversauerung für den Wald sind grösstenteils unsichtbar wie z.B. Veränderungen in der Zusammensetzung der Vegetation oder der Ektomykorrhiza-

Vollbaumernte für die Energieholznutzung erhöht den Biomasseertrag um knapp einen Drittel. Abgesehen davon, dass der Brennwert der Kronenteile geringer ist, beträgt der Nährstoffentzug ein Mehrfaches der Stammnutzung. Dies ist besonders ausgeprägt bei Phosphor. Die Nachlieferung von basischen Kationen und Phosphor erfolgt in Waldböden durch Verwitterung von Mineralen oder durch Eintrag mit der Deposition (Staub aus Äckern oder Vulkanausbrüchen, Saharastaub etc. Abb. 14). Diese Quellen vermögen den erhöhten Entzug von Phosphor bei der



**Foto 11:** Bronzeverfärbung bei Buchen infolge Ozoneinwirkung (MuttENZ BL).

Vollbaumernte praktisch nirgends zu decken, bei Kalium und Kalzium in der Hälfte der untersuchten Waldflächen (Kap. 9). Wird die – durch die Stickstoffeinträge angetriebene – Nährstoffauswaschung auf dem heutigen Niveau ebenfalls berücksichtigt, so werden auch die Bilanzen für Kalzium und Magnesium in der Mehrheit der untersuchten Waldflächen (Kap. 9) negativ. Das heisst, dass erstens der



**Abb. 15:** Geschätzte Wachstumsreduktion durch Ozon für Waldbäume (23).

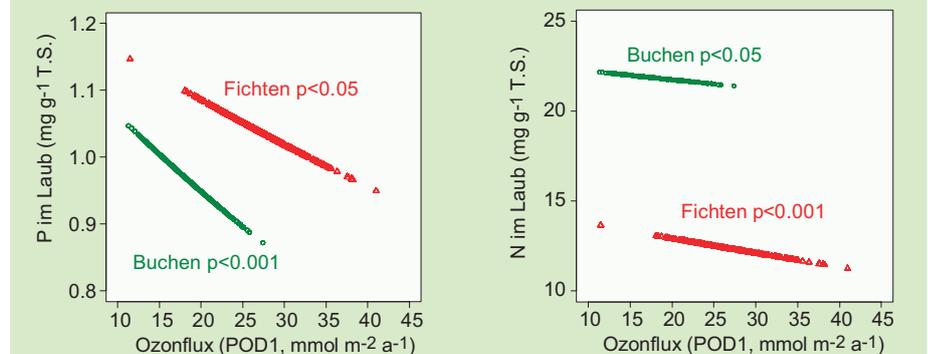
heutige Stickstoffeintrag eine nachhaltige Waldwirtschaft an den meisten Orten verunmöglicht, und dass Vollbaumernte nirgends nachhaltig ist, wenn nicht eine Nährstoffrückführung erfolgt (Kap. 9).

**Ozon**

Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel. Seine Wirkung auf Pflanzen ist sehr gut untersucht (20). Es verursacht charakteristische sichtbare Schäden am Laub

(21, vgl. Kap. 11.2 Foto 11). Forstlich relevanter und auch empfindlicher sind jedoch Wachstumsreduktionen durch Ozon. Durch Auswertung verschiedener Begasungsversuche hat eine Arbeitsgruppe unter der LRTAP-Konvention wachstumsbezogene Grenzwerte (Critical Levels) für verschiedene Baumartengruppen festgelegt (22). Dieser beträgt aktuell für Buchen 5.2 und für Fichten 9.2 mmol m<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup> und wird in allen IAP-Messsta-

**Abb. 16:** Zusammenhang zwischen Ozonbelastung im Jahr vor der Ernte und der Stickstoffkonzentration (links) und Phosphorkonzentration (rechts) im Buchenlaub.



tionen und in allen Jahren überschritten. Einen Ozoneffekt auf das Wachstum finden wir auch bei unseren Auswertungen des Stammzuwachses bei ausgewachsenen Waldbäumen. Anhand einer landesweiten Kartierung des Ozonfluxes für Schweizer Wälder wurde eine Wachstumsreduktion von 11% im Schweizer Wald geschätzt (Abb. 15, 23).

Seit den achtziger Jahren haben dank der Emissionsminderung bei Vorläufersubstanzen von Ozon, das heisst Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen aus Verkehr und Industrie, die Spitzenkonzentrationen von Ozon etwas abgenommen. Die mittlere Belastung (Medianwert) ist jedoch stabil geblieben oder leicht angestiegen und das Grundniveau hat zugenommen (24). Für Bäume relevant ist aber nicht die Ozonkonzentration in der Luft, sondern die Ozonaufnahme durch die Spaltöffnungen (Ozonflux). Seit dem Jahr 2000 hat der Ozonflux für Fichten an vier von sechs der vom IAP betriebenen Messstationen abgenommen, für Buchen an einer von fünf.

Die Kronenverlichtung von Buchen ist bei hoher Ozonbelastung erhöht (Kap. 2.1). Ozon wirkt sich auch auf die Baumernährung aus, denn die Konzentrationen von Stickstoff und Phosphor im Buchenlaub und in Fichtennadeln werden durch Ozon vermindert (Kap. 3.4, Abb. 16). Ozon hemmt generell den Kohlenhydrattransport über das Phloem in die Wurzeln und beeinflusst so das Wachstum der Wurzeln und Mykorrhizapilze negativ (vgl. auch Kap. 10.4).

## Literatur

1. Kowalski, T. und Holdenrieder, O. (2008). Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 3, 45-50.
2. Engesser, R. et al. (2009). Wald und Holz 90, 24-27.
3. IPCC (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of the Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
4. Remund, J. et al. (2016). In: Wald im Klimawandel, eds. Pluess, A. R., Augustin, S. and Brang, P., pp. 23-37. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
5. Drobyshev, I. et al. (2010). Forest Ecology and Management 259, 2160-2171.
6. Arend, M. et al. (2016). In: Wald im Klimawandel, eds. Pluess, A. R., Augustin, S. and Brang, P., pp. 77-91. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
7. Choat, B. et al. (2012). Nature 491, 752-755.
8. Engelbrecht, B. M. J. (2012). Nature 491, 675-677.
9. Brodribb, T. J. und Cochard, H. (2009). Plant Physiology 149, 575-584.
10. Nihlgård, B. (1985). Ambio 14, 1-8.
11. Aber, J. D. et al. (1989). BioScience 39, 378-386.
12. Bobbink, R. und Hettelingh, J.-P. (2011). RIVM report 680359002, Coordination Centre for Effects, National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).
13. Rihm, B. und Achermann, B. (2016). Critical Loads of nitrogen and their exceedances, 78 pp., Berne, Federal Office for the Environment (FOEN).
14. Spiecker, H. et al. (1996). Growth Trends in European Forests. Springer-Verlag, New York, 372 pp.
15. Braun, S., Schindler, C. und Rihm, B. (2017). Science of the Total Environment 599-600, 637-646.
16. Göttlein, A., Baier, R. und Mellert, K. H. (2011). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 182, 173-186.
17. CLRTAP (2016). Mapping Critical Loads for Ecosystems. Chapter V of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Update 13/01/2017. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution,
18. de Witte, L. C. et al. (2017). Science of the Total Environment 605-606, 1083-1096.
19. Braun, S. et al. (2003). Water Air and Soil Pollution 142, 327-340.
20. UNECE (2017). Mapping Critical Levels for Vegetation, 66 pp., Bangor, UK, Center for Ecology & Hydrology (CEH).
21. Skelly, J. et al. (1987). Diagnosing Injury to Eastern Forest Trees. A manual for identifying damage caused by air pollution, pathogens, insects and abiotic stresses. Pennsylvania State University, University Park, 122 pp.
22. Mills, G. et al. (2011). Atmospheric Environment 45, 5064-5068.
23. Braun, S., Schindler, C. und Rihm, B. (2014). Environmental Pollution 192, 129-138.
24. BAFU (2016). Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL), Bundesamt für Umwelt.