



Umwelt
Zentralschweiz

Wie steht es um die Zentralschweizer Wälder?

Ergebnisse und Erkenntnisse aus
der Walddauerbeobachtung

47

48

46

28

ZENTRALSCHWEIZER
REGIERUNGSKONFERENZ



Auftraggeber

Umweltfachstellen Zentralschweiz

Auftragnehmer

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie AG, Benkenstrasse 254A, 4108 Witterswil

+41 61 485 50 70

www.iap.ch

Autorin

Sabine Braun, IAP

Redaktion

Urs Steiger, steiger texte konzepte beratung, Luzern

Bearbeitung Grafiken

Monika Sommerhalder, Luzern

Begleitung Umweltfachstellen Zentralschweiz

Angela Zumbühl, Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden

Gérald Richner, Leiter Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden

Peter Bucher, Umwelt und Energie, Kanton Luzern

Sabine Mezger, Umwelt und Energie, Kanton Luzern

Markus Bucheli, Berufsbildungszentrum Natur und Ernährung, Luzern

Christoph Aeschbacher, Abteilung Wald und Natur, Obwalden

November 2020

Vorwort

«Was ist los mit dem Wald?», mögen sich viele gefragt haben, als im Sommer 2018 das Buchenlaub verdorrte, Tannen und Fichten vertrockneten. Das Trockenjahr weckte Erinnerungen an die 1980er-Jahre, als das «Waldsterben» verbreitet zu Besorgnis Anlass gab. Diese Sorge macht deutlich, wie wichtig der Wald uns ist – nicht nur als Rohstofflieferant oder als Schutz vor Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlägen oder Hangrutschen, sondern auch als Landschaftselement und als beliebter Erholungsraum. Wichtig ist der Wald aber auch als Trinkwasserlieferant und als Lebensraum für Pflanzen und Tiere.

Sturmschäden und darauf folgender Käferbefall sind weitere Ereignisse, bei denen das aktuelle Augenmerk jeweils dem Wald gilt. Doch geben solche auffälligen Ereignisse nur sehr beschränkt Hinweise darauf, wie es dem Wald tatsächlich geht. Wer es genauer wissen will, muss den Wald über längere Zeit beobachten und den Blick nicht nur auf die augenfälligen Schäden richten, sondern vor allem auf die grundlegenden und ursächlichen Aspekte. Genau dies ist das Ziel der interkantonalen Waldbeobachtung, die von mehreren Kantonen seit nunmehr 36 Jahren betrieben wird. Dabei wird nicht nur der Zustand der Bäume untersucht, sondern es werden ebenso Schadstoffeinträge, die Zusammensetzung der Krautschicht, der Boden, das Bodenwasser und die Bodenfauna beobachtet.

Die kantonale Bodenüberwachung Zentralschweiz (KABO-ZCH) hat die Versauerung von Waldböden und die damit verbundene Abnahme der Bodenfruchtbarkeit ebenfalls als prioritäres Thema identifiziert. 2015 haben sich die Zentralschweizer Umweltfachstellen mit Beteiligung der Zentralschweizer Waldfachstellen deshalb dieser Mess- und Beobachtungskampagne angeschlossen und können nun erstmals über die Zwischenergebnisse berichten. Diese erlauben neue Einblicke in die Entwicklungen im Wald. Sie zeigen, dass der grosse Stickstoffeintrag und der Klimawandel je für sich, aber auch in ihrem Zusammenwirken Spuren hinterlassen und den Wald als Ganzes schwächen. Die Ergebnisse belegen auch den Wert dieser Langzeitbeobachtung – nicht nur für die Umweltfachstellen, sondern ebenso sehr für zahlreiche weitere Verwaltungs- und Praxisakteure aus den Bereichen «Wald», «Luftreinhaltung», «Gewässerschutz», «Naturschutz» usw.

Gérald Richner, Leiter Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden

im November 2020

Zusammenfassung

Schadstoffbelastungen und Klimawandel verändern den Wald und setzen ihm zu. Mehrere Kantone lassen den Waldzustand seit 1984 vom Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) im Projekt «Walddauerbeobachtung» an inzwischen 187 Standorten gesamtschweizerisch untersuchen. Seit 2015 beteiligen sich auch die Zentralschweizer Umweltfachstellen zusammen mit den Zentralschweizer Waldfachstellen an diesem Projekt.

Hohe Stickstoffbelastungen

Im Fokus stehen heute die Auswirkungen von Stickstoffbelastungen und Klimawandel. Der Stickstoffeintrag über die Luft liegt gesamtschweizerisch über den ökologisch unbedenklichen Werten («critical loads»). Teile der Zentralschweiz mit hohen Tierbeständen verzeichnet dabei Höchstwerte. Die Folgen sind etwa eine zunehmende Versauerung des Bodens und Ungleichgewichte beim Nährstoffhaushalt der Waldbäume. Dies führt zu erhöhter Nitratauswaschung und zu Gewässerbelastungen.

Gestörte Nährstoffversorgung

Ein hoher Stickstoffeintrag verbessert zwar vorerst die Nährstoffversorgung und damit das Stammwachstum der Bäume. Ab einem Eintrag von über 25 kg N/ha*a sinkt aber das Wachstum bei Fichten kontinuierlich, bei Buchen fällt es rasant ab. Gesamtschweizerisch hat der Volumenzuwachs der Bäume in den letzten drei Jahrzehnten markant abgenommen.

Belastetes Waldökosystem

Die Stickstoffbelastung und die damit verbundenen Nährstoffungleichgewichte und die Bodenversauerung schwächen die Bäume und verändern das Waldökosystem. Mit steigender Stickstoffbelastung nimmt beispielsweise die Artenzahl der Mykorrhizapilze ab und es verändert sich die Kraut- und Strauchschicht. Ab einem Eintrag von 20 bis 25 kg N/ha*a verbreitet sich die Brombeere besonders stark. Andere, oft gefährdete Pflanzenarten verschwinden. Schaden nimmt auch das Wurzelsystem der Bäume, die dadurch für Windwurf markant anfälliger werden.

Der Wald im Klimawandel

Bei starkem Trockenstress verlieren die Bäume die Fähigkeit, Wasser zu leiten und sterben ab. Eine wichtige Rolle spielen dabei Schwächeparasiten wie Hallimasch und Borkenkäfer, die trockengeschwächte Bäume stärker befallen. Waldbäume sterben insbesondere dann ab, wenn ihre Vitalität bereits durch trockene Vorjahre geschwächt ist. Hohe Stickstoffeinträge und Nährstoffungleichgewichte in Blättern und Nadeln der Bäume verstärken Klimaeffekte.

Erste Erkenntnisse aus der Zentralschweiz

Die erst seit wenigen Jahren durchgeführten Untersuchungen an den Zentralschweizer Standorten bestätigen die Situation der Zentralschweiz in Bezug auf die hohen Stickstoffbelastungen und deren Auswirkungen auf die Waldökosysteme. Im Gegensatz zum gesamtschweizerischen Trend ist an den Zentralschweizer Standorten momentan noch ein erhöhtes Stammwachstum festzustellen, das zum Teil mit höheren Niederschlägen zu erklären ist. Die Nährstoffanalyse von Laub und Nadeln offenbart ein ausgeprägtes Ungleichgewicht in der Nährstoffversorgung, insbesondere eine Mangelversorgung mit Phosphor.

Die untersuchten Zentralschweizer Waldböden reagieren sehr unterschiedlich auf Versauerungsprozesse. An zwei Standorten ist der Oberboden beziehungsweise das ganze Bodenprofil versauert. Mancherorts verunmöglichen die sauren Bedingungen den Regenwürmern sogar das Überleben.

Wertvolle Erkenntnisse

Die bis heute vorliegenden Ergebnisse der Walddauerbeobachtung in der Zentralschweiz erlauben eine erste Einordnung in den gesamtschweizerischen Kontext.

Hohe Stickstoffeinträge und der Klimawandel haben in der Zentralschweiz vielfältige Auswirkungen auf das Waldökosystem. Die Walddauerbeobachtung auf den Zentralschweizer Standorten bringt wichtige und verlässliche Aussagen dazu und bildet damit eine Grundlage und eine Erfolgskontrolle für Massnahmen in diesem Bereich.

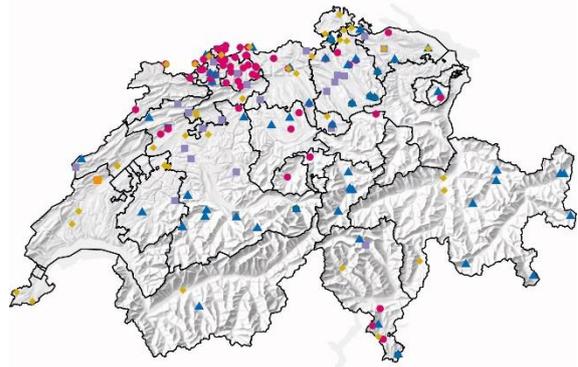
1. Wald unter Dauerbeobachtung

Ein knapper Drittel der Zentralschweiz ist mit Wald bedeckt. Hier wächst nicht nur das Holz, das für die Holzernte genutzt wird. Der Wald ist auch Lebensraum von Tieren und Pflanzen. Er schützt vor Naturgefahren und ist ein wichtiges Reservoir für die Trinkwasserversorgung. Viele Menschen nutzen ihn in ihrer Freizeit zur Erholung. Der Wald ist dabei vielen Belastungen ausgesetzt, etwa physischen wie Bodenverdichtungen durch die Holznutzung. Luftschadstoffe, grösstenteils von ausserhalb des Waldes, setzen den Bäumen, Pflanzen und dem Boden zu. In Teilen der Zentralschweiz sind aufgrund der hohen Tierdichte insbesondere die Ammoniakemissionen sehr hoch, die zu sehr hohen Einträgen von Stickstoff in die empfindlichen Ökosysteme führen.

Mit zunehmender Hitze und Trockenheit sowie häufigeren Stürmen bringt der Klimawandel weiteren Stress für den Wald. Anders als im Landwirtschaftsgebiet, wo die Kulturen in der Regel jährlich gewechselt werden, bleiben die Bäume während Jahrzehnten diesen Belastungen ausgesetzt. Dies erlaubt, die Belastungen in ihrer Langzeitwirkung zu beobachten und zu untersuchen.

Gesamtschweizerische Walddauerbeobachtung
Das Programm der «Walddauerbeobachtung», durchgeführt vom Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP), ist darauf ausgerichtet, regionenübergreifend die schleichenden Veränderungen der Wälder zu dokumentieren. Seit dem Start Mitte der 1980er-Jahre durch acht Kantone wurde das Beobachtungsnetz schrittweise von 51 auf inzwischen 187 Beobachtungsflächen und auf die ganze Schweiz ausgeweitet. Die Ergebnisse des Gesamtprogramms wurden 2018 veröffentlicht.¹

Mit ihren jährlichen Erhebungen an einer grossen Anzahl von Bäumen und zu einer Vielzahl von Indikatoren ergänzt die «Walddauerbeobachtung» die räumlich repräsentative Sanasilva-Inventur der Forschungsanstalt für Wald,



Map CC-BY-SA, Code modified after: github.com/grsr/bch/ivieriate-maps-ggplot2-of-Geometries; Swisstopo 2015

● Buche ■ Buche und Eiche ■ Buche und Fichte ▲ Fichte ◆ Eiche

Abb. 1: Standorte der interkantonalen Walddauerbeobachtung 2017 des Instituts für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) (Kartengrundlage:Swisstopo)

Schnee und Landschaft (WSL), die den Gesundheitszustand von Waldbäumen jährlich in einem 16-mal-16 km-Raster auf 47 Flächen erfasst.

Das Spektrum der Walddauerbeobachtung wurde nach und nach den sich stellenden Fragen und Bedürfnissen angepasst und fokussiert heute auf die Auswirkungen der Stickstoffeinträge und des Klimawandels auf den Wald sowie auf die entsprechenden Wechselwirkungen dieser Einflüsse.

Walddauerbeobachtung in der Zentralschweiz
Seit 2015 beteiligen sich die Zentralschweizer Umweltfachstellen zusammen mit einigen

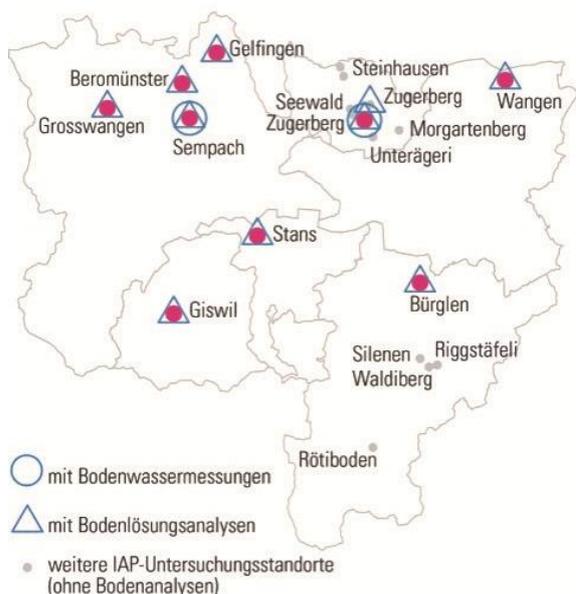


Abb. 2: Zentralschweizer Standorte der Walddauerbeobachtung 2015–2019

Zentralschweizer Waldfachstellen an den Erhebungen der Walddauerbeobachtung mit insgesamt neun zusätzlichen Standorten (vgl. Anhang 1). Weitere zwölf Standorte sind seit 1985 im Kanton Zug und seit 1991 im Kanton Uri in Betrieb.

Der Beitritt erfolgte im Rahmen der kantonalen Bodenüberwachung Zentralschweiz (KABO-ZCH), die die zunehmende Versauerung von Waldböden und die damit verbundene Abnahme der Bodenfruchtbarkeit als prioritäres Thema beurteilt.

Jede der Untersuchungsflächen umfasst je 60 Buchen, Fichten oder 35 Eichen. In definierten Zeitabständen erfolgt jeweils eine Reihe von Untersuchungen (Anhang 2). Jährlich wird beispielsweise die Kronenverlichtung und -verfärbung erhoben, alle vier Jahre erfolgen Untersuchungen zum Stammzuwachs und des Nährstoffstatus in Laub und Nadeln. Bei den neun Zentralschweizer Untersuchungsflächen wird die gesammelte Bodenlösung monatlich chemisch analysiert, in Sempach und auf dem Zugerberg wird ausserdem der Bodenwasserhaushalt stündlich gemessen.²

Die inhaltlich breit abgestützten Untersuchungen ermöglichen der Zentralschweiz ein wertvolles Langzeitmonitoring in verschiedenen Bereichen wie «Wald», «Boden», «Luft» und «Naturschutz». Dabei werden unter anderem die auffällig hohen Stickstoffeinträge in Teilen der Zentralschweiz, die damit verbundene Bodenversauerung und die Auswirkungen auf die Waldgesundheit thematisiert.

Insgesamt stellt die Walddauerbeobachtung damit ein einzigartiges, regionenübergreifendes Frühwarnsystem für das «Ökosystem Wald» dar. Deren Erkenntnisse kommen nicht allein den Umweltfachstellen zugute, sondern dank des hohen Praxisnutzens auch allen Verwaltungs- und Praxisakteuren der Waldwirtschaft und des Naturschutzes.

2. Nährstoffeintrag und Klimawandel im Fokus

Die intensive ökologische Beobachtung der Schweizer Wälder setzte Anfang der 1980er-Jahre ein im Zusammenhang mit den damals aktuellen Belastungen durch Schwefel («saurer Regen») und Ozon (O₃). Seither hat sich die Problemlage deutlich gewandelt. Die Schwefelbelastung ist dank Lufthygienemassnahmen markant gesunken. Dagegen sind die Einträge von Stickstoff (N) durch Deposition sowie die Auswirkungen des Klimawandels stärker in den Fokus gerückt. Beide Aspekte stellen auch für die Zentralschweiz eine besondere Herausforderung dar.

Stickstoff im Wald

Übermässige Stickstoffeinträge

Die Landwirtschaft, die Industrie und der Verkehr emittieren grosse Mengen unterschiedlicher Stickstoffverbindungen, die mit dem Regen, als Aerosol oder gasförmig über die Luft verfrachtet werden. Im Wald, wo die Baumkronen eine grosse, raue Oberfläche bilden, bleiben die Stickstoffverbindungen besonders gut haften, sodass der Stickstoffeintrag überdurchschnittlich hoch ausfällt. Der Wald ist somit eine effiziente Stickstoffsенке: Die jährlichen Einträge betragen bis weit über 50 kg Stickstoff pro Hektar (N/ha*a), was einer mittleren Stickstoffdüngengebe entspricht. Insbesondere das

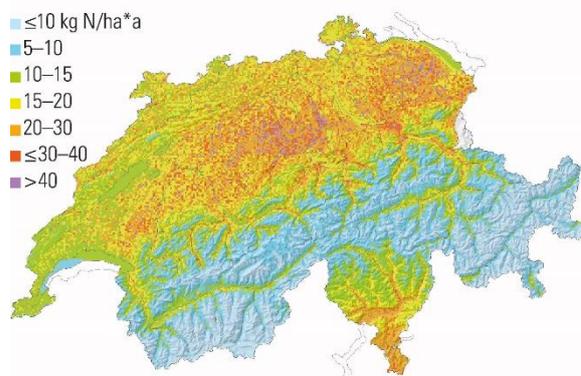


Abb. 3: Stickstoffeinträge in Waldökosysteme (Meteotest, modelliert). Aufgrund der grösseren und rauerer Oberfläche der Baumkronen sind die Stickstoffeinträge in die Wälder besonders hoch. Hohe Werte weisen Gebiete mit hoher Tierdichte auf, denn rund zwei Drittel der Einträge stammen aus der Landwirtschaft, ein Drittel stammt aus Verkehr und Industrie. (Datenquelle: BAFU)

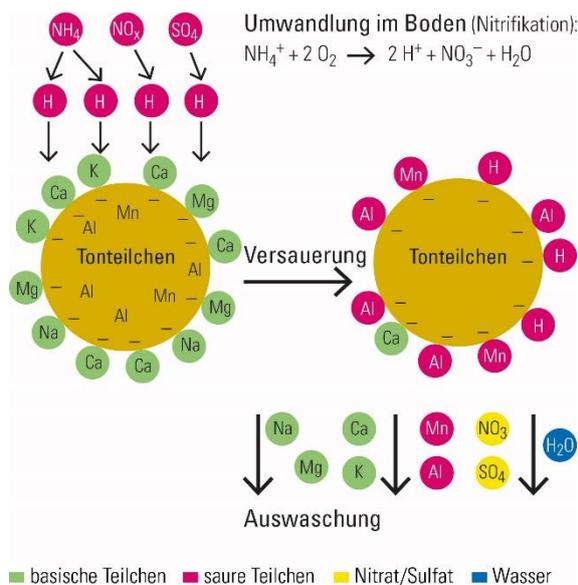


Abb. 4: Schematische Darstellung der Bodenversauerung und Nährstoffauswaschung. Im Boden wird Ammonium (NH_4^+) zu Nitrat (NO_3^-) umgewandelt (Nitrifikation). Dabei werden Säureprotonen freigesetzt. Von den Pflanzen und Mikroorganismen nicht benötigtes Nitrat wird ausgewaschen.

Luzerner Mittelland mit seiner hohen Tierdichte bildet dabei einen der Hotspots. Die massiven Stickstoffeinträge übersteigen die Mengen, die für die Umwelt als unbedenklich betrachtet werden – die sogenannten «critical loads» – um ein Mehrfaches. Letztere liegen für Laubwald bei 10–20 kg/ha*a, für Nadelwald bei 5–15 kg/ha*a, Werte, die gesamtschweizerisch praktisch überall überschritten werden.

Bodenversauerung und Nitratauswaschung

Der hohe Stickstoffeintrag sorgt auch für eine zunehmende Versauerung des Bodens. Dort wird Ammonium (NH_4^+) zu Nitrat (NO_3^-) umgewandelt (Nitrifikation), wobei Säure-Protonen (H^+) in den Boden freigesetzt werden (vgl. Abb. 4). Überschüssiges, von Pflanzen und Mikroorganismen nicht aufgenommenes Nitrat wird ausgewaschen. Es reisst dabei positiv geladene Ionen mit, unter anderem basische Kationen wie Kalzium, Kalium, Magnesium und Natrium, und bewirkt Nährstoffverluste im Boden. Bei sauren Bodenverhältnissen (tiefen pH-Werten) werden auch Mangan und Aluminium mobilisiert. Durch diesen Prozess nimmt der Anteil an basischen Kationen ab und der Boden versauert zusehends. Als Indikator für die Bodenversauerung dient das Verhältnis zwischen den basischen Kationen Kalzium, Magnesium und Kalium zu Aluminium im Bodenwasser (BC/Al-

Verhältnis). Dieses berücksichtigt, dass mit zunehmender Bodenversauerung die für Pflanzen giftigen Aluminiumionen (Al) in der Bodenlösung besser verfügbar werden.

Die fortschreitende Bodenversauerung ist für den Wald mit erheblichen Folgen verbunden: Die Zusammensetzung der Vegetation und der Mykorrhizapilze verändert sich, die Nährstoffungleichgewichte wie beispielsweise Magnesiummangel nehmen zu und die Wurzeln nehmen Schaden. Unter sauren Bedingungen verringert sich beispielsweise die Durchwurzelung des Bodens mit Feinwurzeln (vgl. Abb. 5). Mit der Bodenversauerung sinkt so die Stabilität des Bestandes. Damit steigt auch das Risiko für Windwürfe stark an (vgl. Abb. 6).

Durchwurzelungstiefe (cm)

Feinwurzeln/dm² ■ >5 ■ 3–5 ■ 1–2 ■ 0.5

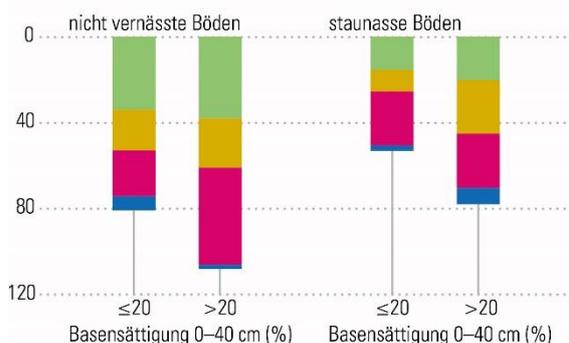


Abb. 5: Durchwurzelungstiefe in Abhängigkeit der Basensättigung als Indikator für die Säureverhältnisse (je geringer die Basensättigung, umso saurer die Bodenverhältnisse)³. Bei saureren Bodenverhältnissen (Basensättigung weniger als 20%) sind die Feinwurzeln geschädigt und reichen weniger tief in den Boden.

Windwurf

% geworfene Bäume

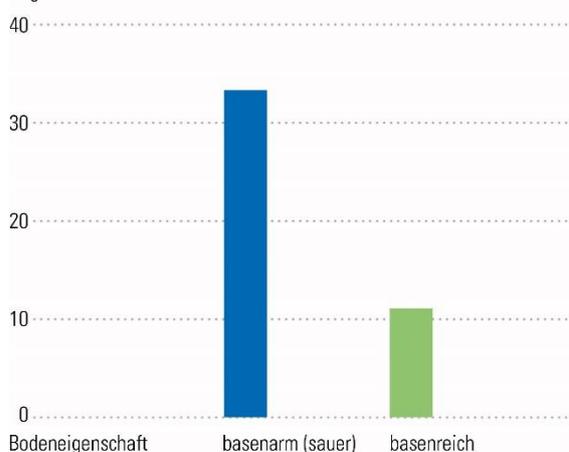


Abb. 6: Windwurfanfälligkeit auf Buchen- und Fichtenflächen während des Sturms «Lothar» in Abhängigkeit der Säureverhältnisse. Bei saureren Bodenverhältnissen fallen deutlich mehr Bäume dem Windwurf zum Opfer.⁴

Limitiertes Baumwachstum

Stickstoff (N) ist ein wichtiger Pflanzennährstoff, der zum Pflanzenwachstum beiträgt. Das Wachstum ist allerdings nur möglich, solange auch die anderen lebenswichtigen Nährstoffe wie Phosphor, Kalium und Magnesium in ausreichendem Masse vorhanden sind. Entsprechend wird das Wachstum begrenzt durch die verfügbaren Nährstoffvorräte im Waldboden und die Fähigkeit zur Nährstoffaufnahme. Wie die Beobachtungen zeigen, nimmt das Wachstum der Waldbäume bis zu einem Stickstoffeintrag von 25 kg/ha*a zu, um bei höheren Werten bei Fichten deutlich, bei Buchen massiv abzunehmen (vgl. Abb. 7).

Die gesamtschweizerischen Erhebungen zeigen, dass der Volumenzuwachs aller untersuchten Baumarten in den letzten drei Jahrzehnten kontinuierlich abgenommen hat (vgl. Abb. 8). Dabei spielen bei Buchen und Fichten die Stickstoffeinträge und die Phosphorverfügbarkeit eine Rolle, bei den Buchen zusätzlich die Wechselwirkungen von Stickstoffeintrag und Trockenheit, die Nährstoffungleichgewichte im Laub sowie der stark erhöhte Fruchtbehang.

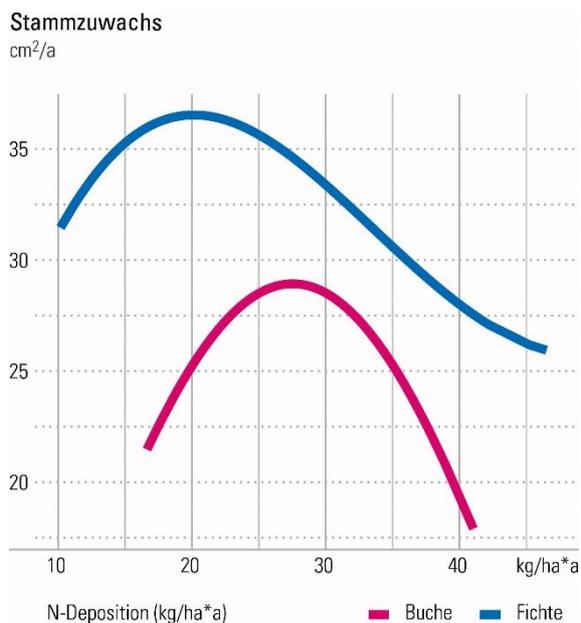


Abb. 7: Beziehung zwischen dem Stammzuwachs von Buchen und Fichten und der Stickstoffdeposition. Für diese Grafik wurden alle anderen Variablen ausser der Stickstoffdeposition gemittelt.⁵ Ab einem Stickstoffeintrag von mehr als 25 kg/ha*a nimmt das Stammwachstum von Fichten deutlich, jenes von Buchen massiv ab.

Gestörte Nährstoffversorgung schwächt Bäume

Die erhöhte Stickstoffzufuhr bringt die Nährstoffversorgung der Bäume aus dem Gleichgewicht. Dies zeigt sich anhand der Nährstoffgehalte in den Blättern und Nadeln. Mit steigendem Stickstoffeintrag ist bei Buchen und Fichten ein zunehmender Mangel an Phosphor (vgl. Abb. 9) festzustellen, bei Buchen auch ein Mangel an Magnesium. Die Abnahme der Phosphorkonzentration im Buchenlaub in Abhängigkeit vom Stickstoffeintrag hat sich in den letzten drei Jahrzehnten markant verstärkt. Die Störung der Nährstoffversorgung zeigt sich auch darin, dass Buchen bei hoher Stickstoffbelastung die Kalium- und Phosphorvorräte des Bodens schlechter nutzen können. Bei Eichen ist die Nährstoffversorgung etwas besser.

Die Nährstoffungleichgewichte machen die Bäume anfälliger gegenüber Parasiten und Trockenheit. Bei Trockenheit sterben Fichten häufiger ab, wenn die Stickstoffeinträge hoch und die Kalium- und Magnesiumkonzentrationen nicht ausgeglichen sind. Bei den Buchen ist die Mortalität bei tiefen Phosphorkonzentrationen im Laub erhöht. Auch diese Beziehung wird durch Trockenheit verstärkt.

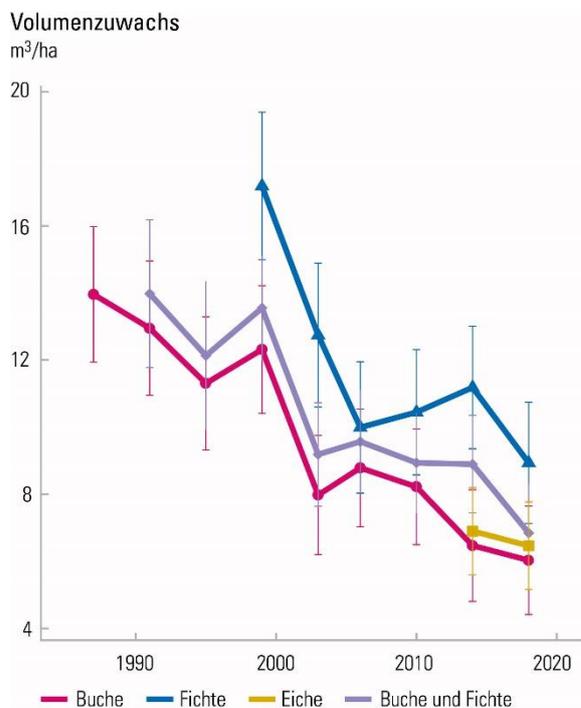


Abb. 8: Entwicklung des Volumenzuwachses 1984–2018 auf den Flächen der gesamtschweizerischen Walddauerbeobachtung. Seit drei Jahrzehnten nimmt das Wachstum der untersuchten Waldbäume kontinuierlich ab.

Phosphorkonzentration im Laub
mg/g Trockensubstanz

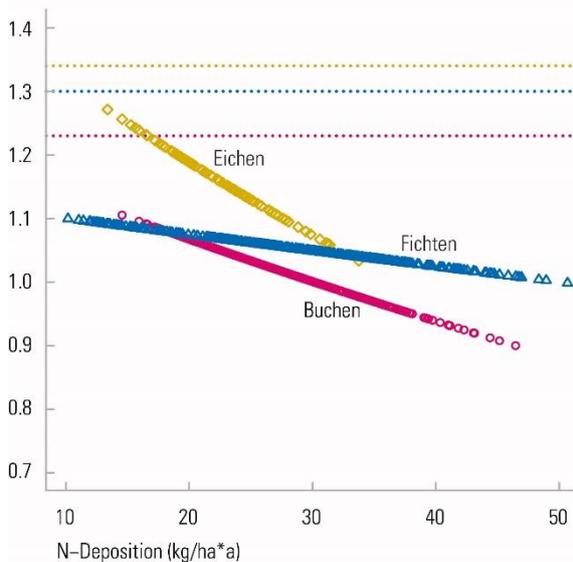


Abb. 9: Beziehung zwischen den Phosphorkonzentrationen und dem modellierten Stickstoffeintrag (Regression; gestrichelte Linien: Schwellenwert für ausreichende Ernährung nach Göttlein⁶). Die Phosphorkonzentration in den Blättern bzw. den Nadeln nimmt mit steigenden Stickstoffeinträgen kontinuierlich ab. Die Bäume leiden unter Phosphormangel.

Mehr Brombeeren, weniger Mykorrhiza-Arten
Pflanzen, die hohe Stickstoffgehalte nicht mögen, leiden unter der hohen Nährstoffzufuhr. Es sind dies vor allem gefährdete Arten. Stickstoffliebende Arten wie die Brombeere leben dagegen auf. Beispielsweise nimmt der Deckungsgrad der Brombeere ab einem Eintrag von mehr als 20–25 kg N/ha*a exponentiell zu (vgl. Abb. 10) und behindert damit auch die Naturverjüngung des Waldes.

Die Stickstoffgehalte beeinflussen aber auch die Bodenpilze (Mykorrhizapilze), die für die Nährstoffversorgung der Bäume eine zentrale Rolle spielen. An Buchenwurzeln nimmt deren Diversität mit zunehmender Stickstoffbelastung ab (vgl. Abb. 11). Seltener werden insbesondere jene Arten, die für die Phosphorversorgung wichtig sind. Zudem sind immer weniger Wurzelspitzen überhaupt von Mykorrhiza besiedelt.

Der Wald im Klimawandel

In der Schweiz hat die Temperatur in den letzten 150 Jahren im Durchschnitt bereits um 1,8 °C zugenommen.⁸ Bei den Niederschlägen sind keine gesamtschweizerischen Trends festzustellen. Höhere Temperaturen verstärken

aber die Verdunstung und damit den Trockenstress für die Bäume.

Im Kanton Luzern waren während der Vegetationszeit der Jahre 2018 und 2019 deutliche Niederschlagsdefizite zu verzeichnen (2018: –40%; 2019: –25% der durchschnittlichen Niederschlagsmenge). Dies führte zu vermehrter Trockenheit und hinterliess Spuren im Wald. Verschiedenenorts wurden Fichten- und Buchen-

Deckungsgrad Brombeeren
Flächenprozent (p<0.001)

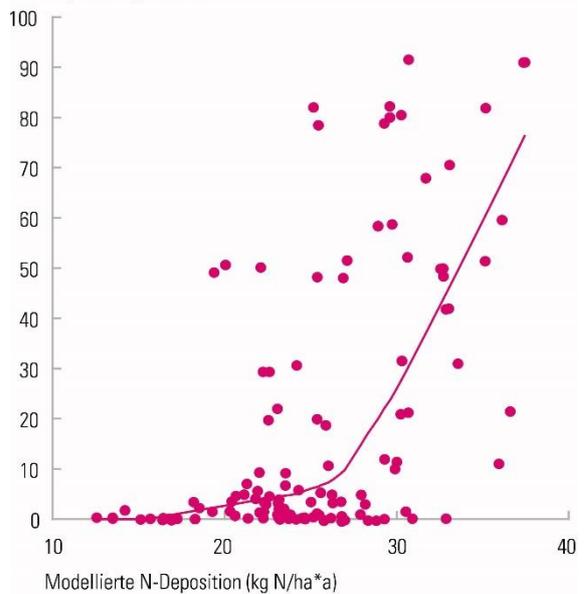


Abb. 10: Deckungsgrad von Brombeeren an lichten Stellen der Waldbeobachtungsflächen in Beziehung zur modellierten Stickstoffdeposition. Bei einem Stickstoffeintrag von mehr als 20–25 kg pro Hektar und Jahr verbreitet sich die Brombeere exponentiell und erschwert die Naturverjüngung.

Anzahl Mykorrhiza-Arten
auf Wurzelspitzen

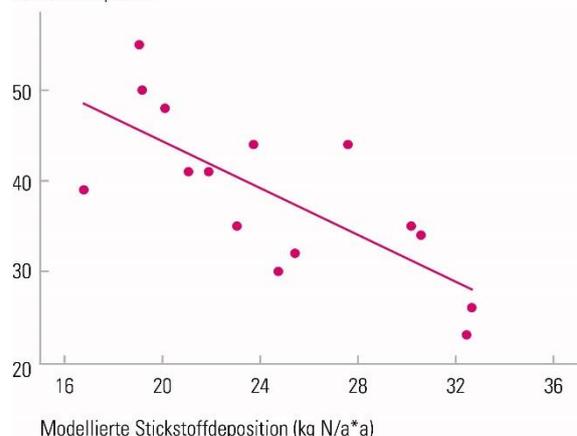


Abb. 11: Anzahl Mykorrhizapilz-Arten an Buchenwurzeln in einem Gradienten der Stickstoffdeposition.⁹ Mit zunehmendem Stickstoffeintrag kommen immer weniger verschiedene Arten von Bodenpilzen (Mykorrhiza) vor. Diese sind für die Nährstoffversorgung von grosser Bedeutung.

bestände geschwächt. In der Folge hat der Befall von Fichten durch Borkenkäfer deutlich zugenommen. Zahlreiche Flächen waren auch von Windwurf betroffen.

Stickstoffbelastung verstärkt Temperatureffekte

Als Folge des Temperaturanstiegs treiben Buchen zunehmend früher aus. Allein zwischen 1980 und 2015 verlängerte sich die Vegetationsperiode um zehn Tage.¹ Aufgrund der Trockenheit tritt vermutlich auch die Blattverfärbung leicht früher ein.

Wärmere Winter hemmen den Stammzuwachs von Fichten¹ – ein Effekt, der durch hohe Stickstoffeinträge verstärkt wird. Bei hoher Stickstoffbelastung oder schlechter Magnesiumversorgung ist dies auch bei Buchen der Fall. Bei erhöhten Stickstoffeinträgen und unausgeglichener Kaliumversorgung reagieren Buchen bezüglich des Stammwachstums zudem empfindlich auf Trockenheit.

In Kombination mit der stärkeren Verdunstung fördern höhere Temperaturen den Fruchtbehang von Buchen (vgl. Abb. 13). Dies ist mit vermindertem Stammzuwachs und grösserer Kronenverlichtung verbunden. Buchen profitieren

Früchtezahl pro Kurztrieb (Buchen)

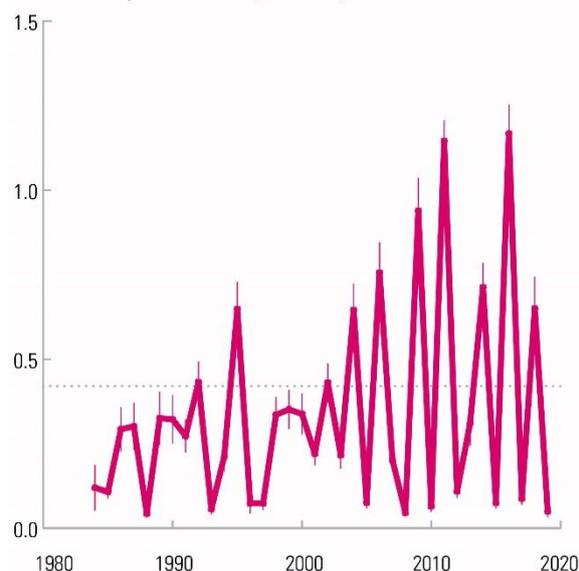


Abb. 13: Verlauf des Fruchtbehangs bei der Buche. (Gestrichelte Linie als Orientierungsgrösse: Mastgrenze, 150 Früchte/m²; Balken: 95-%-Vertrauensbereich). Die Bäume zeigen häufiger übermässigen Fruchtbehang, was zu zunehmendem Stress führt. Die Bäume wachsen langsamer und haben stärker verlichtete Kronen.



Abb. 12: Eingefärbte Leitgefässe einer Buche mit 20 % Kronenverlichtung (links) und 70 % Kronenverlichtung (rechts). Trockenstress führt zu Unterdruck in den Leitgefässen der Bäume, die dadurch mit Luftblasen gefüllt werden und die Baumkronen nicht mehr zu versorgen vermögen.

ren also nicht von höheren Temperaturen, sondern werden vielmehr in ihrer Vitalität geschwächt.

Bäume unter Trockenstress

Akuter Trockenstress, wie er in den letzten Jahren mehrmals zu beobachten war, bewirkt in den Wasserleitgefässen der Bäume einen Unterdruck. Es bilden sich Luftblasen, die das Leitssystem schädigen. Ist ein gewisser Anteil von Leitgefässen (vgl. Abb. 12) davon betroffen, stirbt der Baum.¹⁰ Schliessen die Waldbäume die Spaltöffnungen ihrer Blätter oder Nadeln, können sie dieser Schädigung zu einem gewissen Grad entgegenwirken, ein Prozess, der bei Buchen effizienter abläuft als bei Fichten. Den Trockenstress dämpfen können die Bäume

Fichtenmortalität

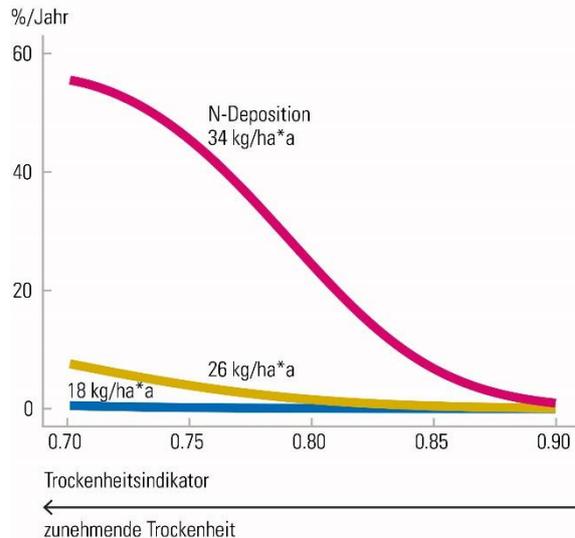


Abb. 14: Interaktion zwischen Trockenheit (dargestellt mittels Trockenheitsindikator) und Stickstoffdeposition auf die Mortalität von Fichten. Vorhersagen aufgrund eines multivariaten Regressionsmodells unter Mittelung aller anderen Parameter. Fichten sterben bei einem hohen Stickstoffeintrag (rote Kurve) bei Trockenheit viel häufiger ab als bei moderatem Eintrag (gelbe und blaue Kurve).

aber auch, indem sie Wasser aus tieferen Bodenschichten aufnehmen. Buchen und Eichen gelingt dies besser als Fichten.

Die bei Trockenheit erhöhte Anfälligkeit für den Befall mit Parasiten wie Borkenkäfern, Hallimasch oder Buchenrindennekrosen war bis zum Sommer 2018 von grösserer Bedeutung für Vitalitätseinbussen im Wald als die direkte Trockenschädigung. Der Sommer 2018 beziehungsweise die Reihe vorausgehender Trockenjahre hat jedoch diese Situation zumindest für die Buche geändert. Die Auswertungen zeigen, dass sich Trockenheitswirkungen bis über vier Jahre kumulieren können. Bei den Fichten ist nach wie vor der Befall mit dem Borkenkäfer die wichtigste Trockenheitsfolge. In Verbindung mit der Trockenheit verstärken hohe Stickstoffeinträge und Nährstoffungleichgewichte die Mortalität (vgl. Abb. 14).

3. Ergebnisse der Walddauerbeobachtung in der Zentralschweiz

Hohe Ammoniak-Stickstoff-Einträge

Stickstoff wird in unterschiedlichen Formen in den Wald eingebracht. Während der Eintrag in flüssiger Form leicht zu messen ist, hängt die Aufnahme von Aerosolen und von Gasen wesentlich von der aktiven Oberfläche ab. Die Depositionsgeschwindigkeit variiert beispielsweise je nach Baumart. Die Stickstoffeinträge werden deshalb auf Basis verschiedener Inputdaten mittels Modellberechnungen ermittelt (vgl. Abb. 3). Die Ergebnisse zeigen, dass an allen Zentralschweizer Untersuchungsstandorten der jährliche Stickstoffeintrag zum Teil um ein Mehrfaches grösser ist, als dies ökologisch als unbedenklich betrachtet wird («critical loads»). Die höchsten Werte werden an den Luzerner Standorten erreicht – mit Extremwerten von bis zu 70 kg N/ha*a in Beromünster (Abb. 15).

Die Messungen mittels Passivsammler bei den Luzerner Standorten und auf dem Zugerberg belegen im Weiteren den im schweizweiten Vergleich überdurchschnittlichen Einfluss der Landwirtschaft. So trägt Ammoniak-(NH₃-) Stickstoff über zwei Drittel zur Gesamtstickstoffbelastung bei. 2018 und 2019 waren höhere NH₃-Konzentrationen zu verzeichnen als in den Vorjahren¹¹, was wahrscheinlich auf die heissen Sommer zurückzuführen ist. Weitere wichtige Stickstoffquellen sind der Verkehr, Industrie und Gewerbe, sowie Haushalte.

Überdurchschnittlicher Stammzuwachs

Sowohl die Buchen als auch die Fichten wachsen an den Zentralschweizer Untersuchungsstandorten deutlich stärker als im Durchschnitt der übrigen Standorte der gesamtschweizerischen Walddauerbeobachtung (vgl. Abb. 16). Bei den Buchen liegen nur jene des Standorts Giswil im Wachstumsbereich der übrigen Flächen, bei den Fichten ist dies beim Standort Grosswangen der Fall. Auf den ersten Blick ist dies überraschend. Allerdings handelt es sich

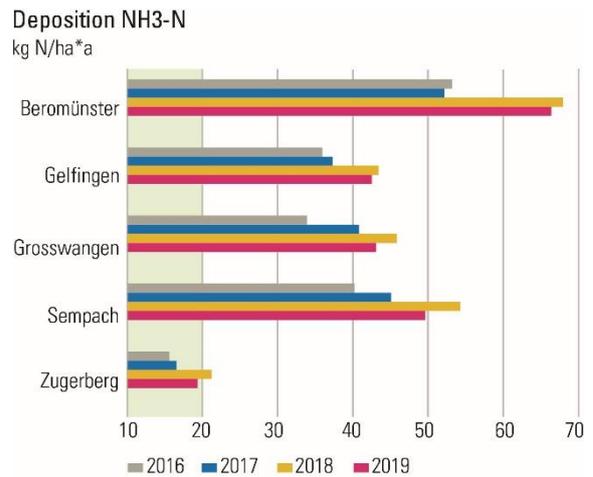


Abb. 15: Eintrag von Ammoniak-Stickstoff 2016–2018 an den Zentralschweizer Standorten mit übermässigem Stickstoffeintrag («critical load»; grüner Bereich), berechnet mit einer der Baumartenzusammensetzung angepassten Depositionsgeschwindigkeit von 22 (Laubwald) bzw. 30 (Nadelwald) mm/s

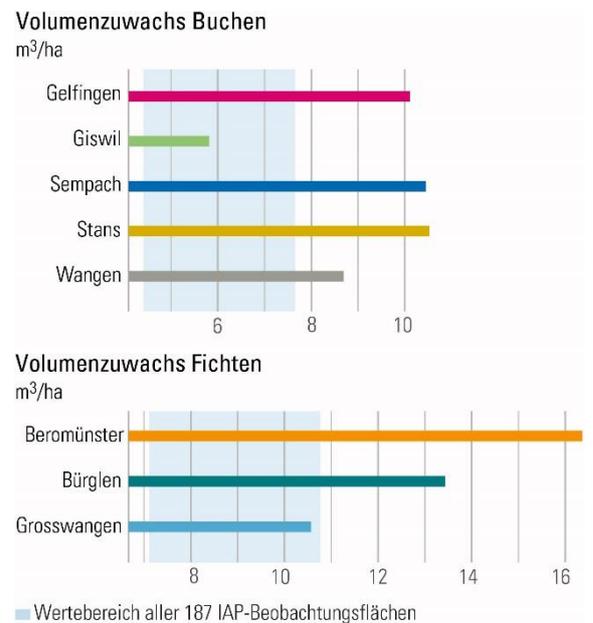


Abb. 16: Volumenzuwachs von Buchen (oben) und Fichten (unten) im Vergleich zur Gesamtheit der Beobachtungsflächen der Walddauerbeobachtung (Balken: 95-% Vertrauensbereich). Mit Ausnahme der Standorte Giswil (Buchen) und Grosswangen (Fichten) verzeichnen alle Zentralschweizer Standorte im schweizerischen Vergleich ein überdurchschnittliches Stammwachstum.

um vergleichsweise niederschlagsreiche Standorte. Die wachstumshemmende Wirkung des Stickstoffs ist dagegen vor allem bei Trockenheit zu beobachten.

Nährstoffungleichgewichte in Buchenlaub und Fichtennadeln

Mit Ausnahme des Standorts Zugerberg liegen die Konzentrationen von Stickstoff im Laub aller Buchenstandorte deutlich über dem gesamtschweizerischen Durchschnittswert (vgl. Abb. 18, blaue Linie). Die Phosphorkonzentrationen bewegen sich dagegen deutlich im Mangelbereich (links des grünen Bereichs für eine ausreichende Versorgung), wie dies auch im Mittel aller Schweizer Standorte der Fall ist. Einzig bei den Standorten Sempach und Beromünster ist die Phosphorversorgung trotz der sehr hohen Stickstoffeinträge gut, was auf die hohen Phosphorgehalte des Bodens zurückzuführen ist.

Erhöhter Stickstoffeintrag bewirkt ein Nährstoffungleichgewicht in den Blättern und

Nadeln der Bäume. Die Unterversorgung mit Phosphor (vgl. Abb. 17, Mitte), bei den Buchen auch mit Magnesium, ist vermutlich eine Folge der hohen Stickstoffeinträge. Das Verhältnis der Stickstoff- zur Phosphorkonzentration (vgl. Abb. 18 und Abb. 17 rechts) liegt bei Buchen und Fichten grösstenteils markant über den Werten für eine ausgeglichene Ernährung. Mit zunehmendem Stickstoffeintrag verschärft sich das Nährstoffungleichgewicht, was auch die Resistenz der Bäume gegenüber Parasiten und Trockenheit vermindern kann.

Kronenverlichtung

Mit der Kronenverlichtung wird der Nadel- beziehungsweise Blattverlust der Waldbäume ermittelt als Indiz für die Vitalität der Bäume. Bekannte Ursachen für die Kronenverlichtung

Nährstoffgehalt im Buchenlaub

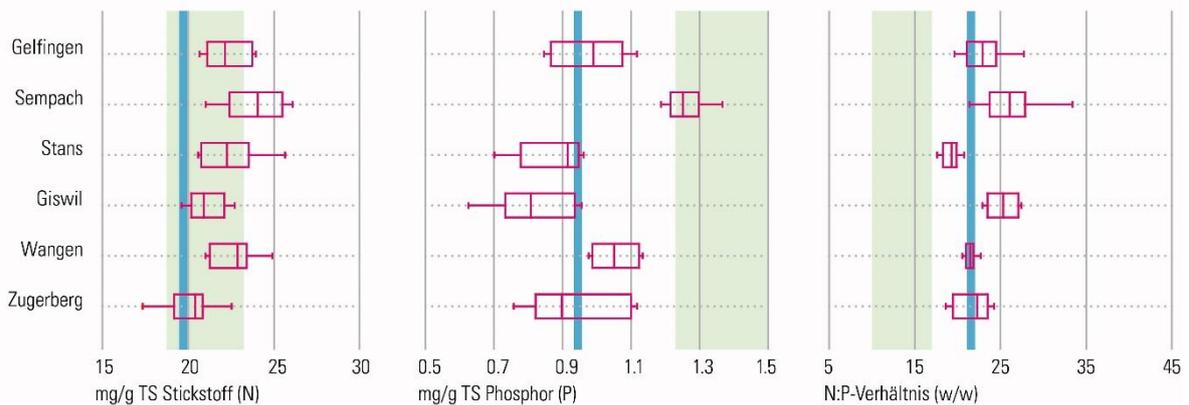


Abb. 18: Stickstoff-(N-) und Phosphor-(P-)Konzentrationen (links und Mitte) sowie Verhältnis zwischen diesen beiden 2015 in Buchenlaub für acht Einzelbäume pro Standort (rot), Mittelwert aller Beobachtungsflächen der Walddauerbeobachtung (Referenz: blaue Linie) sowie Bereiche für ausreichende Versorgung (grüne Fläche). Das Buchenlaub an den Zentralschweizer Standorten ist mit Ausnahme des Zugerbergs im gesamtschweizerischen Vergleich überdurchschnittlich mit N versorgt, weist jedoch mit Ausnahme des Standorts Sempach eine Mangelversorgung mit P auf (links der grünen Fläche). Insgesamt ist das Nährstoffverhältnis (N:P; rechts) überall unausgeglich (ausserhalb der grünen Fläche).

Nährstoffgehalt in Fichtennadeln

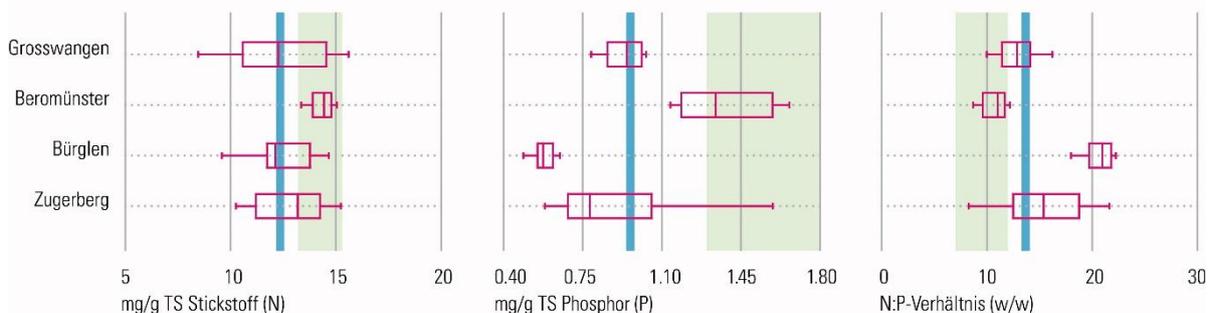


Abb. 17: N- und P-Konzentration (links und Mitte) 2015 in Fichtennadeln für acht Einzelbäume pro Standort (rot), Mittelwert aller Beobachtungsflächen der Walddauerbeobachtung (Referenz: blaue Linie) sowie Bereiche für ausreichende Versorgung (grüne Fläche). Die N- und die P-Konzentration in den Fichtennadeln liegen an den Zentralschweizer Standorten mit Ausnahme von Beromünster und Bürglen im schweizerischen Durchschnitt. Allerdings ist nur in Beromünster die P-Versorgung ausreichend.

sind unter anderem Trockenheit, Ozonbelastung und Fruchtbehang. Mit diesen Faktoren lassen sich jährliche Schwankungen der Kronenverlichtung gut erklären. Bäume, deren Kronenverlichtung einen bestimmten Schwellenwert – üblicherweise 25 Prozent – überschreitet, gelten gemäss internationaler Übereinkunft als gestresst. Auf den meisten Zentralschweizer Flächen war die Kronenverlichtung im Zeitraum 2015–2018 im Vergleich zu den anderen Standorten der Walddauerbeobachtung eher tief. Eine Ausnahme sind die Fichten am Standort Grosswangen, die sich in einem sehr schlechten Zustand befinden. Nur an vier weiteren von insgesamt 79 Fichtenstandorten der Walddauerbeobachtung, wird eine ähnlich hohe Kronenverlichtung beobachtet. Als Ursache dafür kann der sehr basenarme Boden vermutet werden.

Bodenversauerung an einzelnen Standorten

Die Böden der Zentralschweizer Beobachtungsstandorte weisen unterschiedliche Eigenschaften auf und reagieren entsprechend anders auf Versauerungsprozesse. Die Ausgangssubstrate reichen vom reinen Kalkstandort bis zur basenarmen Moräne. Böden mit einem mittleren pH-Wert (von 4,5 bis etwa 6) wie auf der basenarmen Moräne verfügen über eine geringere Kapazität, um Säuren zu puffern; sie sind entsprechend anfälliger für Versauerung.

Als Indikator für die Versauerung dient das Verhältnis zwischen der Konzentration von basischen Kationen (Ca, Mg, K) und Aluminium (BC/Al-Verhältnis) in der Bodenlösung. Je tiefer dieses Verhältnis, umso stärker die Versauerung. Böden mit einem BC/Al-Verhältnis von weniger als 7 werden in der Schweiz hinsichtlich der Versauerung als problematisch eingestuft. Entsprechend den jeweiligen Bodenverhältnissen weist das BC/Al-Verhältnis eine grosse Variation nach Standorten auf (vgl. Abb. 19). Da natürliche und anthropogen bedingte Versauerung zunächst den Oberboden (0–30 cm) betreffen sind pH-Wert und BC/Al-Verhältnis im Unterboden (> 30 cm) in der Regel viel höher als in den oberen Horizonten. Eine Aus-

Indikator für Versauerung (BC/Al-Verhältnis)

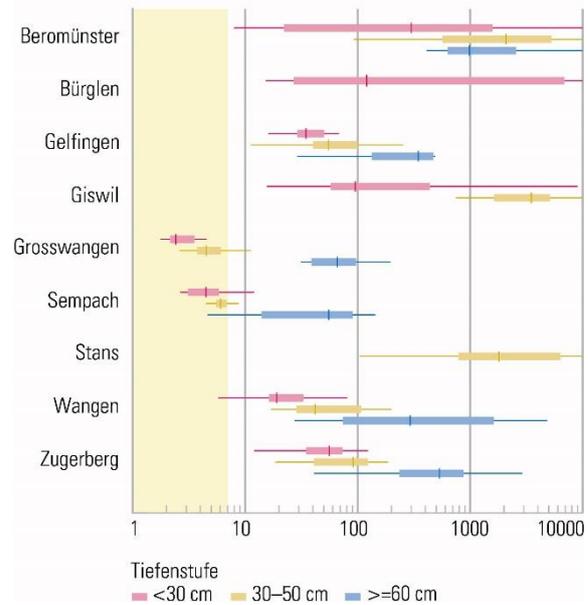


Abb. 19: Verhältnis von basischen Kationen (Ca, Mg, K) zu Aluminiumionen in der Bodenlösung (BC/Al-Verhältnis) an den Zentralschweizer Standorten der Walddauerbeobachtung 2015, unterteilt nach Tiefenstufen: An den Standorten Grosswangen und Sempach unterschreitet das BC/Al-Verhältnis im Wurzelraum den kritischen Wert für Bodenversauerung (gelber Bereich: bezüglich Bodenversauerung kritische Werte)

nahme diesbezüglich bildet der Standort Beromünster, wo der Boden chemisch sehr heterogen ist. Auch am Standort Bürglen ist die Spannweite der gemessenen BC/Al-Verhältnisse sehr gross. An beiden Standorten sinken sie jedoch nie unter den kritischen Wert von 7. An den Standorten Grosswangen und Sempach unterschreitet das BC/Al-Verhältnis im Wurzelraum dagegen den kritischen Wert für Bodenversauerung, während es im Unterboden höher ist. Am Standort Sempach ist dieser Befund etwas überraschend, da Kalk bereits in 80 cm Tiefe ansteht. Kalkstandorte wie Stans und Giswil sind für Versauerung nicht anfällig.

Nitratgehalte und Nitratauswaschung

In nichtbelasteten Ökosystemen ist Stickstoff ein Mangellement. Alles freie Nitrat wird von den Pflanzen schnell aufgenommen. Nitrat in der Bodenlösung weist entsprechend auf eine erhöhte Stickstoffbelastung hin. Bei einer Konzentration von Nitratstickstoff in der Bodenlösung von über 0,2 mg/l sind Vegetationsveränderungen zu erwarten.¹²

Wie das BC/Al-Verhältnis ist auch die Konzentration von Nitratstickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) in der Bodenlösung sehr variabel (vgl. Abb. 20). Mit Ausnahme des Standorts Grosswangen sind die Nitratkonzentrationen im Oberboden sehr hoch. Mit zunehmender Tiefe nehmen sie an den Standorten Gelfingen, Wangen und Zugerberg stark ab. Dies lässt sich durch die Stickstoffaufnahme durch Pflanzen in den oberen Schichten erklären und eventuell durch die Umwandlung zu molekularem Stickstoff (N_2) oder Stickoxiden (NO_x ; Denitrifikation) innerhalb des Bodenprofils. An den Standorten Stans, Bürglen und Giswil ist aufgrund zu vieler Steine eine Messung in grösserer Tiefe nicht möglich.

Wird Nitrat von der Vegetation nicht aufgenommen, kann es ausgewaschen werden. Eine Nitrat auswaschung von mehr als $2 \text{ kg N/ha}^* \text{a}$ in höheren Lagen beziehungsweise über $4 \text{ kg N/ha}^* \text{a}$ in Tieflagen gilt als Zeichen einer übermässigen Stickstoffbelastung. Entsprechend den unterschiedlichen Nitratkonzentrationen in der jeweils tiefsten Bodenschicht sind auch die Auswaschungsraten (vgl. Abb. 21) sehr unterschiedlich. Am höchsten sind sie am Standort Stans. Die Frachtberechnung an diesem Standort wie auch in Giswil und Bürglen basiert wegen der vielen Steine allerdings auf Konzentrationen in 30 cm Tiefe. Eine tiefe Nitrat auswaschung bedeutet jedoch keineswegs, dass die Standorte unbelastet sind. So betragen an den drei Standorten Gelfingen, Grosswangen und Wangen mit geringer Auswaschung die modellierten Eintragsraten 38 , 51 beziehungsweise $32 \text{ kg N/ha}^* \text{a}$ (vgl. Tabelle 1). Sie liegen damit deutlich über dem ökologisch unbedenklichen Wert von $10\text{--}20 \text{ kg/ha}^* \text{a}$ für Buchen-, beziehungsweise $5\text{--}15 \text{ kg/ha}^* \text{a}$ für Nadelwald.

Die Nitratfrachten in den beiden Messjahren 2017 und 2018 unterscheiden sich wesentlich. Die tiefen Frachten 2018 waren vor allem Folge der herrschenden Trockenheit in diesem Jahr.

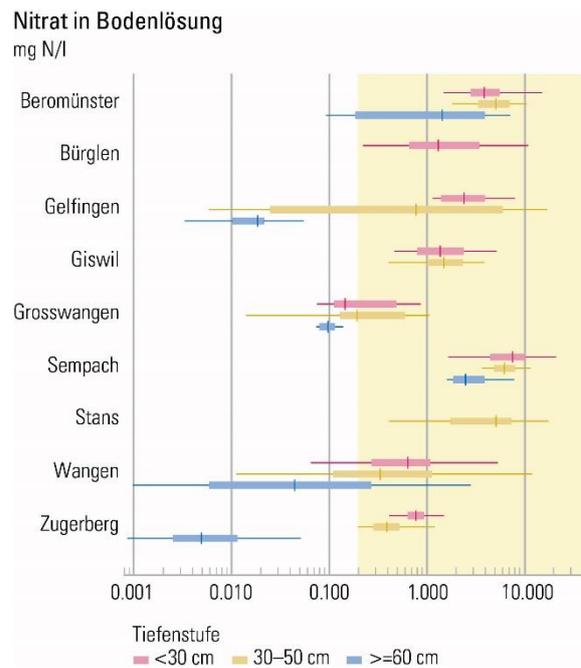


Abb. 20: Konzentration von Nitratstickstoff ($\text{NO}_3\text{-N}$) in der Bodenlösung der Zentralschweizer Flächen in den Jahren 2017 und 2018, unterteilt nach Tiefenstufen: An allen Zentralschweizer Standorten liegen die Nitratwerte in den oberen Bodenschichten (bis 50 cm Tiefe) über einer für die Vegetation kritischen Schwelle (gelber Bereich: Grenzwert für Vegetationsveränderungen nach UNECE überschritten).

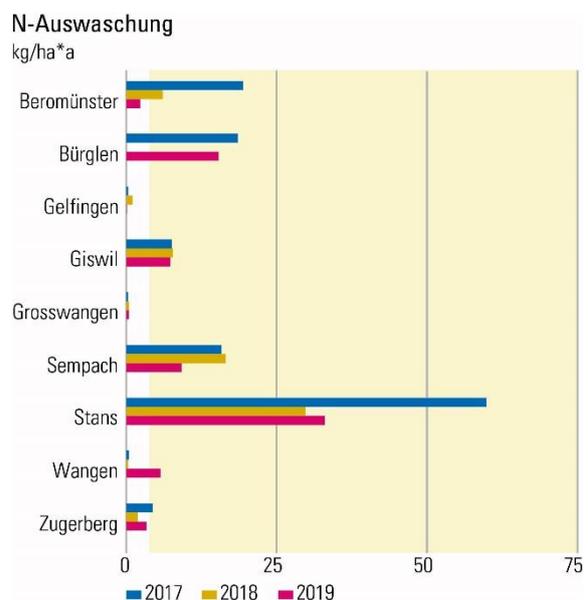


Abb. 21: Stickstoffauswaschung aus dem Boden auf den Zentralschweizer Beobachtungsflächen in den Jahren 2017 und 2019: Die Nitrat auswaschung überschreitet an mehreren der Zentralschweizer Standorte den kritischen Wert von 2 bzw. $4 \text{ kg N/ha}^* \text{a}$ (gelbe Fläche: übermässige Stickstoffbelastung), auf manchen um ein Mehrfaches (vgl. Tabelle 1).

Standort	Nitratkonzentration 2017–2019			Auswaschung 2017–2019	Eintrag 1981–2019
	≤ 30 cm	> 30–60 cm	> 60 cm		
Einheit	mg N/l	mg N/l	mg N/l	kg N/ha*a	kg N/ha*a
Beromünster	5,5	7,66	3,02	9,3	81,2
Bürglen	2,48			17	31,5
Gelfingen	2,71	3,42	0,2	0,5	37,6
Giswil	1,7			7,6	28,2
Grosswangen	0,26	0,31	0,09	0,4	51,6
Sempach	7,94	6,89	3,77	13,9	50,2
Stans	6,25			40,9	28,3
Wangen	1,42	0,85		2,2	32,5
Zugerberg	0,78	0,391	0,04	3,3	26,7

Tabelle 1: Medianwerte der Nitratkonzentrationen in verschiedenen Bodentiefen, berechnete Nitratauswaschung, modellierte Stickstoffdeposition und Bewertung nach den Kriterien der UNECE. Für die Bewertung der Konzentration wurden nur die oberen beiden Tiefen, d.h. der Hauptwurzelraum, berücksichtigt. Gelb: Überschreitung kritischer Werte.

Fehlende Regenwürmer

Die bodenchemischen Bedingungen beeinflussen direkt die Lebensbedingungen der Bodenlebewesen. Dies gilt auch für Regenwürmer, die stark auf die Säureverhältnisse (pH-Wert) im Boden reagieren. Die verschiedenen Regenwurmtypen verhalten sich dabei unterschiedlich. Sogenannte Horizontalbohrer bevorzugen leicht andere pH-Verhältnisse als Vertikalbohrer, die für die senkrechten Röhren sorgen und

damit für die Durchlüftung und den Bodenwasserhaushalt eine zentrale Rolle spielen. Bei einem pH-Wert von weniger als 3,5 können jedoch beide für die Bodendurchmischung wichtigen Regenwurmtypen nicht mehr existieren. Streubewohner dagegen kommen in allen Säureumgebungen vor.

Am Standort Bürglen kommen Streubewohner auch im schweizweiten Vergleich gehäuft vor (vgl. Abb. 22). Gar keine Regenwürmer sind hingegen an den beiden Standorten Grosswangen und Sempach zu finden. An beiden Standorten ist der Oberboden versauert, im Falle des Standorts Grosswangen ist die Versauerung tiefgründig.

Die Absenz bestimmter oder gar aller Regenwurmtypen hat erhebliche Auswirkungen auf die Bodenqualität: Der Streuabbau erfolgt langsamer, es fehlt die Bodendurchmischung, der Gas- und Wasserhaushalt ist gestört und der Boden ist anfälliger für Nährstoffverluste.

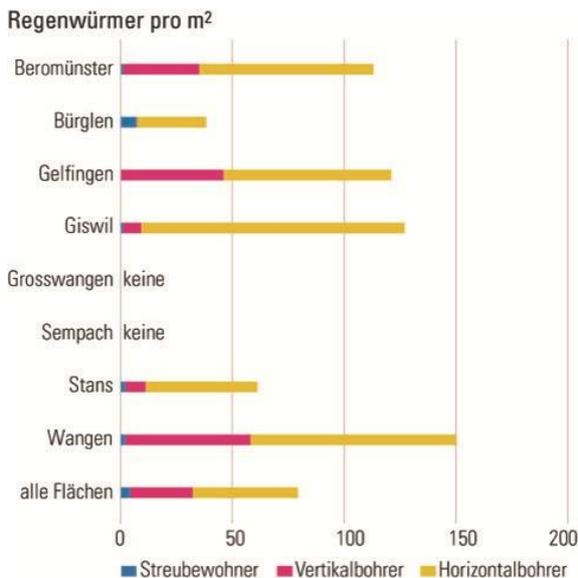


Abb. 22: Anzahl Regenwürmer pro Quadratmeter an den Zentralschweizer Standorten der Walddauerbeobachtung: Bei sauren Bodenverhältnissen finden bestimmte Arten von Regenwürmern keine geeigneten Lebensverhältnisse mehr. Dies betrifft insbesondere Regenwürmer vom Typ «Vertikalbohrer», die für eine gute Durchlüftung und den Wasserhaushalt, aber auch für die Durchmischung des Bodens wichtig sind. An den Standorten «Grosswangen» und «Sempach» sind gar keine Regenwürmer mehr zu finden.

4. Massnahmen umsetzen – Entwicklung beobachten

Die Walddauerbeobachtung in der Zentralschweiz ist noch jung, so dass sich noch keine verlässlichen zeitlichen Entwicklungen darstellen lassen. Die bis heute vorliegenden Ergebnisse erlauben aber eine erste Zwischenbilanz und – dank der gesamtschweizerisch angelegten Studie – eine erste Einordnung in den gesamtschweizerischen Kontext. Insgesamt stellt die Walddauerbeobachtung ein einzigartiges, regionenübergreifendes Frühwarnsystem für das «Ökosystem Wald» dar

Die Ergebnisse bestätigen die Situation in Teilen der Zentralschweiz in Bezug auf die hohen Stickstoffbelastungen durch die Landwirtschaft, die weit über dem gesamtschweizerischen Durchschnitt liegen, und deren vielfältigen Auswirkungen auf die Waldökosysteme wie Kronenverlichtung der Bäume, Schädigung des Feinwurzelsystems, Veränderung der Mykorrhiza, Ausbreitung der Brombeere oder die Absenz von Regenwürmern. Die gleichzeitige Beobachtung der Schadstoffwirkungen und der Einflüsse des Klimawandels hat bereits jetzt die äusserst starken Wechselwirkungen veranschaulicht und aufgezeigt, dass insbesondere Bäume mit ausgesprochenen Nährstoffungleichgewichten für extreme Klimaverhältnisse wie Trockenheit und hohe Temperaturen besonders anfällig sind. Sie zeigt auch im Detail auf, wie sich die Klimaerwärmung auf die Vitalität beziehungsweise die Mortalität der einzelnen Baumarten auswirkt.

Die gesamtschweizerischen Untersuchungen zeigen, dass sich die Lebensbedingungen für den Wald zunehmend verschlechtern. Ohne Massnahmen wie das Vermeiden grosser Verjüngungsflächen, eine naturnahe Waldbewirtschaftung, der Einsatz tiefwurzelnder Baumarten oder von Baumarten, die die Nährstoffumsetzung beschleunigen, wird die Widerstandskraft der Bäume langfristig schwinden. Die Waldwirtschaft kann dabei allerdings nur Symptome bekämpfen, aber keine Ursachen beheben.

Es gilt deshalb Massnahmen zur Stickstoffreduktion und zum Klimaschutz umzusetzen und zu verstärken. Die Walddauerbeobachtung ist dabei im Sinne der Erfolgskontrolle weiterzuführen. Die Messungen und die Analyse der Bodenlösungen erweisen sich als wertvolles Mittel, die zeitlichen Verläufe chemischer Parameter am gleichen Standort mit minimaler Störung des Ökosystems zu verfolgen. Sie liefern nicht nur Informationen über den aktuellen Status, sondern auch über die Dynamik der Bodenversauerung.

Zitierte Literatur

- ¹ Braun S. et al. (2018): Wie geht es unserem Wald – 34 Jahre Waldbeobachtung, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch, www.iap.ch/waldbericht.html
- ² Braun S. (2018): Untersuchungen über die Zusammensetzung der Bodenlösung. 2013–2017, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie Schönenbuch, www.bafu.admin.ch/wald
- ³ Braun S. et al. (2005): *Environmental Pollution* 137, 574–579.
- ⁴ Braun S. et al. (2003): *Water, Air & Soil Pollution* 142, 327–340.
- ⁵ Spiecker H. et al. (1996): *Growth Trends in European Forests*, Springer Verlag, New York.
- ⁶ Göttlein A. et al. (2011). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182, 173-186.
- ⁷ Braun S., Schindler C., Rihm B. (2020): *Frontiers in Forests and Global Change*.
- ⁸ Remund J. et al. (2016): In: *Wald im Klimawandel*, Hg.: Pluess A.R., Augustin S., Brang P., Haupt, Bern, 23–37.
- ⁹ de Witte L. C. et al. (2017): *Science of the Total Environment*, 605–606, 1083–1096.
- ¹⁰ Brodribb T.J., Cochard H. (2009): *Plant Physiology* 149, 575–584.
- ¹¹ Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) (Hg., 2019/2020): *Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL)*.
- ¹² 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.*

Anhang 1: Die Zentralschweizer Untersuchungsstandorte

Standort	Abkürzung	Meereshöhe (m)	pH(CaCl ₂) 0–40 cm	Basensättigung 0–40 cm	CN	Verwitterungsrate (keq/ha*y)	Niederschlag 2005–2019 (mm/y)	Sickerwasseremenge 1981-2019 (mm)	Bodentyp	Vegetationseinheit
Beromünster	BE	640	5.00	84	23	7.1	1219	326	Gley-Braunerde	8a, 8* Typ. Waldhirschen-Buchenwald, z.B. mit Rippenfarn
Bürglen	BUR	640	4.77	99	22	0.4	1582	789	Braunerde-Regosol	10abl(w) Lungenkraut-Buchenwald mit Immenblatt auf Block, z.T. Ausbildung mit Schläffer Segge
Gelfingen	GE	540	6.46	100	22	1.6	1133	408	Parabraunerde-Braunerde	7e(f), 7a Typ. Waldmeister-Buchenwald, z. T. mit Hornstrauch (mit Lungenkraut)
Giswil	GI	540	5.86	100	20	11	1302	485	Braunerde	9* Lungenkraut-Buchenwald mit Weisssegge
Grosswangen	GW	600	3.52	13	22	1.3	1111	293	Parabraunerde-Pseudogley	7d Typ. Waldmeister-Buchenwald mit Hainsimse
Sempach	SE	550	3.71	26	22	2.3	1136	327	Parabraunerde-Gley	7aa, 7aS Waldmeister-Buchenwald, z.T. artenarm, z.T. mit Wald-Ziest
Stans	ST	560	6.40	100	17	28	1442	952	Braunerde	9(13), 13 Typ. Lungenkraut-Buchenwald (Linden-Zahnwurz-Buchenwald)
Wangen SZ	WSZ	470	4.43	93	15	1.8	1534	594	Parabraunerde	7aa, 7a Typ. Waldmeister-Buchenwald, artenarme Ausbildung
Zugerberg	ZBB	980	4.06	59	20	0.6	1565	879	Braunerde	8aaR(18) Typ. Waldhirschen-Buchenwald, artenarme Ausbildung mit Brombeere

Anhang 2: Die Zentralschweizer Untersuchungsstandorte

Standortinstallation

- Standorteigenschaften (Höhe, Exposition)
- Bodentyp
- Bodenphysik (Wasserhaushalt)
- Regenwurmpopulation
- Kronenprojektion

Waldbeobachtung

- | | | |
|------------------|--|--|
| Jährlich | <ul style="list-style-type: none">- Kronenverlichtung- Kronenverfärbung | <ul style="list-style-type: none">- Fruktifikation (Fichten)- Parasitenbefall |
| Alle 4 Jahre | <ul style="list-style-type: none">- Stammzuwachs- Triebzuwachs- Fruktifikation (Buchen)- Nährstoffstatus in Laub/Nadeln (N, P, K, Ca, Mg, Mn) | <ul style="list-style-type: none">- O₃-Schädigungen am Laub- Parasiten an Zweigen- Verfärbungen Laub/Nadeln |
| Alle 8-10 Jahre | <ul style="list-style-type: none">- Bodenchemie (pH, Basensättigung, P) | <ul style="list-style-type: none">- Vollkluppierung- Baumhöhe |
| Alle 15-20 Jahre | <ul style="list-style-type: none">- Bodenvegetation- Jungwuchs | <ul style="list-style-type: none">- Verbiss |

Modelle

- | | | |
|--------------|--|---|
| Alle Flächen | <ul style="list-style-type: none">- Modellierung N-Deposition (BAFU)- hydrologische Modell (Trockenheit, Wasserhaushalt)- Modellierung dynamische Modelle, Versauerungsdynamik (BAFU finanziert) | <ul style="list-style-type: none">- Modellierung O₃-Belastung (BAFU) |
|--------------|--|---|

Permanente spezifische Untersuchungen an Flächen mit Bodenlösung

- Monatlich: Chemische Eigenschaften der Bodenlösung (teils BAFU-finanziert, ca. 700 Lysimeter):
 - Leitfähigkeit, pH, Alkalinität
 - Ca, Mg, Mn, K, Na
 - Al (organisch und anorganisch)
 - NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻
 - DOC (photometrisch λ=254 und 280nm)

Ausgewählte Flächen

- Dynamische Entwicklung der Bodenchemie (Modell SAFE)
- Messung Bodenwassergehalt und Bodenwasserpotential
- Nährstoffrecycling in der Laubstreu