

# Pilotprojekt Experimentelle Kalkung von Waldstandorten: Hintergrund und erste Ergebnisse

Simon Tresch, Sven Hopf und Sabine Braun

Institut für angewandte Pflanzenbiologie AG, Benkenstrasse 254a, CH-4108 Witterswil  
simon.tresch@iap.ch, sven.hopf@iap.ch, sabine.braun@iap.ch

**Die zu hohe Stickstoffemission zählt neben dem Klimawandel weltweit zu den grössten ökologischen Problemen mit schwerwiegenden Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme. In der Schweiz werden auf knapp 90 % der Waldfläche die kritischen Eintragsraten überschritten. Langzeituntersuchungen zum Bodensickerwasser des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms (WDB) belegen, dass die Bodenversauerung weiter voranschreitet. Um dieser entgegenzuwirken, wird nun in einem Pilotprojekt untersucht, was eine einmalige Kalkung (3 t/ha) von drei stark versauerten Waldbeständen mit Tannen, Buchen und Fichten bewirkt und wie lange es braucht, bis sich die Böden und Bestände erholen. Erste Ergebnisse zeigen eine Wirkung des Dolomitskalkes in den oberen Bodenschichten (bis 20 cm) 1,5 Jahre nach der Kalkung. Die Weiterführung des Experiments wird zeigen, wie sich die Bodenschutzkalkung auf die Bodenchemie und die Baumvitalitätsparameter auswirken wird.**

## 1 Ausgangslage

### 1.1 Auswirkungen einer zu hohen N-Deposition

Anthropogene Einwirkungen haben im Verlauf des 20. Jahrhunderts Stoffkreisläufe von Ökosystemen massgeblich beeinflusst (STEFFEN *et al.* 2015). Durch die Industrialisierung, die Intensivierung der Landwirtschaft, das zunehmende Verkehrsaufkommen sowie den steigenden Energieverbrauch stiegen die Emissionen von Luftschadstoffen bis Ende der 1980er-Jahre in der Schweiz an. Die in der Folge ergriffenen Luftreinhaltmassnahmen führten zu einer markanten Abnahme der Emissionen von SO<sub>2</sub>-S und NO<sub>x</sub>-N (AUGUSTIN und ACHERMANN 2012). Die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft stagnieren jedoch immer noch auf sehr hohem Niveau. So wird der kritische Wert für N-Deposition auf fast 90 % der Schweizer Waldflächen überschritten (RIHM und KÜNZLE 2019). Im Durchschnitt werden ca. 20 kg Stickstoff pro ha und Jahr in die Schweizer Wälder eingetragen, in den stark landwirtschaftlich geprägten Regionen sind es wesentlich mehr (>60 kg pro ha und Jahr). Die natürlichen Stickstoffeinträge lägen bei ca. 2 bis 3 kg pro ha und Jahr (BUTTERBACH-

BAHL *et al.* 2011). Diese hohen Stickstoffeinträge wirken langfristig schädlich auf Ökosysteme und führen zu Eutrophierung und beschleunigter Bodenversauerung (EKL 2022; BOBBINK *et al.* 2022).

Stickstoff steigert durch seine düngende Wirkung zunächst das Baumwachstum, bei zu hohen Einträgen nimmt es jedoch wieder ab (BRAUN *et al.* 2017; ETZOLD *et al.* 2020). Gleichzeitig wird der Nährstoffhaushalt von Wald und Bäumen durcheinandergebracht, andere Nährstoffe geraten in den Mangelbereich. Dies geschieht entweder direkt, da zu viel Stickstoff aufgenommen wird, oder indirekt, da die für die Nährstoffaufnahme wichtigen Mykorrhizapilze gehemmt werden oder die Böden durch die Versauerung wichtige Nährelemente verlieren.

Die Bodenversauerung ist Teil einer natürlichen Pedogenese, welche sehr langsam abläuft. Die natürlichen Säurequellen kommen von der Kohlensäure aus der Wurzelatmung und von der Streuzersetzung. Mit dem Eintrag von anthropogen verursachten Schwefel- und Stickstoffverbindungen wurde die Bodenversauerung um ein Vielfaches beschleunigt. Dies kann zu einer Überschreitung des Puffervermögens von Waldböden führen. Diese zusätzliche Versauerung des Bo-

dens erfolgt sowohl durch den direkten Eintrag von starken Säuren wie Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) und Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>), welche vorwiegend aus anthropogenen Quellen (Verbrennungsprozesse und Landwirtschaft) stammen, als auch vorwiegend durch die Auswaschung von überschüssigem Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (AMELUNG *et al.* 2018). Für Nitrat gibt es keinen «Speicher» im Boden, es verbindet sich in der Bodenlösung mit positiv geladenen Kationen und wird aus dem Boden ausgewaschen. Bei hohen pH-Werten sind dies die Nährelemente Ca, Mg und K. Diese wertvollen Mineralstoffe gehen so verloren. Sinkt der pH weiter, so werden Mn und Al mobilisiert und mit dem Nitrat ausgewaschen (ULRICH 1986). Der Verlust von Nährstoffen durch die Auswaschung und eine erschwerte Nährstoffaufnahme infolge Beeinträchtigung der Mykorrhizapilze (DE WITTE *et al.* 2017; VAN DER LINDE *et al.* 2018) führt zu Nährstoffungleichgewichten mit negativen Auswirkungen auf das Bestandeswachstum (BOBBINK *et al.* 2022; BRAUN *et al.* 2017; ETZOLD *et al.* 2020) und zu verminderter Resistenz gegenüber Pathogenen, Insekten und Trockenheit. Weitere Auswirkungen der reaktiven Stickstoffverbindungen sind erhöhte Feinstaubwerte in der Luft, die Verdrängung der Waldvegetation durch stickstoffliebende Pflanzen (Holunder, Brennesseln, Brombeeren), Nitrat im Trinkwasser, und nicht zuletzt die Wirkung von Stickoxiden, welche bei der Denitrifizierung frei werden, als Treibhausgas (N<sub>2</sub>O) und als Vorstufe der Ozonbildung in der Troposphäre (NO<sub>x</sub>; HAMACHER *et al.* 2021).

Da der reaktive Stickstoff vielfältig auf alle Bereiche der Umwelt wirkt, spricht man auch von der Stickstoffkaskade (GALLOWAY *et al.* 2003). Diese wird vor allem durch die Deposition von reaktivem Stickstoff angetrieben.

Aktuell ist in der Schweiz der Stickstoff für 92 % der versauernden Wirkung von Luftschadstoffeinträgen verantwortlich (Pers. Mitteilung Meteotest 2022). Der Anteil des Schwefels an der Versauerung spielte in den 1970er und 1980er Jahren eine grössere Rolle. Es wurden daher Massnahmen zur Emissionsminderung ergriffen, um die negativen Auswirkungen der Einträge zu mindern. In vielen Ländern wurden infolge hoher Säurebelastung stark versauerte Waldstandorte gekalkt. In Deutschland wurden seit 1984 drei Millionen Hektaren Wald gekalkt, was rund einem Drittel der Waldfläche entspricht (BMELV 2009). In der Schweiz wurde bislang keine Bodenschutzkalkung im Wald durchgeführt, denn gemäss Waldgesetz dürfen keine Stoffe in den Wald ausgebracht werden.

## 1.2 Ziele und Wirkung einer Bodenschutzkalkung

Im Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats von Siebenthal (Po. 13.4201) «Optionen zur Kompensation der Versauerung von Waldböden und zur Verbesserung der Nährstoffsituation von Wäldern – Darstellung und Bewertung» (Schweizerischer Bundesrat 2017) werden Massnahmen zur Kompensation der Versauerung von Waldböden und zur Verbesserung der Nährstoffsituation von Wäldern formuliert. Als prioritär wird dabei die Reduktion der Emissionen an der Quelle angesehen. Weiterhin sind waldbauliche Massnahmen zur Stabilisierung der Nährstoffkreisläufe für jene Standorte genannt, bei denen nur der Oberboden von Nährstoffentzug und Versauerung in geringem Masse betroffen ist, im Unterboden aber noch basenreiche Horizonte anstehen, die für Pflanzen erreichbar sind. Die Kalkung sollte für solche Standorte geprüft werden, bei denen die anderen Massnahmen keinen Erfolg versprechen, d.h. die tiefgründig versauert sind und als sanierungsbedürftig gelten. Zur Definition der Kalkungsbedürftigkeit wurde ein Workshop mit internationaler Beteiligung durchgeführt (BAFU 2017).

Folgende Ziele werden mit der Kalkung sanierungsbedürftiger Standorte angestrebt:

- Anhebung des pH-Wertes, dadurch Anregung des Bodenlebens und Vertiefung des Wurzelraums
- Einarbeitung von organischer Substanz in den Mineralboden
- Erhöhung der Basensättigung im Wurzelraum
- Kompensation von Nährstoffverlusten
- Neutralisierung der aktuellen Säureinträge
- Verbesserung der Magnesium-, Kalium- und Phosphorversorgung der Bäume

Bei einer Bodenschutzkalkung mit Dolomitskalk werden in der Bodenlösung  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  freigesetzt. Dies ist wegen der langsamen Auflösung des Dolomit eine langfristig verfügbare Nährstoffquelle, welche die Basensättigung des Bodens erhöht und somit Nährstoffverluste kompensiert (GREVE *et al.* 2021; PERSSON und AHLSTRÖM 1990). Das bei der Lösung entstehende  $\text{HCO}_3^-$  erhöht die Alkalinität der Bodenlösung und wirkt zusätzlich puffernd (SVERDRUP und WARFVINGE 1993). Somit können Säureinträge neutralisiert werden (DEROME 1990; GREVE *et al.* 2021). Es kann davon ausgegangen werden, dass – je nach Ausbringungsmenge und Ausgangslage – zumindest in den oberen Bodenhorizonten der pH-Wert erhöht wird (HUBER *et al.* 2006), das Bodenleben angeregt wird und damit auch organische Substanz durch Bioturbation in tiefere Bodenhorizonte eingearbeitet wird (NILSSON *et al.* 2001; PERSSON *et al.* 2021). Die verbesserte Bodenqualität sollte dann auch eine bessere Nährstoffversorgung der Bäume mit sich bringen (HUBER *et al.* 2006; PERSSON und AHLSTRÖM 1990).

Die Wirkungen einer Kalkung hängen vom Kalkungssubstrat und dessen Dosierung ab, sowie von der Depositionsgeschichte, der Bodenchemie und dem Klima (PERSSON *et al.* 2021; PUHLMANN *et al.* 2021). Langfristige Kalkungsversuche in Baden-Württemberg zeigen die standortspezifischen Auswirkungen auf Boden, Bodenlösung und Biodiversität (Pflanzen und Tiere). Auf einer Mehrheit der Untersuchungsflächen hat sich der Bodenzustand des Oberbodens verbessert, indem der pH-Wert, die Basensättigung und die Säureneutralisationskapazität gestiegen sind. Effekte zeigten sich auch in der Bodenvegetation, bei welcher der Deckungs-

grad und die Artenzahl erhöht waren, und in der Biodiversität im Boden, mit positiven Effekten der Kalkung auf die epigäische (flachgrabenden) Regenwurmpopulationen. Bodenschutzkalkungen können sich somit auch positiv auf Bodenfunktionen wie die Filter- und Pufferfunktion von Waldböden auswirken, durch die reduzierte Löslichkeit von Nitrat oder toxischen Verbindungen wie Aluminium in der Bodenlösung (PUHLMANN *et al.* 2021).

Weniger klar sind die Effekte auf die Bodenfunktionen Kohlenstoffspeicherung und Lebensraumfunktion (COURT *et al.* 2018; PUHLMANN *et al.* 2021). Auch die Effekte auf das Baumwachstum sind sehr standortabhängig, so wurde ein reduziertes (NILSEN 2001), unverändertes (BØRJA und NILSEN 2009) oder gar erhöhtes Baumwachstum (MAINWARING *et al.* 2014) nachgewiesen. Die Baumernährung und -vitalität sollte jedoch durch den Einsatz von Dolomitskalk verbessert werden durch den Nachschub an Calcium und Magnesium (PUHLMANN *et al.* 2021).

## 2 Pilotprojekt in der Schweiz: Experimentelle Kalkung von Waldstandorten

### 2.1 Auswahl der Untersuchungsstandorte

Die Standortwahl erfolgte nach den im Workshop «Kriterien der Kalkungsbedürftigkeit» definierten Kriterien (BAFU 2017). Es wurden tiefgründig versauerte Waldstandorte ausgewählt. Eine erste Vorauswahl wurde mithilfe von geologischen und pflanzensoziologischen Karten getroffen. In einem zweiten Schritt wurden an den Standorten der engeren Auswahl Bodenproben entnommen und die Tiefenverteilung der Basensättigung gemessen. Angestrebt wurde eine räumlich möglichst homogene Verteilung der bodenchemischen Parameter und eine niedrige Basensättigung über das ganze Bodenprofil hinweg und ein homogener Baumbestand (Baumholz). Ausgesucht wurden je eine Fläche mit einem Tannenbestand in Buswil bei Melchnau (BE), eine Buchenfläche bei Bachs (ZH) und eine Fichtenfläche bei Menzingen (ZG), siehe Tabelle 1. Die Einrichtung

gen sind in Tabelle 2 beschrieben und in Abbildung 1 und 2 exemplarisch dargestellt. Auf den Untersuchungsflächen werden eine Vielzahl von Informationen erhoben (vgl. Tab. 2).

## 2.2 Einrichtung der Untersuchungsflächen

Jede Untersuchungsfläche wurde in 8 Parzellen unterteilt, jeweils 4 gekalkt und 4 zur Kontrolle ohne Kalkung. Vor der Kalkung wurden Bodenproben gesammelt und Bodenprofile erstellt für die Bodenansprachen. Zudem wurden Bodenfeuchtesonden und Lysimeter für das Bodenwassersampling (12 Lysimeter in 2 verschiedenen Tiefen pro Parzelle) installiert (Abb. 1). Der interne Nährstoffkreislauf wird durch Laubsammler (1 × pro Parzelle) untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf der zeitlich hochaufgelösten Überwachung der Ele-

mentkonzentrationen und Elementtransporten im Bodensickerwasser. Die weiteren Aufnahmen sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Bodenschutzkalkung wurde mit 3 t/ha Dolomitkalk unter der Mithilfe der lokalen Forstbetriebe im Winter 2020 von Hand ausgebracht (Abb. 2). Der Dolomitkalk beinhaltet 80 % CaCO<sub>3</sub> und 10 % MgCO<sub>3</sub> (Düngkalk 80/10 granuliert, Landor).

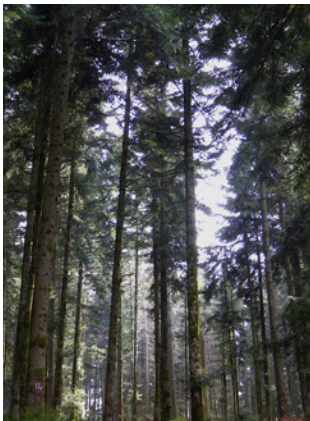


## 3 Erste Ergebnisse

### 3.1 Wirkung der Kalkung in der Bodenlösung

Nach einer Bodenschutzkalkung kann davon ausgegangen werden, dass die Effekte zuerst in der Bodenlösung sichtbar sind. Eines der Ziele dieses Projektes ist es, die Auswirkungen in der Bodenlösung zeitlich hochaufge-

löst (monatliches Sampling) zu dokumentieren. Die ersten Auswertungen zeigen, dass sich die Bodenlösung erst 1,5 Jahre nach der Kalkung zu verändern beginnt. Die Behandlung wirkt sich unterschiedlich schnell auf den Boden aus, je nach Baumart und Standorteigenschaften. So sehen wir im Fichtenbestand in Menzingen (ZG) mit dem höchsten Jahresniederschlag für 2021 (2003 mm) durch die Bodenschutzkalkung einen Trend hin zu höheren Mg<sup>2+</sup>- und Ca<sup>2+</sup>-Werten in der Bodenlösung. Dies führt zu höheren BC/Al-Werten und einer tieferen Azidität. Interessanterweise sind die Effekte in 60 cm Bodentiefe noch genau gegenteilig zu dem, was in 20 cm Bodentiefe gemessen wurde. Daraus könnte man schliessen, dass an diesem Standort die Bodenschutzkalkung nach 1,5 Jahren noch nicht in dieser Bodentiefe angekommen ist. Für den Buchenstandort in Bachs (ZH) mit 1077 mm Nieder-

Tab. 1. Übersicht der Standortinformationen. Niederschlag und Trockenheitsindikatoren der Vegetationsperiode (SWBmin: minimale Standortwasserbilanz und ETa/ETp: aktuelle / potentielle Evapotranspiration) wurden mit dem hydrologischen Modell WaSiM-ETH (SCHULLA 2019) für das Jahr 2021 und als Mittelwert für die Jahre 2000–2020 berechnet. Der pH-Wert (gemessen in CaCl<sub>2</sub>) und die Basensättigung sind berechnet für 0–40 cm Bodentiefe. Die modellierten N-Depositionen (Nass- und Trockendeposition) wurden gemäss RHM und KÜNZLE (2019) für das Jahr 2015 berechnet. Fotos: © Simon Tresch, IAP.

Untersuchungsfläche	Busswil (BE)	Bachs (ZH)	Menzingen (ZG)
			
Baumart	Tanne	Buche	Fichte
Waldgesellschaft	8*	6,1	8*, 8a
Höhe (m.ü.M.)	626	600	988
Jahresniederschlag 2021 (mm)	1282	1077	2003
Niederschlag Vegetationsperiode 2021 (mm)	797	702	1165
Jahresniederschlag Mittel 2000–2020	1151	1111	1848
SWBmin (mm) 2021	32	22	144
SWBmin Mittel (mm) 2000–2020	-127	-147	92
ETa/ETp 2021	0,91	0,90	0,93
ETa/ETp Mittel 2000–2020	0,85	0,89	0,92
pH-Bodenfestphase	3,9	4,1	3,8
Basensättigung (%)	6,5	9,8	18,0
N-Deposition (kg ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )	31,8	20,3	24,8



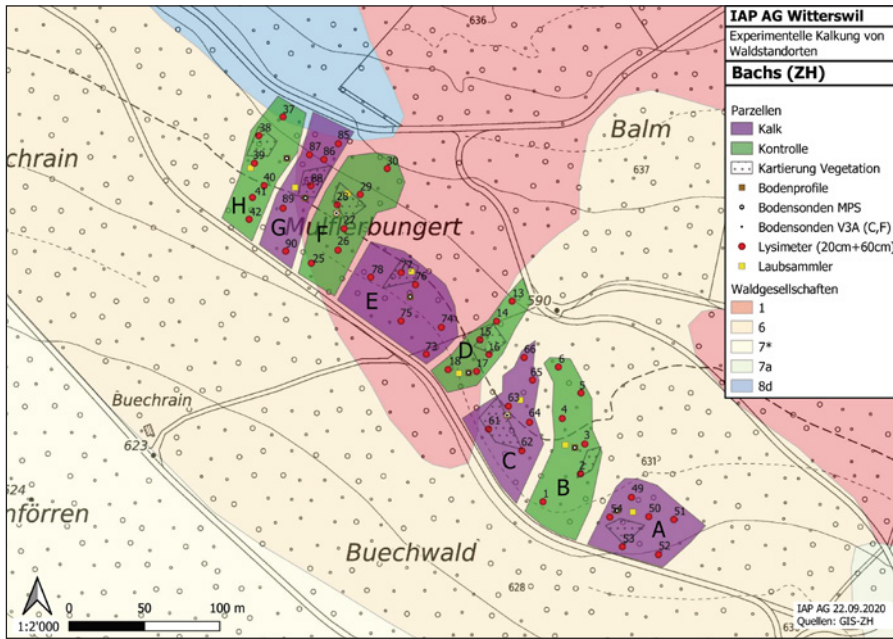


Abb. 1. Einrichtungen in den Untersuchungsflächen anhand des Beispiels der Buchenfläche in Bachs (ZH), eingezeichnet in die pflanzensoziologische Karte des Kantons Zürich. Die zwei Farben der 8 Parzellen stellen die Behandlung dar. Das Bodenwasser wird an den 12 Lysimeterstandorten pro Parzelle monatlich in zwei Bodentiefen gesammelt, pro Tiefe gemischt und dann im Labor analysiert. © Simon Tresch, IAP.

gen der WDB zeigen, dass sich die Vitalität mit erhöhter N-Deposition verschlechtert und Anfälligkeiten gegenüber Krankheiten oder Käferbefall (BRAUN *et al.* 2021a), Schäden durch Trockenheiten (BRAUN *et al.* 2021b) sowie die Sturmfestigkeit (BRAUN *et al.* 2003) mit steigender N-Deposition in Zusammenhang stehen. In der Schweiz trägt die Landwirtschaft aktuell zu zwei Dritteln, Industrie und Verkehr zu einem Drittel zu den Stickstoffemissionen bei. Weitere Massnahmen zur Verminderung vor allem bei den landwirtschaftlich bedingten Emissionen erscheinen dringend nötig. Diese könnten auch zur Reduktion von klimarelevanten Treibhausgasen beitragen (EKL 2022). Auch im Bereich Verkehr sind Massnahmen zur Stickstoffreduktion wie technische Entwicklungen und strengere Abgasvorschriften konsequent auszuschöpfen. Waldbauliche Massnahmen wie geeignete Baumartenwahl und Verzicht der Vollbaumernte sollten wenn möglich umgesetzt werden. Hier ist auf die Einführung des Verursacherprinzips und die damit verbundenen rechtlichen Anpassungen hinzuweisen (vgl. Schweizerischer Bundesrat 2017).

Doch auch nach der Reduktion an der Quelle ist eine Erholung von stark und tiefgründig versauerten Waldstandorten nicht gewährleistet, da die natürliche Nachlieferung von Nährstoffkationen aus der Verwitterung des

schlag pro Jahr und für den Tannensandort in Busswil (BE) mit 1282 mm Niederschlag pro Jahr sehen wir im Oberboden ähnliche Effekte der Bodenschutzkalkung, jedoch noch wenig ausgeprägt. Die fortlaufenden Messungen der Bodenlösungen werden zeigen, was eine Bodenschutzkalkung von 3 t/ha an den unterschiedlichen Standorten bewirken wird.

#### 4 Fazit und Ausblick

Die übermässigen N-Einträge, welche in fast 90 % der Schweizer Wälder über dem kritischen Wert liegen, bewirken eine Überdüngung und tragen zur Bodenversauerung sowie zu Nährstoffverlusten im Boden und somit auch zur unausgewogenen Ernährung der Waldbäume bei. Langzeituntersuchun-

Tab. 2. Zusammenstellung über die Datenerhebung auf den Untersuchungsflächen.

	Anzahl pro Fläche	Aufteilung	Sampling	Total
Flächen		1× Buche, 1× Fichte, 1× Tanne		3
Parzellen	8	4 gekalkt, 4 Kontrolle		24
Bäume		247 Buchen, 249 Fichten, 263 Tannen	Kronenverlichtung und Vergilbung, 1× pro Jahr	759
Zuwachsmessbänder	32	4 pro Parzelle	2× jährlich	96
Gipfeltriebe	16	2 pro Parzelle	2× in 4 Jahren, für Triebwachstumsmessungen und Nährstoffanalysen	48
Lysimeter	96	12 pro Parzelle in zwei Tiefen	monatlich	288
Bodensonden für Bodenwassergehalt	24	3 Tiefen pro Parzelle	stündlich	72
Tensiometer	6	zwei Parzellen mit je 3 Tiefen	stündlich	18
Streufallsammler	8	1 pro Parzelle	monatlich, bei Bedarf	24
Bodenprofile	8	1 pro Parzelle	bei Erstaufnahme	24
Vegetationsaufnahmen	8	1 pro Parzelle	2× in 4 Jahren	24
Bodenfauna	8	1 pro Parzelle (30×30×30 cm)	nach 4 Jahren	24
Bodenproben für Bodenchemie		Aus dem Bodenprofil plus 6–8 Einstiche pro Parzelle, Mischproben pro Horizont	2× in 4 Jahren	130



Abb. 2: Impressionen aus der Einrichtung der Waldbestände für das Projekt Experimentelle Kalkung von Waldstandorten. Links: Bodenprofil für die Parzelle B des Tannenbestandes bei Busswil (BE). Mitte: Abwägen des Dolomittkalks für das genaue Ausbringen des Kalkes in der Fichtenfläche bei Menzingen (ZG). Rechts: Installation eines Lysimeters für die monatliche Sammlung der Bodenlösung in der Tannenfläche bei Busswil (BE). Fotos: © Simon Tresch, IAP.

Ausgangssubstrats meist zu gering ist (RIHM und KÜNZLE 2019).

Die ersten Ergebnisse einer Bodenschutzkalkung in der Schweiz an drei unterschiedlichen Waldstandorten zeigen, dass sich erst 1,5 Jahre nach der Behandlung erste Änderungen in der Bodenlösung zeigen. Die Weiterführung der Messzeitreihe in diesem Praxisversuch wird zeigen, wie sich die Bodenchemie langfristig verändert und ob man Effekte auch in den Blattspiegelwerten und somit in der Baumvitalität oder in der Bodenvegetation wiederfinden wird. Diese Grundlagen dienen zur Bewertung einer Bodenschutzkalkung als mögliche Sanierungsmaßnahme von stark versauerten Waldböden in der Schweiz. Allgemein gilt, dass ein umfassendes Nährstoffmanagement zum Schutz und zur Stabilisierung von Wäldern auch weitere Einflüsse berücksichtigen sollte, wie die Nährstoffzüge durch intensive Holzernte und den Verlust von Nährstoffen durch die Deposition.

## 5 Literatur

- AMELUNG, W.; BLUME, H.-P.; FLEIGE, H.; HORN, R.; KANDELER, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; KRETZSCHMAR, R.; STAHR, K.; WILKE, B.-M., 2018: Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Berlin, Springer.
- AUGUSTIN, S.; ACHERMANN, B., 2012: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Entwicklung, aktueller Stand und Bewertung. Schweiz. Z. Forstwes. 163, 6: 323–330.
- BAFU, 2017: Internationaler Workshop «Kriterien der Kalkungsbedürftigkeit» 29.09.2017, Au (ZH).
- BMELV, 2009: Waldbericht der Bundesregierung.
- BOBBINK, R.; LORAN, C.; TOMASSEN, H., 2022: Review and revision of empirical critical loads of nitrogen for Europe. German Environmental Agency.
- BØRJA, I.; NILSEN, P. 2009: Long term effect of liming and fertilization on ectomycorrhizal colonization and tree growth in old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. Plant Soil 314: 109–119.
- BRAUN, S.; HOPF, S.-E.; TRESCH, S.; REMUND, J.; SCHINDLER, C., 2021a: 37 Years of Forest Monitoring in Switzerland: Drought Effects on *Fagus sylvatica*. Frontiers For. Glob. Change 1–10.
- BRAUN, S.; HOPF, S.E.; DE WITTE, L.C.; TRESCH, S., 2021b: Wie geht es unserem Wald? 38 Jahre Jahre Walddauerbeobachtung.
- BRAUN, S.; SCHINDLER, C.; RIHM, B., 2017: Growth trends of beech and Norway spruce in Switzerland: The role of nitrogen deposition, ozone, mineral nutrition and climate. Sci. Total Environ: 599–600, 637–646.
- BRAUN, S.; SCHINDLER, C.; VOLZ, R.; FLÜCKIGER, W., 2003: Forest damages by the storm «Lothar» in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water Air Soil Pollut. 142: 327–340.
- BUTTERBACH-BAHL, K.; GUNDERSEN, P.; AMBUS, P.; AUGUSTIN, J.; BEIER, C. *et al.*, 2011: Nitrogen Processes in Terrestrial Ecosystems. In: Sutton, M.; Howard, C.M.; Erisman, J.W.; Billen, G.; Bleeker, A.; van Grinsven, H.; Grizzetti, B. (Eds.) The European Nitrogen Assessment. Cambridge, Cambridge University Press. 99–125.
- COURT, M.; VAN DER HEIJDEN, G.; DIDIER, S.; NYS; RICHTER, C.; POUSSE, N.; SAINT-ANDRÉ, L.; LEGOUT, A., 2018: Long-term effects of forest liming on mineral soil, organic layer and foliage chemistry: Insights from multiple beech experimental sites in Northern France. For. Ecol. Manag. 409: 872–889.



- DE WITTE, L.C.; ROSENSTOCK, N.P.; VAN DER LINDE, S.; BRAUN, S., 2017: Nitrogen deposition changes ectomycorrhizal communities in Swiss beech forests. *Sci. Total Environ.* 605–606, 1083–1096.
- DEROME, J., 1990: Effects of forest liming on the nutrient status of podzolic soils in Finland. *Water Air Soil Pollut.* 54: 337–350.
- Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), 2020: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Situation mit Bezug zur Landwirtschaft im Zeitraum 2000–2018.
- ETZOLD, S.; FERRETTI, M.; REINDS, G.J.; SOLBERG, S.; GESSLER, A. *et al.*, 2020: Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests. *For. Ecol. Manag.* 458.
- GALLOWAY, J.N.; ABER, J.D.; WILLEM ERISMAN, J.; SEITZINGER, S.P.; HOWARTH, R.W.; COWLING, E.B.; COSBY, B.J., 2003: The nitrogen cascade. *BioScience* 53: 341–356.
- GREVE, M.; BLOCK, J.; SCHÜLER, G.; WERNER, W., 2021: Long Term Effects of Forest Liming on the Acid-Base Budget. *Appl. Sci.* 11, 3: 955.
- HAMACHER, J.; FUCHS, J.; OEHLMANN, M., 2021: Stickstoff: zu viel des Guten! Beteiligung von Bürger\*innen auf dem Weg zu einer nationalen Stickstoffminderung.
- HUBER, C.; BAIER, R.; GÖTTLEIN, A.; WEIS, W., 2006: Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany. *For. Ecol. Manag.* 233: 11–20.
- MAINWARING, D.B.; MAGUIRE, D.A.; PERAKIS, S., 2014: Three-year growth response of young Douglas-fir to nitrogen, calcium, phosphorus, and blended fertilizers in Oregon and Washington. *For. Ecol. Manag.* 327: 178–188.
- NILSEN, P., 2001: Fertilization Experiments on Forest Mineral Soils: A Review of the Norwegian Results. *Scandinavian J. For. Res.* 16: 541–554.
- NILSSON, S.I.; ANDERSSON, S.; VALEUR, I.; PERSSON, T.; BERGHOLM, J.; WIRÉN, A., 2001: Influence of dolomite lime on leaching and storage of C, N and S in a Spodosol under Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *For. Ecol. Manag.* 146: 55–73.
- PERSSON, H.; AHLSTRÖM, K., 1990: The effects of forest liming on fertilization on fine-root growth. *Water Air Soil Pollut.* 54: 365–375.
- PERSSON, T.; ANDERSSON, S.; BERGHOLM, J.; GRÖNQVIST, T.; HÖGBOM, L.; VEGERFORS, B.; WIRÉN, A., 2021: Long-Term Impact of Liming on Soil C and N in a Fertile Spruce Forest Ecosystem. *Ecosystems* 24: 968–987.
- PUHLMANN, H.; HARTMANN, P.; MAHLAU, L.; VON WILPERT, K.; HUBER, A.; MOOS, J.H.; JANSONE, L.; DREWS, L., 2021: Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung in den Wäldern Baden-Württembergs – Evaluierung der Umsetzung und der Wirksamkeit des Kalkungsprogramms in den Jahren 2010 bis 2019. *Ber. Freibg. Forstl. Forsch.* 104.
- RIHM, B.; KÜNZLE, T., 2019: Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. Federal Office for the Environment FOEN, Air Pollution Control and Chemicals Division.
- SCHULLA, J., 2019: Model description WaSiM-ETH.
- Schweizerischer Bundesrat, 2017: Optionen zur Kompensation der Versauerung von Waldböden und zur Verbesserung der Nährstoffsituation von Wäldern – Darstellung und Bewertung.
- STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J.; CORNELL, S.E.; FETZER, I.; BENNETT, E.M. *et al.*, 2015: Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347: 1259855–1259855.
- SVERDRUP, H.; WARFVINGE, P., 1993: The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio In: Nihlgård, B.; Tyler, G. (eds.). Lund University, Department of Chemical Engineering II.
- ULRICH, B., 1986: Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Z. Pflanzenernährung Bodenkunde* 149: 702–717.
- VAN DER LINDE, S.; SUZ, L.M.; DAVID, C.; ORME, L.; COX, F.; ANDREAE, H.; ASI, E. *et al.*, 2018: Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi. *Nature* 558, 7709: 243–248.

## Abstract

### Pilot Project Experimental Liming of Forest Sites: Background and first results

Besides climate change, nitrogen emissions are one of the world's greatest ecological problems with serious effects on many natural ecosystems. In Switzerland, the critical levels of N are exceeded on almost 90% of the forest area. Long-term monitoring of soil water by the Intercantonal Permanent Forest Observation Programme shows that soil acidification continues to progress in Swiss forest stands. In order to counteract this, a pilot project is now investigating the effects of liming (3 t/ha) on three highly acidified forest stands with fir, beech and spruce and examines the question of how long it takes for the soils and stands to recover. First results show an effect of the dolomitic lime in the upper soil layers (up to 20 cm) 1.5 years after liming. The continuation of the experiment will show how soil protection liming will affect soil chemistry and tree vitality parameters.

Keywords: Forest liming in Switzerland, nitrogen deposition, soil acidification



Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.