INSTITUT FÜR ANGEWANDTE PFLANZENBIOLOGIE AG
Benkenstrasse 254a, CH-4108 Witterswil
www.iap.ch

Experimentelle Kalkung von Waldstandorten

Pilotprojekt Bodenschutzkalkung in der Schweiz 2019-2023








SVEN-ERIC HOPF, SIMON TRESCH, SABINE BRAUN

Witterswil, Mai 2023

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wald, 3003 Bern

Begleitung BAFU

Dr. Sabine Augustin, Abteilung Wald

Auftragnehmer

Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP),
Benkenstrasse 254a,
CH-4108 Witterswil
+41 61 485 50 70
www.iap.ch

Autoren

Dipl. Ing. Sven-Eric Hopf, Dr. Simon Tresch, Dr. Sabine Braun

Titelbild

Impressionen der Installationen auf den Versuchsflächen (Bilder©IAP).

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung **1**

1 Einleitung **3**
1.1 Motivation und Ziele einer Bodenschutzkalkung 4

2 Material und Methoden **5**
2.1 Flächenauswahl 5
2.2 Versuchseinrichtung 6
2.3 Kronenverlichtung 6
2.4 Bodenlösung 6
2.5 Blatt- / Nadel-Elementgehalte 7
2.6 Bodenproben 7
2.7 Stammzuwachs 8
2.8 Vegetationsaufnahmen 8

3 Resultate **10**
3.1 Kronenverlichtung 10
3.2 Bodenlösung 12
3.3 Blatt- / Nadel-Elementgehalte 22
3.4 Streufall 26
3.5 Bodeneigenschaften 27
3.6 Stammzuwachs 29
3.7 Vegetationsaufnahmen 31

Anhang **38**

A Kalkung in Zahlen **38**

B Flächenpläne **39**

C Impressionen der Feldarbeit **43**

D Bodenprofilaufnahmen **46**

E Publikationen **71**

Literaturverzeichnis **78**

Abbildungen

Abb. 1 Übersicht der drei Untersuchungsflächen . . . 2

Abb. 2 Standorte Kalkungsversuch . . . 5
Abb. 3 Vorbereitungen der Bodenproben . . . 8
Abb. 4 Zuwachsmessband . . . 8

Abb. 5 Kronenverlichtung . . . 10
Abb. 6 Entwicklung der Kronenverlichtung . . . 11
Abb. 7 Unterschiede in den Kalziumkonzentration in der Bodenlösung . . . 13
Abb. 8 Unterschiede in den Magnesiumkonzentration in der Bodenlösung . . . 13
Abb. 9 Unterschiede in den Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung . . . 14
Abb. 10 Unterschiede in den Sulfatkonzentrationen in der Bodenlösung . . . 14
Abb. 11 Unterschiede in den Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung . . . 15
Abb. 12 Zeitliche Entwicklung Bodenlösung Busswil . . . 17
Abb. 13 Zeitliche Entwicklung Bodenlösung . . . 18
Abb. 14 Zeitliche Entwicklung Bodenlösung . . . 19
Abb. 15 Jahresfrachten Bodenlösung Busswil. . . . 20
Abb. 16 Jahresfrachten Bodenlösung Bachs und Menzingen. . . . 21
Abb. 17 Gipfeltrieb . . . 22
Abb. 18 Nährstoffgehalte der Tannennadeln . . . 23
Abb. 19 Nährstoffgehalte der Fichtennadeln . . . 24
Abb. 20 Nährstoffgehalte der Buchenblätter . . . 25
Abb. 21 Frachten von P, K, Ca und Mg in Streufall, Deposition und Auswaschung . . . 26
Abb. 22 Basensättigung . . . 27
Abb. 23 Korngrössenverteilung . . . 28
Abb. 24 Grundflächenzuwachs . . . 29
Abb. 25 Häufige Säurezeiger . . . 31
Abb. 26 Vegetationsaufnahme in der Fläche Busswil (BE) Tanne. . . . 32
Abb. 27 Ökogramm der Krautschicht Tanne Busswil (BE) . . . 33
Abb. 28 Vegetationsaufnahme in der Fläche Menzingen (ZG) Fichte. . . . 34
Abb. 29 Ökogramm der Krautschicht Fichtenfläche Menzingen (ZG) . . . 35
Abb. 30 Vegetationsaufnahme in der Fläche Bachs (ZH) Buche. . . . 36
Abb. 31 Ökogramm der Krautschicht Buchenfläche Bachs (ZH) . . . 37

Abb. 32 Flächenplan Busswil (BE) Tannen . . . 40
Abb. 33 Flächenplan Menzingen (ZG), Fichten . . . 41
Abb. 34 Flächenplan Bachs (ZH), Buchen . . . 42

Abb. 35 Entnahme von Bodenproben . . . 43

Zusammenfassung

Neben den **Auswirkungen des Klimawandels**, welcher in der Schweiz bereits zu einem Temperaturanstieg von ca. 2°C geführt hat und in den letzten Jahren seit 2018 vermehrt zu extremen Trockenheitsereignissen in Folge geführt hat, ist die hohe Belastung der Schweizer Wälder mit **Stickstoffeinträgen** eines der grössten Probleme für die Waldgesundheit und eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. In der Schweiz werden auf knapp 90% der Waldfläche die kritischen Eintragsraten für Stickstoff überschritten (Rihm und Künzle 2019). Langzeituntersuchungen in der Bodenlösung von Flächen der Interkantonalen Walddauerbeobachtung (WDB) belegen, dass daraus eine **Bodenversauerung** resultiert, welche unabhängig von der Baumart auch weiter voranschreitet (Braun et al. 2020).

In diesem Pilotprojekt **"Experimentelle Kalkung von Waldstandorten"** wird untersucht, was eine einmalige **Bodenschutzkalkung von 3 t ha^{-1}** auf drei stark versauerten **Waldbeständen mit Tannen, Buchen und Fichten** bewirkt. Die zentrale Fragestellung dabei ist, ob sich der versauerte Boden durch die Kalkung messbar erholt und ob es im Bestand Verbesserungen in der Ernährung der Bäume oder in der Belaubung der Baumkronen gibt. Die Messungen welche nach der Kalkung im Boden, im Bodenwasser und an den Bäumen gemacht werden, laufen seit 2021.
Die **Auswertungen der Bodenwasserdaten**, welche seit zwei Jahren monatlich pro Parzelle und Tiefe erhoben werden, zeigen eine **initiale Wirkung des Dolomitkalkes in den obersten Bodenschichten (bis 20 cm)**. So sehen wir im Fichtenbestand in Menzingen (ZG) einen Trend hin zu höheren Mg^{2+}- und Ca^{2+}-Werten in der Bodenlösung. Dies führt zu **höheren BC/Al-Werten und einer tieferen Azidität**. Für den Buchenstandort in Bachs (ZH) und den Tannenstandort in Busswil (BE) sehen wir im Oberboden ähnliche Effekte der Bodenschutzkalkung, jedoch noch wenig ausgeprägt. Dies wurde im Artikel (Anhang E) von Tresch et al. (2022) bereits beschrieben und mit einem Vortrag an die interessierte Fachwelt und Waldpraxis ergänzt.

Die **Fragen**, ob durch die Kalkung von sanierungsbedürftigen Standorten die Basensättigung im gesamten Wurzelraum gesteigert wurde, ob die Nährstoffverluste durch die Bodenversauerung kompensiert werden konnten und ob eine Verbesserung der Magnesium-, Kalium- und Phosphorversorgung der Bäume erfolgte, kann aufgrund der kurzen Dauer des Pilotprojektes **noch nicht beantwortet** werden.

Erst eine **Weiterführung des Experiments** wird zeigen, wie sich die Bodenschutzkalkung auf die Bodenchemie in den tieferen Bodenhorizonten und andere Erhebungen wie Baumvitalitätsparameter auswirken wird. Die geplanten Erhebungen zur Bodenfauna (funktionelle Gruppen der Regenwürmer und Biomassebestimmung) sowie eine Zweitbeprobung der Bodenfestphase und eine Wiederholung der pflanzensoziologischen Aufnahmen, werden **weitere Informationen** liefern, ob und in welchem Umfang die Ziele einer Bodenschutzkalkung in den drei Untersuchungsflächen erreicht werden können.



Abb. 1. Übersicht der drei Untersuchungsflächen. Links: Tanne Busswil (BE), Mitte: Buche Bachs (ZH), Rechts: Fichte Menzingen (ZG), inklusive Lysimeter zur Beprobung der Bodenlösung und Streufallsammler.

1 | Einleitung

Anthropogene Einwirkungen haben im Verlauf des 20. Jahrhunderts die 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 Luftreinhaltemassnahmen führten zu einer markanten Abnahme der Emissionen von SO_2-S und NO_x-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 auch heute noch auf 87% der Schweizer Wälder überschritten (Rihm und Künzle 2023). 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. 2-3 kg pro ha und Jahr (Butterbach-Bahl et al. 2011). Diese hohen Stickstoffeinträge wirken langfristig schädlich auf Ökosysteme und führen zur Eutrophierung und beschleunigter Bodenversauerung (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) 2020, 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, welche das Puffervermögen von Waldböden häufig überschreiten. Diese zusätzliche Versauerung des Bodens erfolgt sowohl durch den direkten Eintrag von starken Säuren wie Schwefelsäure (H_2SO_4 und Salpetersäure (HNO_3), welche vorwiegend aus anthropogenen Quellen (Verbrennungsprozesse und Landwirtschaft) stammen, als auch durch die Auswaschung von überschüssigem Nitrat. 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, 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 Mykorrhiza (van der Linde et al. 2018, de Witte et al. 2017) führt zu Nährstoffungleichgewichten mit negativen Auswirkungen auf das Bestandeswachstum (Bobbink et al. 2011, Braun et al. 2017) und zu verminderter Resistenz gegenüber Pathogenen, Insekten und Trockenheit.

Weitere Auswirkungen des Eintrags reaktiver Stickstoffverbindungen (NH_4^+, NO_3^-) sind die Verdrängung der Waldvegetation durch stickstoffliebende Pflanzen (Holunder, Brennnesseln, Brombeeren), Nitrat im Trinkwasser, und nicht zuletzt die Wirkung von Stickoxiden, welche bei der Denitrifizierung frei werden, als Treibhausgas (N_2O) und als Vorstufe der Ozonbildung in der Troposphäre (NO_x) (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). Aktuell ist in der Schweiz der Stickstoff für 92% der versauernden Wirkung von Luftschadstoffeinträgen verantwortlich (Pers. Mitteilung B. Rhim 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.

1.1 Motivation und Ziele 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 mehr versprechen, d.h. die tiefgründig versauert sind und als sanierungsbedürftig gelten. Zur Definition der Kalkungsbedürftigkeit wurde ein Workshop mit internationaler Beteiligung durchgeführt (BAFU 2017), siehe auch Kapitel 2.1 Flächenauswahl).

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 Säureeinträge
- Verbesserung der Magnesium-, Kalium- und Phosphorversorgung der Bäume

Bei einer Bodenschutzkalkung mit Dolomitkalk wird in der Bodenlösung Ca2+ und Mg2+ 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 HCO3- erhöht die Alkalinität der Bodenlösung und wirkt zusätzlich puffernd (Sverdrup und Warfvinge 1993). Somit können Säureeinträge 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 Kalkungsmittel 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 standortsspezifischen Auswirkungen auf den Boden, die Bodenlösung und die 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 Deckungsgrad und die Artenzahl erhöht waren und in der Biodiversität im Boden, mit positiven Effekten der Kalkung auf die Regenwurmpopulationen. Bodenschutzkalkungen können sich somit 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 Kohlenstoffspeicherung (Court et al. 2018, Puhlmann et al. 2021). Auch die Effekte auf das Baumwachstum sind sehr standortsabhängig, so wurden 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 Dolomitkalk und dem damit verbundenen Nachschub an Calcium und Magnesium verbessert werden (Puhlmann et al. 2021).

2 | Material und Methoden

2.1 Flächenauswahl

Die Standortswahl der tiefgründig versauerten Waldflächen erfolgte nach den, in einem Workshop definierten "Kriterien der Kalkungsbedürftigkeit" (BAFU 2017):

"Die Kriterien der Kalkungsbedürftigkeit orientieren sich am Ausmass des Problems und den zu erreichenden Zielen. Als Ziele wurden genannt: die Kompensation der aktuellen versauernden Einträge, der Schutz der Bodenfunktionen (v.a. Pufferung, Filterfunktion), die Reaktivierung der ökosystem-internen Nährstoffkreisläufe, die Restauration von Boden- und Gewässerzustand, die Trinkwasservorsorge sowie die Vitalisierung der Vegetation."

Das Ausmass der Versauerung ist somit das wichtigste Kriterium. Dies wird durch Analysen des chemischen Bodenzustands ermittelt. Die wichtigsten Parameter sind die Basensättigung am Austauscher und der pH-Wert. Die Überschreitung der Belastungsgrenze für versauernde Einträge bedeutet nicht, dass auch im Boden kritische Zustände eingetreten sind. Böden verfügen über eine mehr oder weniger grosse Pufferkapazität. Diese wird durch stetig versauernde Einträge abgebaut und erst ab einer bestimmten Grenze ist mit einer Gefährdung für den Wald zu rechnen. Gemäss ersten Berechnungen für die Schweiz sind ca. 8% der Waldstandorte "sanierungsbedürftig", weitere 28% sind als "kritisch" einzustufen (Braun et al. 2015).

Es wurde eine erste Flächenauswahl auf Basis von geologischen und pflanzensoziologischen Karten sowie Satellitenbildern der Bestände vorgenommen. In einem zweiten Schritt wurden die infrage kommenden Flächen mit den zuständigen Forstbehörden begutachtet, und es wurden Bodenproben zur Bestimmung der Basensättigung genommen. Dabei war eine tiefe Basensättigung (BS<20%) im ganzen Bodenprofil ausschlaggebend für die Eignung als Versuchsfläche. Angestrebt wurde eine räumlich möglichst homogene Verteilung der bodenchemischen Parameter und ein homogener Baumbestand (Baumholz). Diese Kriterien wurden auf folgenden Flächen erfüllt: einem Tannenbestand in Busswil bei Melchnau (BE), einer Buchenfläche bei Bachs (ZH) und eine Fichtenfläche bei Menzingen (ZG), siehe Abb. 2.

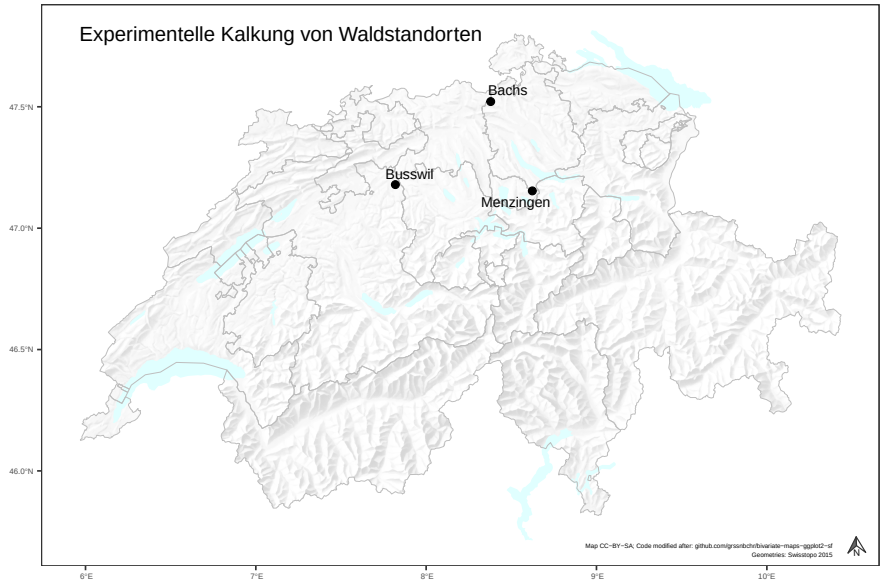


Abb. 2. Übersicht über die Versuchsflächen.

Tab. 1. Standortsinformationen der Versuchsflächen. Niederschlag und Trockenheitsindikatoren der Vegetationsperiode (SWBmin: minimale Standortswasserbilanz und ETa/ETp: aktuelle / potentielle Evapotranspiration) wurden mit dem hydrologischen Model WaSiM-ETH (Schulla 2019) gerechnet. Der pH-Wert (gemessen in $CaCl_2$) und die Basensättigung sind berechnet für 0-40 cm Bodentiefe, wobei beim pH-Wert wegen der Verfälschung durch organische Säuren im Humus nur der Mineralboden berücksichtigt wurd. Die modellierten N-Depositionen (Nass- und Trockendeposition) wurden gemäss Rihm und Künzle (2019) für das Jahr 2015 berechnet.

Baumart Versuchsfläche	Tanne Busswil (BE)	Buche Bachs (ZH)	Fichte Menzingen (ZG)
Waldgesellschaft	8*	6,1	8*,8a
Höhe (m.ü.M.)	626	600	988
Jahresniederschlag 2021 (mm)	1282	1077	2003
Jahresniederschlag 2022 (mm)	1025	853	1618
Jahresniederschlag Mittel 2000-2020	1151	1111	1848
SWBmin (mm) 2021	32	22	144
SWBmin (mm) 2022	-299	-480	33
SWBmin Mittel 2000-2020	-127	-147	92
ETa/ETp 2021	0.91	0.90	0.93
ETa/ETp 2022	0.74	0.75	0.89
ETa/ETp Mittel 2000-2020	0.85	0.89	0.92
pH-Bodenfestphase 0-40 cm Mineralboden	3.9	4.1	3.9
Basensättigung 0-40 cm (%)	6.5	9.8	18.0
N-Deposition (kg ha^{-1} a^{-1})	31.8	20.3	24.8

2.2 Versuchseinrichtung

Die Einrichtungsarbeiten auf den ausgewählten Flächen Busswil (BE), Bachs (ZH) und Menzingen (ZG) wurden im April 2020 begonnen. Dabei wurden Bäume nummeriert und der Brusthöhendurchmesser gemessen, Bodenprofile gegraben und angesprochen, Bodenproben entnommen und Lysimeter gesetzt. Im Mai und Juni 2020 erfolgten die Vegetationsaufnahmen in den einzelnen Parzellen. Im Sommer 2020 wurde erstmals die Kronenverlichtung aufgenommen und die erste Asternte zur Bestimmung der Baumernährung durchgeführt. Die Einrichtungsarbeiten endeten mit dem Ausbringen des Kalks (3t Dolomitkalk pro ha) Mitte Dezember 2020. Eine Zusammenstellung der Installationen und Aufnahmen in Zahlen, findet sich in Tab. 11 im Anhang A. Im Anhang B sind die Flächenpläne abgelegt. Anhang C zeigt Impressionen von den Einrichtungsarbeiten.

2.3 Kronenverlichtung

Die Kronenverlichtung wird jährlich zwischen Mitte Juli und Ende August erhoben. Sie wird optisch pro Baum in 5%-Stufen geschätzt und nach einer international einheitlichen Skala bewertet (Tab. 2). Gemäss dem ICP Forests – einem Arbeitsprogramm unter der UNECE-Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung – gelten Bäume mit einer Kronenverlichtung von mehr als 25% als gestresst (ICP Forests 2003).

Tab. 2. Verlichtungsstufen gemäss ICP Forests (2003).

Blatt-Nadelverlust	Verlichtungs-stufe	Verlichtungs-grad
0-10%	0	kein
>10-25%	1	leicht
>25-50%	2	mittelstark
>60-99%	3	stark
100%	4	abgestorben

2.4 Bodenlösung

Um die Bodenlösung zu sammeln und deren chemische Eigenschaften zu bestimmen wurden insgesamt 288 Lysimeter (96 pro Standort) auf den Versuchsflächen installiert. Pro Parzelle wird an 6 Stellen in 2 Tiefenstufen das Bodenwasser monatlich gesammelt. Die Proben der ersten 6 Monate nach der Installation wurden wegen der Störung des Bodens durch den Einbau der Lysimeter verworfen. Anschliessend wurden über zwei Monate Einzelmessungen der Leitfähigkeit als Kontrolle für jede Lysimeterprobe durchgeführt. Die Bodenwasserproben werden monatlich im Labor pro Fläche, Parzelle und Bodentiefe zu jeweils 16 Mischproben (8 Parzellen x 2 Bodentiefen) zusammengeführt. Die Messungen begannen in Menzingen (ZG) am 07.01.21, gefolgt von Busswil (BE) am 03.02.21 und Bachs (ZH) am 01.04.21. Die Zeitreihe der Bodenlösungsdaten beinhaltet die monatlichen Lysimetermischproben bis und mit Dezember 2022. Die Anzahl analysierter Mischproben liegt im Moment bei 315 Mischproben für die Buchenfläche (1890

Einzelproben), 371 Mischproben für die Fichtenfläche (2226 Einzelproben) und 332 Mischproben Proben für die Tannenfläche (1992 Einzelproben).

Statistisch wurden die Bodenlösungsdaten mit gemischten linearen Modellen analysiert. Das Versuchsdesign pro Fläche mit den 8 Parzellen wurden gruppiert zu jeweils einem Block mit je einer gekalkten und einer ungekalkten Fläche (randomised blocks) und als random variable im Modell aufgenommen (Anhang B). Dies dient dazu nicht erklärbare Unterschiede zwischen den Parzellen in der Modellierung zu berücksichtigen. Die Einteilung wurde auf Grund der Geologie, Pflanzensoziologie und Bodenchemie gemacht.

Analysen der Bodenlösung

Die monatlichen Bodenwasserproben werden im Labor am IAP analyisert. Folgende Parameter werden dabei gemessen: pH-Wert, Leitfähigkeit und Alkalinität (Metrohm). Für die Anionenbestimmung werden die Bodenwasserproben zuerst durch eine Membrane gefiltert (0.45 µm). Die Kationen Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, Mn^{2+} werden mit einem Microwave Plasma Atomic Emission Spectroscopy (MP-AES 4210 Agilent) bestimmt. Anorganisches Aluminium (Al_{inorg}) und organisches Aluminium (Al_{org}) werden mit einem MP-AES vor und nach Passieren durch einen Ionenaustauscher (0.5 ml IC-H, Alltech 30264) gemessen. Organisch komplexiertes Aluminium läuft dabei durch den Tauscher, das anorganische wird im Tauscher festgehalten. NH_4^{+} wird photometrisch bestimmt mit Indophenol (Walinga et al. 1995). NO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-} werden mit Ionenchromatographie (Dionex Thermo Fisher Scientific) gemessen. Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) wird mit UV-Absorption gemessen bei λ 280 nm. Ein ausführlicher Methodenbeschrieb ist in Braun (2017) zu finden.

Die Qualitätskontrolle erfolgt durch die Berechnung der Ionenbilanz, einen Vergleich der berechneten mit der gemessenen Leitfähigkeit gemäss EMEP (1996), Jönsson et al. (1995) sowie durch die Analyse von Referenzproben, welche jährlich verteilt werden durch das Norwegian Institute for Air Research (NILU).

Die Auswaschungsfrachten wurden durch die Berechnung des täglichen Wasserflusses (runoff) mit dem hydrologischen Modell (WASIM-ETH, Schulla (2019)) und der anschliessenden Multiplikation mit der in der Bodenlösung gemessenen Konzentration (eine Messung pro Monat) berechnet. Die Summe dieser Elementflüsse pro Jahr ergaben dann die Auswaschungsfrachten.

2.5 Blatt- / Nadel-Elementgehalte

Ende Juli 2020 wurde jeweils ein Ast aus der Lichtkrone von zwei Bäumen pro Parzelle (n=48) geerntet. Für die Nährstoffanalysen wurden Blätter von den Buchenästen und bei den Fichten und Tannen die Nadeln des letztjährigen Nadeljahrgangs entnommen. Die Proben wurden bei 70°C getrocknet und anschliessend gemahlen. Die Proben wurden mit einem modifizierten Kjeldahl-Verfahren chemisch aufgeschlossen und die Nährstoffkonzentrationen in den Aufschlusslösungen gemessen. Im Sommer 2023 (Ende Juli) werden erneut Astproben von den selben Bäumen geerntet und die Nährstoffanalysen werden wiederholt.

2.6 Bodenproben

Die Bodenmischproben pro Parzelle (n=130) bestanden aus 8 Einstichen pro Parzelle und Horizont. Diese wurden anschliessend im Bodenlabor am IAP getrocknet (40°C) und gesiebt (<2 mm) und für die unterschiedlichen Messungen vorbereitet (Abb. 3).

Physikalische und chemische Bodenqualitätsindikatoren

Im Bodenlabor am IAP wurden der pH ($CaCl_2$) der Bodenproben gemessen und die Trockenraumdichte mit Hilfe von Bodenzylindern analysiert. Die mineralogischen Bestimmungen wurden von EGK Geoscience gemacht. Die Totalgehalte von C und N wurden mittels eines CHN-Analysers am Bodenlabor vom FiBL in Frick gemessen. Die Bestimmung der Korngrössen der Bodenproben wurden mit dem Messgerät PARIO Plus von Meter durchgeführt. Für die Bestimmung der austauschbaren Kationen wurden die Bodenproben mit einer ungepufferten Ammoniumchloridlösung extrahiert. Die Elementgehalte von Ca, Mg, K, Fe, Mn, Na und Al wurden auf einem MP-AES (Microwave Plasma Atomic Emission Spectroscop, 4210 von Agilent) gemessen. Die Phophorverfügbarkeit im Boden wurde als citratlösliches P bestimmt (Manghabati et al. 2018). Die Basensättigung wurde als Verhältnis zwischen den austauschbaren basenbildenden Kationen (K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} und Na^{+}) und den säurebildenden Kationen (H^{+}, Al^{3+} und Fe^{3+}) berechnet.



Abb. 3. Vorbereitungen der Bodenproben für die Trockensubstanz Bestimmung und Korngrössenanalysen.

2.7 Stammzuwachs

Die Messung des Stammzuwachses erfolgt mittels Zuwachsmessbändern (Abb. 4). Pro Parzelle sind jeweils vier Bäume damit ausgerüstet. Pro Versuchsfläche und Behandlungstyp gibt es somit 24 Messbänder, welche jeweils Mitte November abgelesen werden. Unter dem Jahr werden die Messbänder zeitweise kontrolliert und als Backup abgelesen, falls sich ein Messband löst und neu angebracht werden muss.



Abb. 4. Beispiel der Stammzuwachsmessungen mit Zuwachsmessbänder in der Fichtenfläche Menzingen (ZG).

2.8 Vegetationsaufnahmen

Im Juni 2020 wurden auf allen Versuchsflächen pro Parzelle eine Vegetationsaufnahme nach Braun-Blanquet durchgeführt (n= 21). Dabei wurde der Deckungsgrad der einzelnen Arten geschätzt und klassiert Tab. 3.

Tab. 3. Klassierung der Deckungsgrade nach Braun-Blanquet.

Klasse	Deckungsgrad
r	selten, weniger als 3 Exemplare, < 1% Deckung
+	spärlich, weniger als 10 Individuen, < 5% Deckung
1	mehr als 10 Individuen und < 5% Deckung oder < 10 Individuen und > 5% Deckung
2	5-25%
3	25-50%
4	50-75%
5	75-100%

Berechnung der gemittelten Zeigerwerte

Für die Berechnung der gewichteten Zeigerwerte werden die Zeigerwerte der einzelnen Arten nach Ellenberg et al. (1991) verwendet. Die Ellenberg-Werte werden in einer Skala von 1-9 angegeben (Ellenberg und Leuschner 2010). In den Krautschichtauswertungen pro Standort (Tab. 9) werden die Reaktionszahl, Feuchtigkeitszahl und Nährstoffzahl verwendet (Tab. 4). Für die Berechnungen im Statistikprogramm R (RCore Team 2022), wurden die Zeigerwerte von Ellenberg aus der digital verfügbare German Species List Version 1.5 (Jansen und Dengler 2008) bezogen.

Tab. 4. Beschreibung der verwendeten Zeigerwerte nach Ellenberg (Ellenberg und Leuschner 2010).

Zeigerwert	von 1	bis 9
Reaktionszahl	Starksäurezeiger	Kalkzeiger
Feuchtigkeitszahl	Starktrockenzeiger	Nässezeiger
Nährstoffzahl	Extremer Nährstoffarmutzeiger	Extremnährstoffzeiger

Artenvielfallt und Verteilung

Die Artenvielfallt wird durch den Shannon-Wiener-Index ausgedrückt, ein Mass für die alpha-Diversität. Je höher der Index desto mehr Arten hat ein Bestand (Tab. 5, links).

Tab. 5. Beschreibung des Shannon-Wiener-Index.

Shannon-Wiener	Mass
0	keine Vegetation
<1	geringe Artenzahl
bis 1.5	niedrige Artenzahl
>2	hohe Artenzahl
bis 3 oder darüber	Sehr hohe Artenvielfallt (eher selten der Fall)

Die Evenness wird als weitere Kennzahl berechnet. Sie beschreibt den Grad der Gleichverteilung der Arten (Tab. 5, rechts).

Tab. 6. Beschreibung der Evenness (rechts).

Evenness	Mass
0	völliges Ungleichgewicht
1	völlige Gleichverteilung

3 | Resultate

3.1 Kronenverlichtung

Im Vergleich zu den Buchen und Fichten kommen auf der Tannenfläche in Busswil (BE) am wenigsten Bäume mit einer Kronenverlichtung über 25% vor, dies auch in den trockenen Jahren 2020 und 2022. Zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen kann man noch keine Unterschiede feststellen. Bei den Buchen in Bachs (ZH) stieg im Jahr 2021 der Anteil geschädigter Buchen (Verlichtung >25%) gegenüber dem Vorjahr um das dreifache an. Der Anteil stark geschädigter Bäume bleib jedoch für die Jahre 2021 und 2022 auf einem sehr tiefen Niveau (ein Baum) konstant. In Menzingen (ZG) blieb der Anteil Fichten mit Kronenverlichtung >25% konstant (Abb. 6).



Abb. 5. Verlichtete und vergilbte Buchenkrone auf der Versuchsfläche in Bachs (links) und Trockenschäden an einer Tanne in der Versuchsfläche in Busswil (rechts).

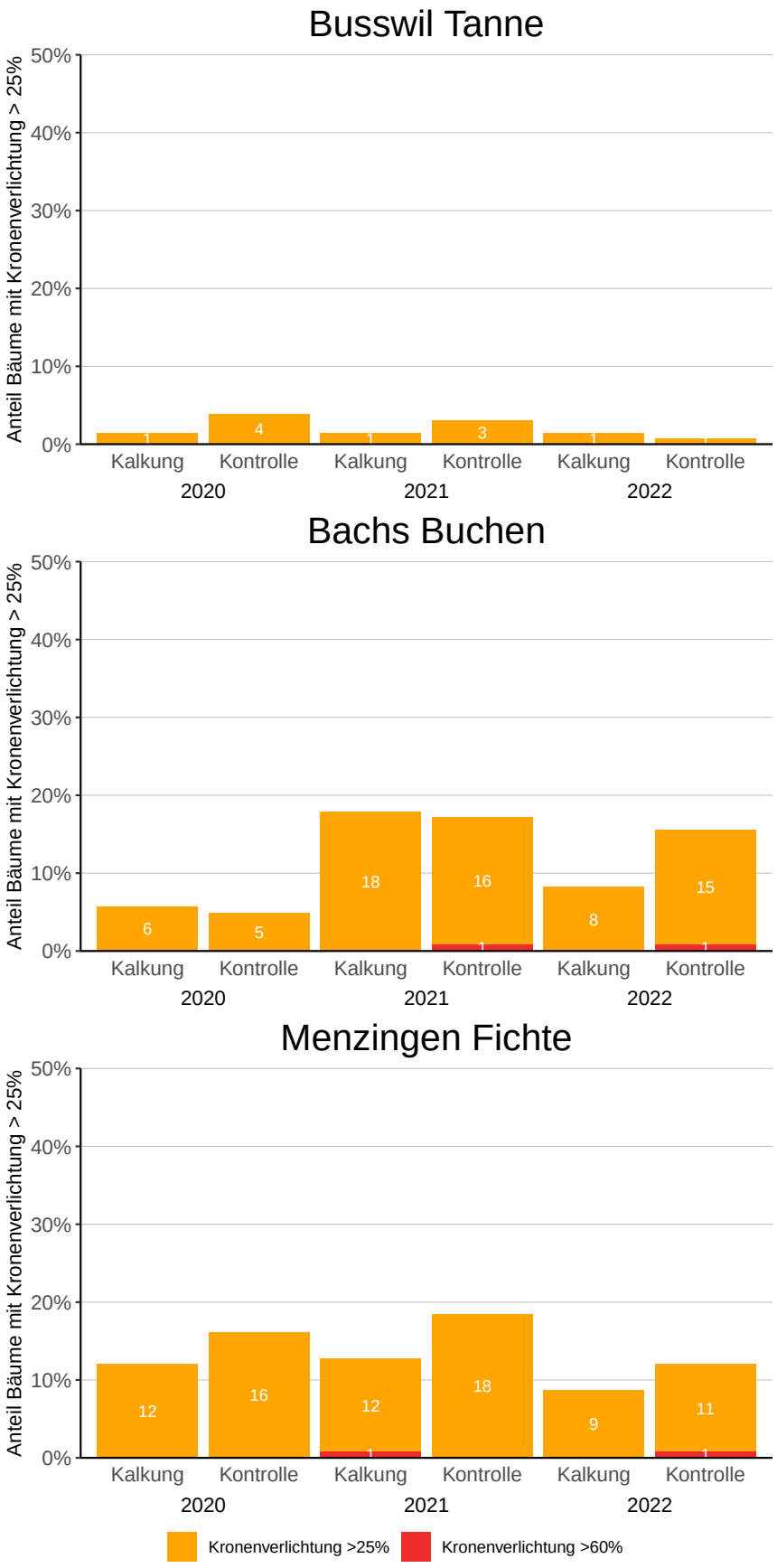


Abb. 6. Entwicklung der Kronenverlichtung aufgeteilt nach Behandlungstyp. Prozentualer Anteil der Bäume mit einer Kronenverlichtung >25% nach Klassen aufgeteilt (>25% = geschädigt, >60% stark geschädigt). Anzahl bonitierter Bäume Busswil Tanne n=526, Bachs Buche n=494, Menzingen Fichte n=501.

3.2 Bodenlösung

Messungen der Bodenlösung sind ein wertvoller Indikator für Änderungen in der Bodenchemie und somit auch für die Qualität des Waldbodens. Neben den Standortsfaktoren wie Ausgangssubstrat oder Bodentyp wird die Bodenlösung auch durch Einträge von Luftschadstoffen oder Bewirtschaftungsmassnahmen beeinflusst. Mit der Messung von basischen Kationen (Ca, Mg, K) und dem anorganischen Aluminium in der Bodenlösung kann des BC/Al Verhältnis berechnet werden. Diese beschreibt den Säure-Base-Zustand von Waldböden und korreliert mit Wachstums- und Vitalitätsparametern (Sverdrup und Warfvinge 1993). Früher wurde dieser vor allem durch die Einträge von Schwefel beeinflusst. Heute ist der Eintrag von Stickstoffverbindungen die wichtigste Säurebelastung für den Waldboden und führt aufgrund der Rolle von N als Nährstoff auch zur Eutrophierung der Wälder (Wellbrock et al. 2016). Die Installation von 96 Lysimeter pro Untersuchungsfläche bringt eine sehr detaillierte Datengrundlage um mögliche Änderungen in der Bodenlösung durch die Bodenschutzkalkung auf zu zeigen.

3.2.1 Zeitliche Entwicklung in der Bodenlösung nach der Kalkung

Da sich der Dolomitkalk nur langsam löst und sich damit die Wirkung in der Bodenlösung nur langsam einstellt sind die nachfolgend beschriebenen Unterschiede als temporäre Trends an zu sehen. Die Kalkung führte zu einer erhöhten Konzentration von Ca^{2+} (Abb. 7) und Mg^{2+} (Abb. 8) in der Bodenlösung. Wenn man sich die zeitliche Dynamik der Kalkauflösung anschaut (Abb. 14) dann kann erwartet werden, dass die Unterschiede zwischen den gekalkten und ungekalkten Parzellen noch grösser werden.

Die Änderungen im pH Wert sind noch sehr klein und teils widersprüchlich (Tab. 6). Auffallend sind aber auch die im Moment noch erhöhten Al^{3+} Werte in der Bodenlösung (Abb. 11). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Aluminiumkonzentrationen mit der Zeit sinken bei den gekalkten Flächen, da höhere pH Werte eine tiefere Aluminiumlöslichkeit bedeuten, dasselbe gilt für Mangan, welches im Moment auch noch höher ist bei Buche und Tanne (Børja und Nilsen 2009). Das BC/Al-Verhältnis sollte auch erst dann abschliessend betrachtet werden, wenn sich die Al-Werte stabilisiert haben. Dasselbe gilt für die Alkalinität und Azidität, welche beide stark von den Al^{3+} und H^{+} Ionen abhängig sind.

Verschiedene Studien zeigten, dass die Kaliumverfügbarkeit in der Bodenlösung längerfristig durch Kalkzugabe abnehmen könnte durch die verringerte Verfügbarkeit von Kalium bei hohen Ca-Werten im Boden (Weis et al. 2009) (Aufnahmeantagonismus). Dies ist hier nicht zu beobachten, da die K-Konzentrationen in der Bodenlösung beider Varianten annähernd gleich waren.

Neben den Kationen Ca und Mg welche durch die Lösung des Dolomitkalks in der Bodenlösung erhöht sind, ist eine Mobilisation von Nitrat (Abb. 9) und Sulfat (Abb. 10) in der Bodenlösung festzustellen. Dies sind Indikatoren für ein angeregte biologische Aktivität nach einer Kalkung im Boden (Nilsson et al. 2001, Persson et al. 2021). Organische Substanz wird vermehrt mineralisiert und in den Mineralboden eingetragen. Dies und die Aktivität tiefgrabender Regenwürmer, welche auf höhere pH Werte (>4) angewiesen sind (Persson et al. 2021) werden langfristig die Bodenqualität steigern.

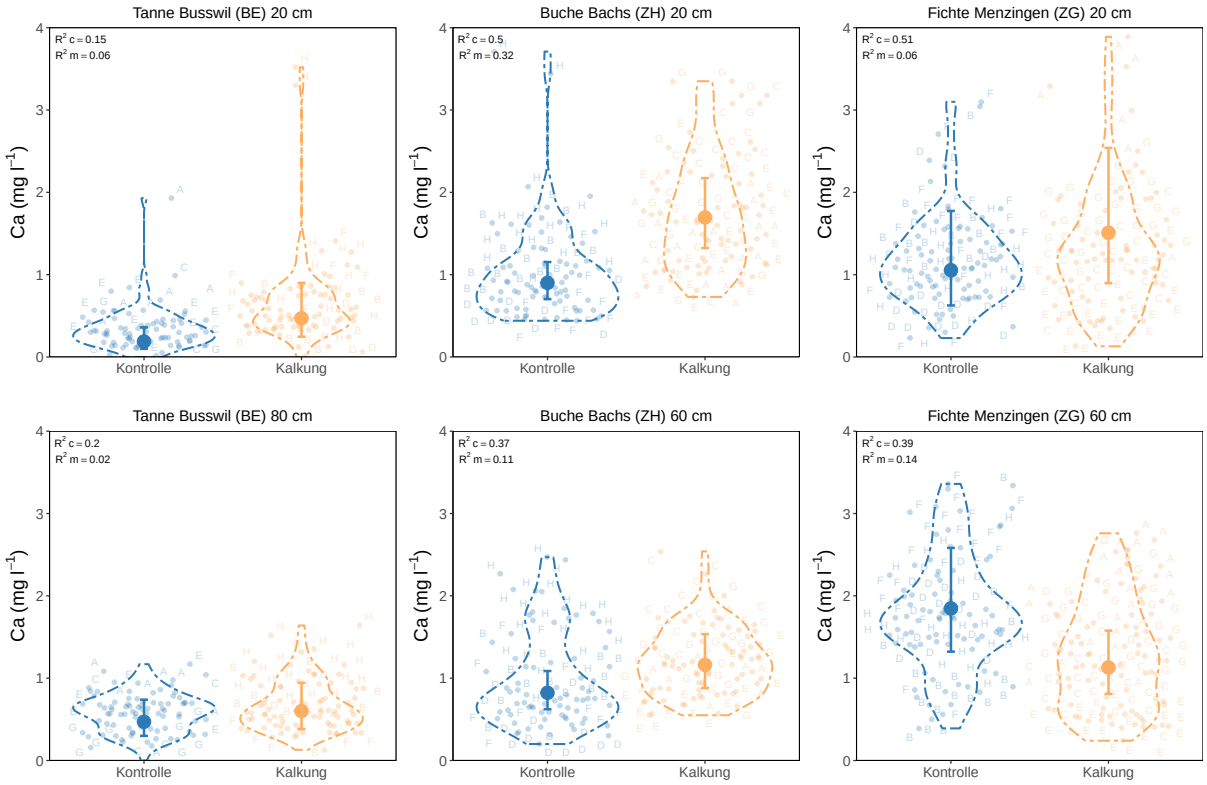


Abb. 7. Unterschiede in den Kalziumkonzentration in der Bodenlösung, 2 Jahre nach der Kalkung. Stand Januar 2023.

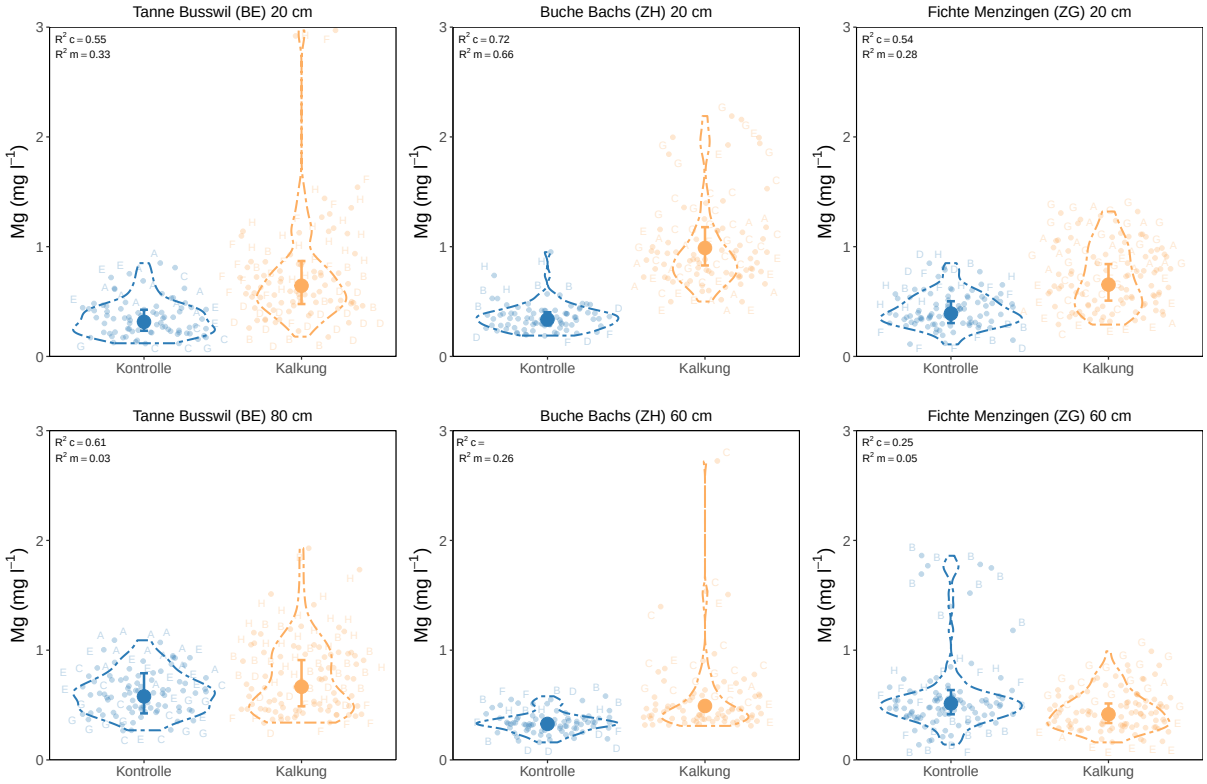


Abb. 8. Unterschiede in den Magnesiumkonzentration in der Bodenlösung, 2 Jahre nach der Kalkung. Stand Januar 2023.

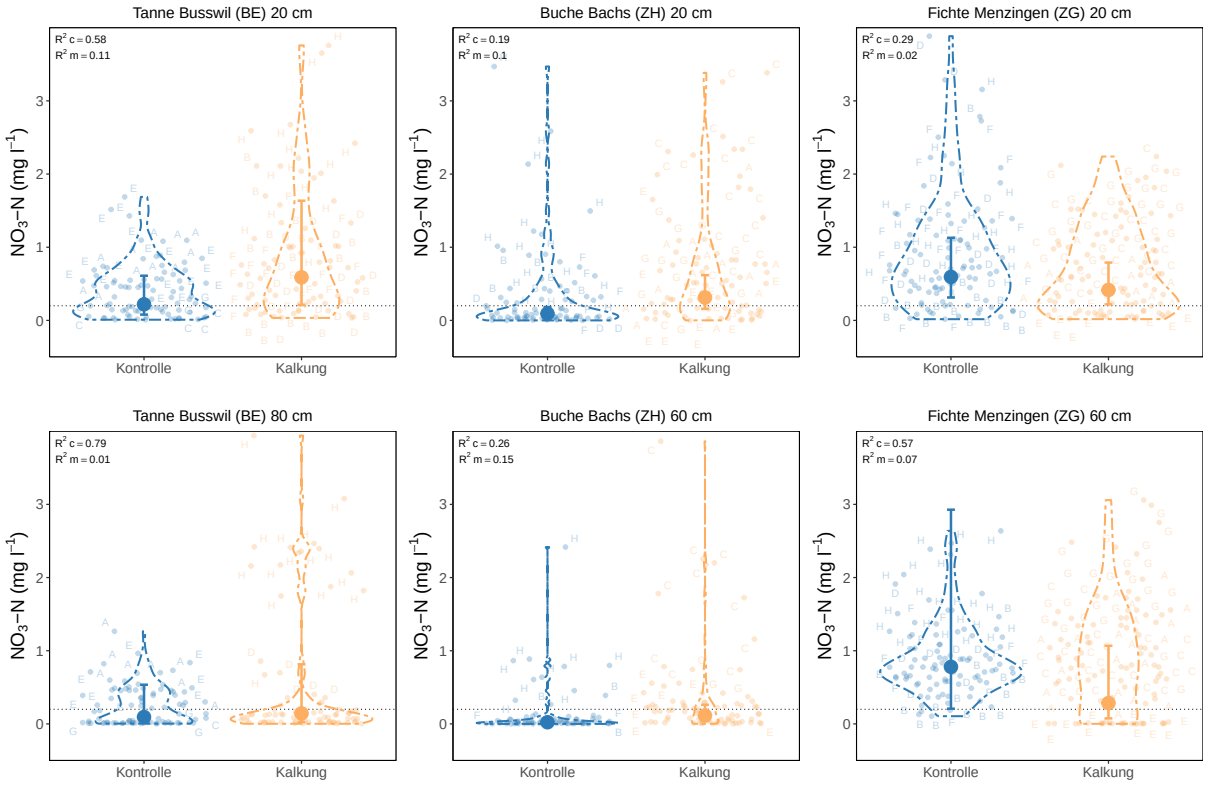


Abb. 9. Unterschiede in den Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung, 2 Jahre nach der Kalkung. Stand Januar 2023. Gestrichelte Linie: Grenzwert Ncrit = 0.2 mg/l nach CLRTAP (2004).

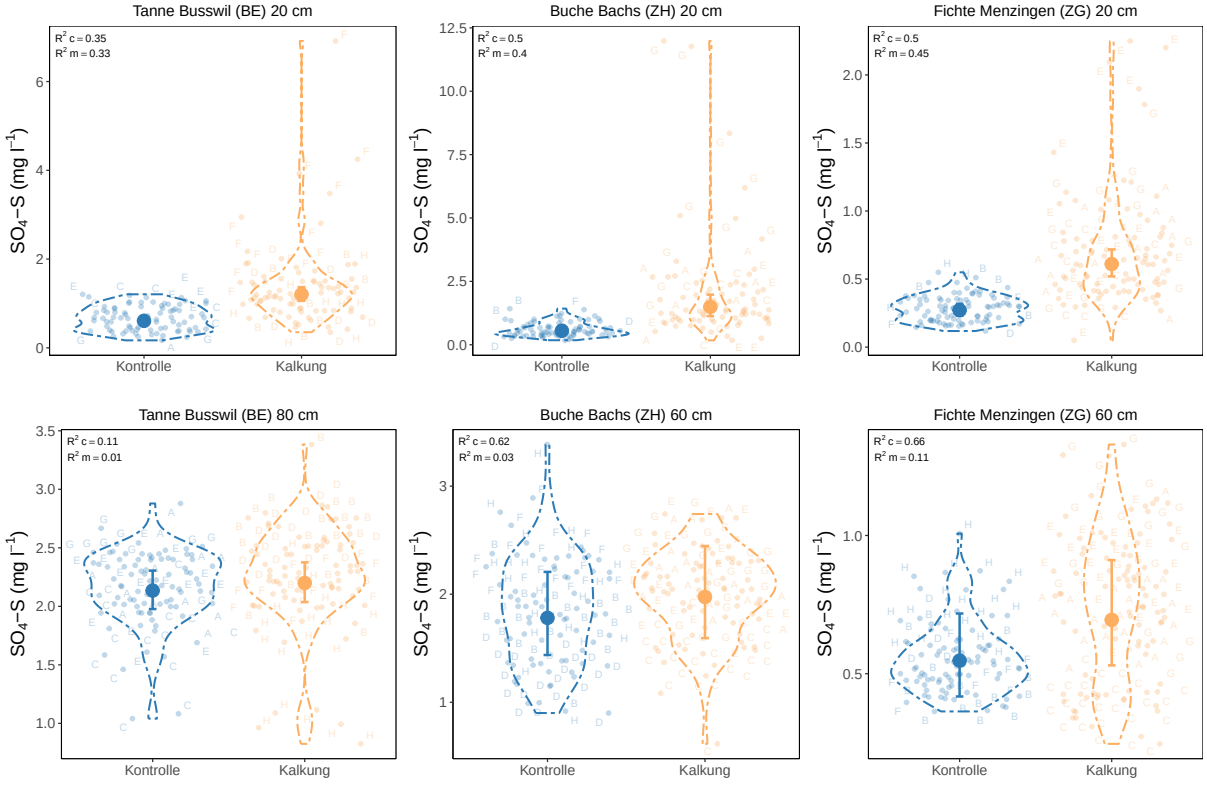


Abb. 10. Unterschiede in den Sulfatkonzentrationen in der Bodenlösung, 2 Jahre nach der Kalkung. Stand Januar 2023.

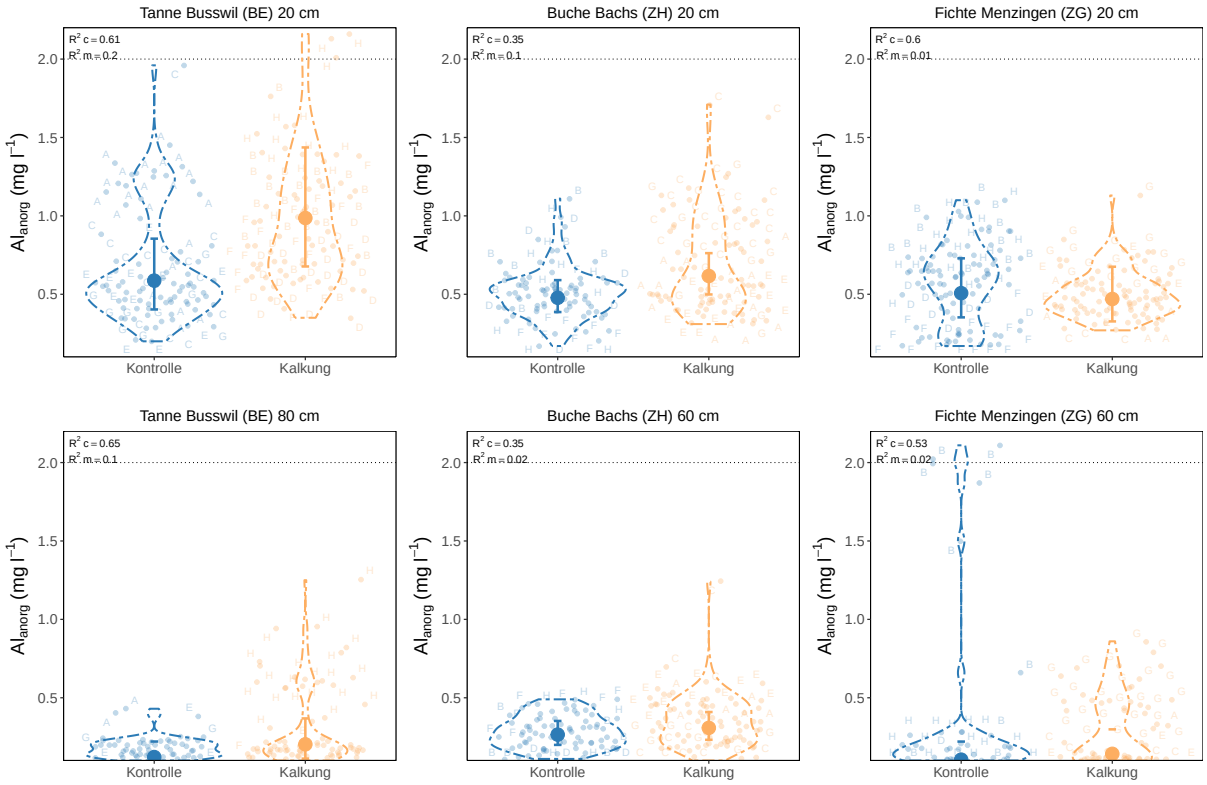


Abb. 11. Unterschiede in den Nitratkonzentrationen in der Bodenlösung, 2 Jahre nach der Kalkung. Stand Januar 2023. Gestrichelte Linie: Grenzwert Alcrit = 2 mg/l nach CLRTAP (2004).

Tab. 7. Zusammenfassung der Effekte der Kalkung im Vergleich zu den ungekalkten Kontrollparzellen zwei Jahre nach der Kalkausbringung. Gegeben sind die mittleren abgeschätzten Effekte und die 95% Vertrauensbereiche (CrI) des gemischten linearen Regressionsmodell mit dem Block design als random Effekt: $lmer(log(X) \sim Behandlung + (1|Block))$. Wenn die Effekte nicht signifikant waren so wurden sie in dieser Tabelle weggelassen.

	Tanne 20 cm	95% CrI	**Buche** 20 cm	95% CrI	**Fichte** 20 cm	95% CrI
Ca (mgl^{-1})	0.40	(0.2;0.6)	0.30	(0.2;0.3)	0.20	(0.09;0.2)
Mg (mgl^{-1})	0.30	(0.3;0.4)	0.50	(0.4;0.5)	0.20	(0.2;0.3)
K (mgl^{-1})	-0.50	(-0.6;-0.3)	0.10	(0.05;0.2)		
BC (mgl^{-1})			0.30	(0.3;0.4)	0.20	(0.1;0.2)
Al (mgl^{-1})	0.20	(0.2;0.3)	0.10	(0.07;0.2)		
BC/Al	-0.30	(-0.4;-0.2)	0.10	(0.1;0.2)	0.30	(0.2;0.3)
Mn (mgl^{-1})	0.50	(0.3;0.6)	0.10	(0.008;0.3)	-0.50	(-0.8;-0.06)
NO3 (mgl^{-1})	0.40	(0.3;0.6)	0.50	(0.3;0.8)	-0.20	(-0.3;-0.03)
SO4 (mgl^{-1})	0.30	(0.2;0.4)	0.40	(0.4;0.5)	0.40	(0.3;0.4)
pH	-0.03	(-0.04;-0.02)	-0.01	(-0.02;-0.002)	0.03	(0.02;0.04)
Azidität (%)	9.00	(6;10)	-9.00	(-10;-7)	-9.00	(-10;-7)
Alkalinität (μeql^{-1})	-0.09	(-0.1;-0.07)	-0.02	(-0.03;-0.003)	0.06	(0.04;0.08)
DOC (mgl^{-1})					0.05	(0.003;0.1)

	Tanne 80 cm	95% CrI	**Buche** 60 cm	95% CrI	**Fichte** 60 cm	95% CrI
Ca (mgl^{-1})			0.20	(0.09;0.2)	-0.20	(-0.3;-0.2)
Mg (mgl^{-1})	0.06	(0.03;0.09)	0.20	(0.1;0.2)	-0.09	(-0.1;-0.04)
K (mgl^{-1})	0.10	(0.07;0.2)	0.09	(0.02;0.2)		
BC (mgl^{-1})	0.07	(0.04;0.1)	0.10	(0.09;0.2)	-0.10	(-0.2;-0.09)
Al (mgl^{-1})	0.20	(0.2;0.3)	0.06	(0.01;0.1)	0.10	(0.04;0.2)
BC/Al	-0.20	(-0.2;-0.1)	0.08	(0.003;0.2)	-0.30	(-0.4;-0.3)
Mn (mgl^{-1})	0.30	(0.2;0.4)	0.06	(0.02;0.1)		
NO3 (mgl^{-1})	0.20	(0.06;0.3)	0.70	(0.5;1)	-0.40	(-0.6;-0.3)
SO4 (mgl^{-1})			0.04	(0.02;0.07)	0.10	(0.08;0.1)
pH	-0.02	(-0.03;-0.01)			-0.03	(-0.04;-0.02)
Azidität (%)	5.00	(3;7)			6.00	(4;8)
Alkalinität (μeql^{-1})	-0.02	(-0.03;-0.01)	-0.01	(-0.02;-0.005)	-0.07	(-0.1;-0.05)
DOC (mgl^{-1})						

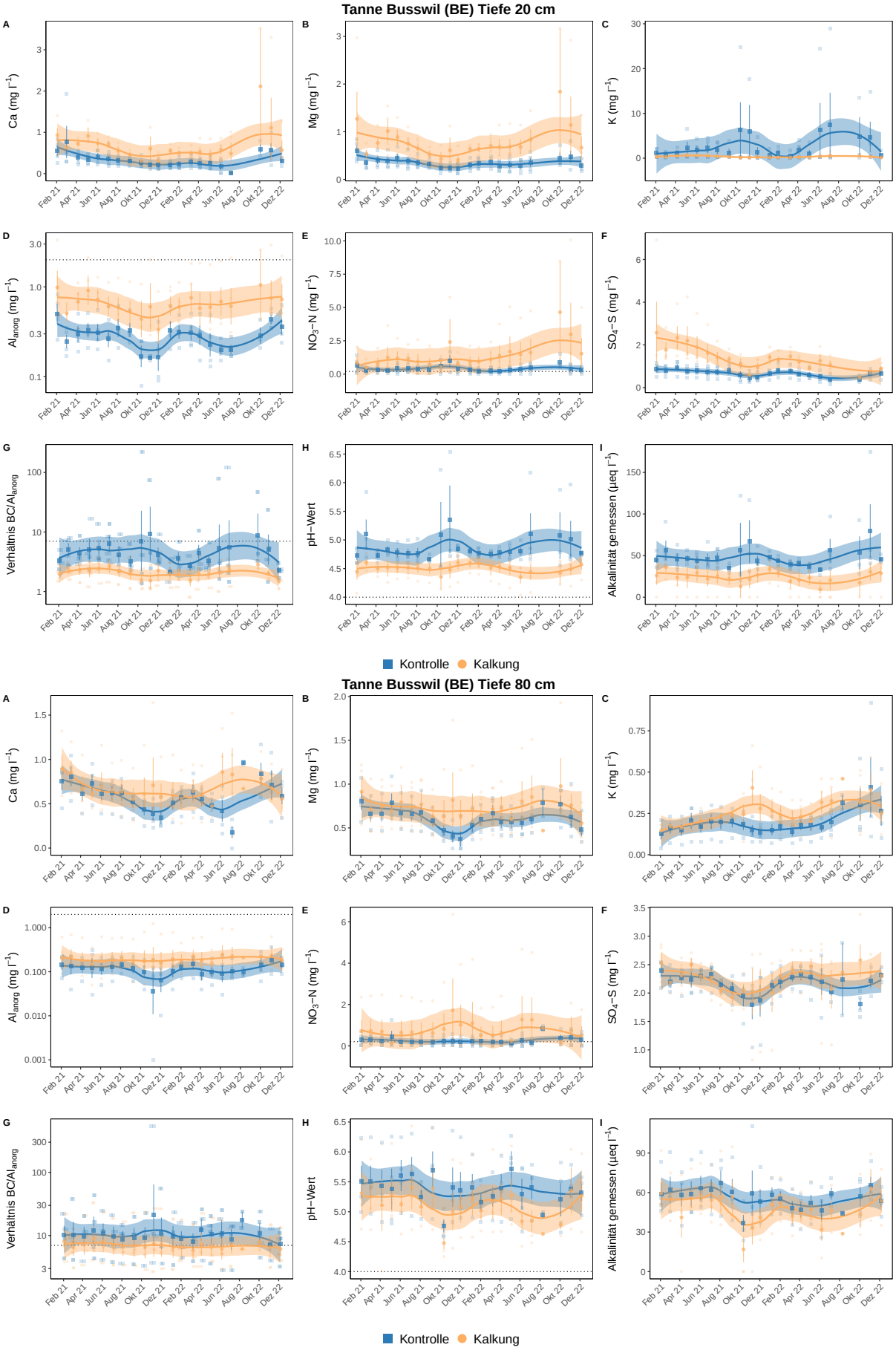


Abb. 12. Zeitliche Entwicklung von ausgewählten Indikatoren der chemischen Bodenqualität in der Bodenlösung der Tannenfläche. Stand Januar 2023.

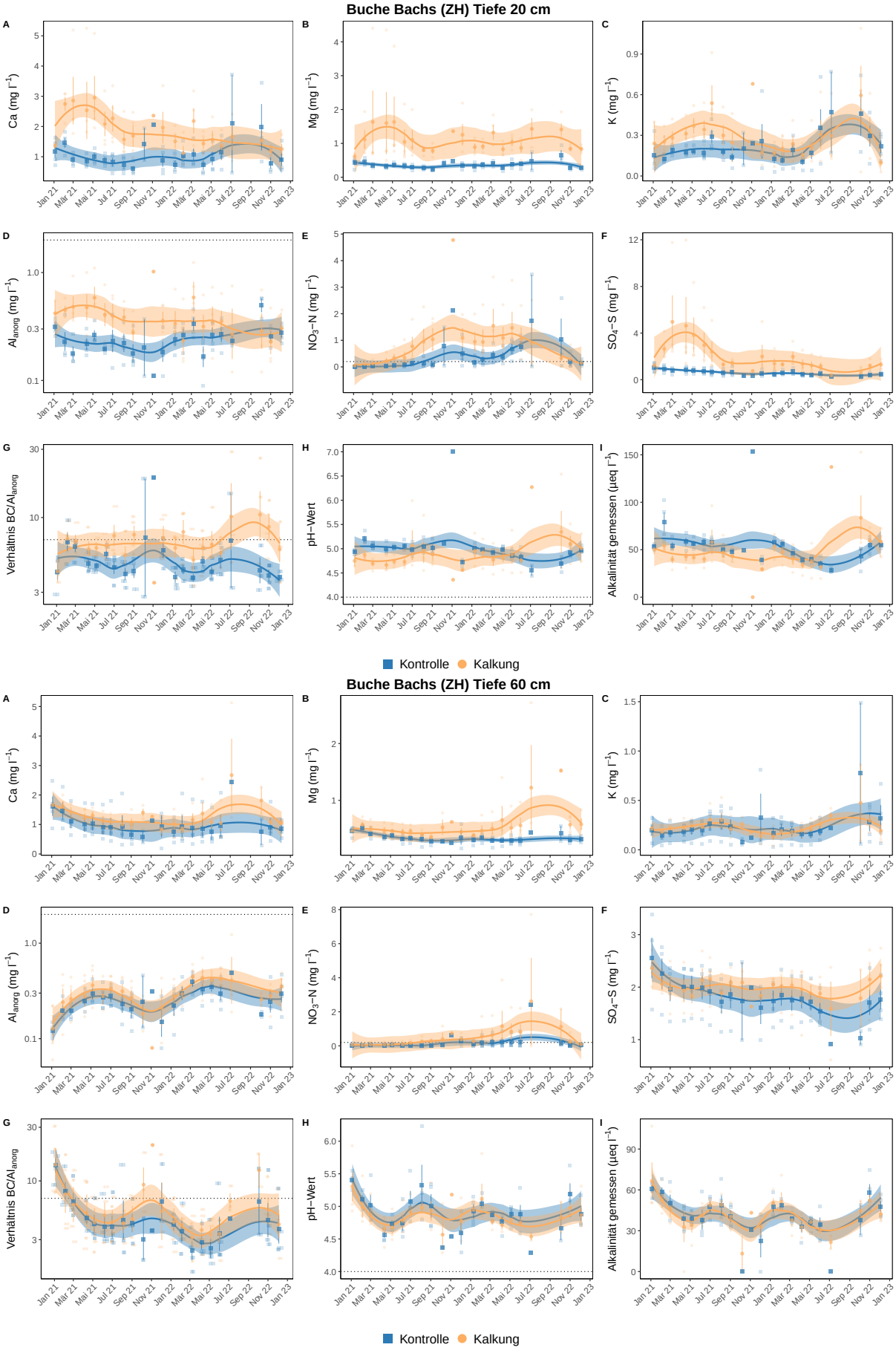


Abb. 13. Zeitliche Entwicklung von ausgewählten Indikatoren der chemischen Bodenqualität in der Bodenlösung der Buchenfläche. Stand Januar 2023.

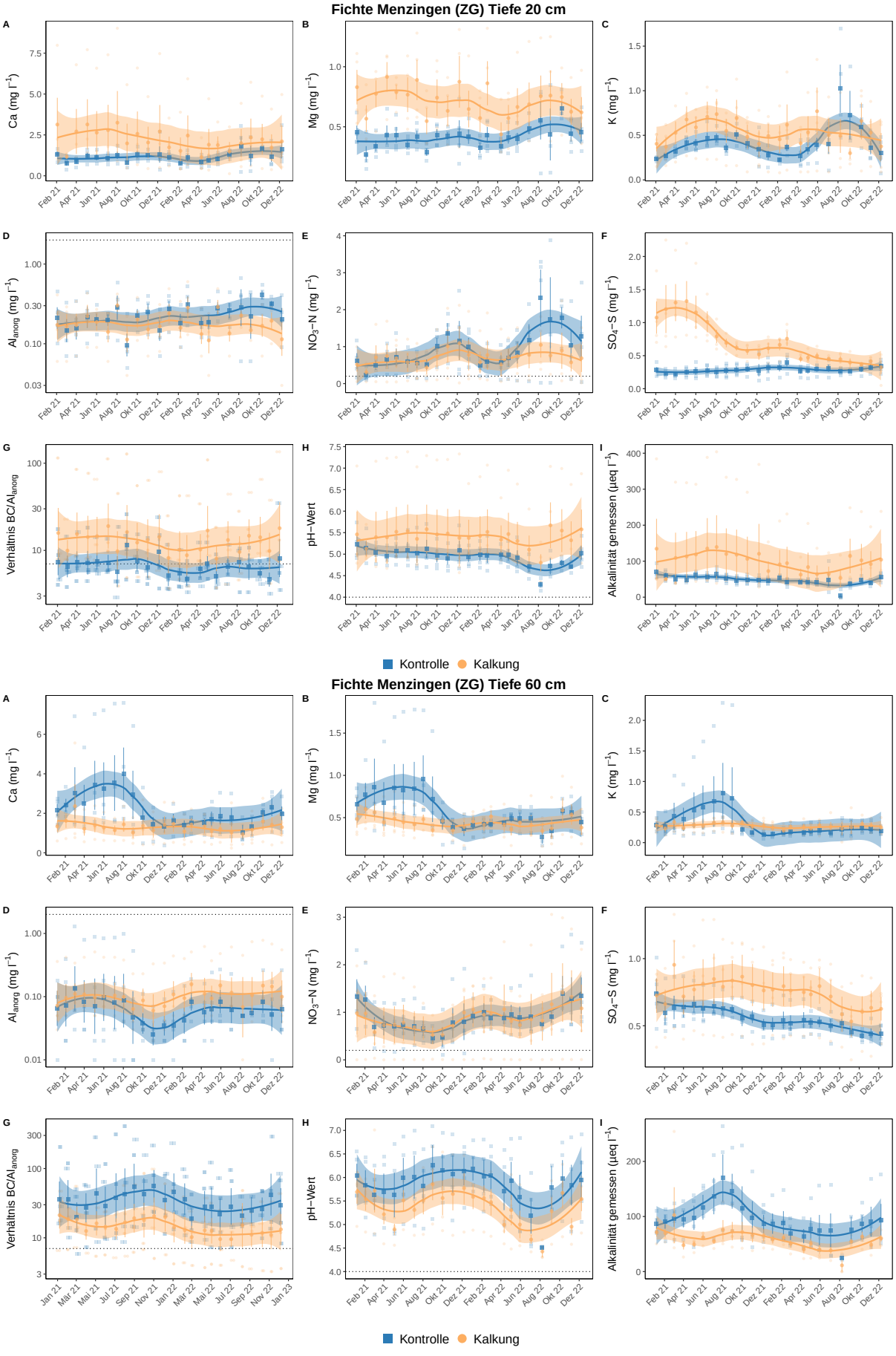


Abb. 14. Zeitliche Entwicklung von ausgewählten Indikatoren der chemischen Bodenqualität in der Bodenlösung der Fichtenfläche. Stand Januar 2023.

3.2.2 Auswaschungsraten von basischen Kationen, Aluminium und Stickstoff

Die Jahresfrachten werden durch die Berechnung des täglichen Wasserflusses (runoff) mit dem hydrologischen Modell (WASIM-ETH, Schulla (2019)) und der anschliessenden Multiplikation mit der in der Bodenlösung gemessenen Konzentration der jeweils tiefsten Lysimetermessung berechnet. Die Summe dieser Elementflüsse pro Jahr ergeben dann die Jahresfrachten.

Die Jahresfrachten sind in der Abb. 16 dargestellt. Interessante Unterschiede zwischen Kalkung und Kontrolle ergeben sich bisher in der Buchenfläche Bachs. Dort stieg die Jahresfracht von basischen Kationen vom 2021 zum 2022 bei den gekalkten Parzellen im Vergleich zur Kontrolle an. Dies deckt sich mit den zeitlichen Verläufen der Elementkonzentrationen von Mg und Ca auf der Fläche Bachs in der Tiefe 60 cm. Allgemein sind die Unterschiede in den Jahresfrachtberechnungen jedoch noch sehr klein und statistisch nicht signifikant unterschiedlich. Die Weiterführung der Messzeitreihe wird zeigen ob sich die Bodenlösung noch verändern wird.

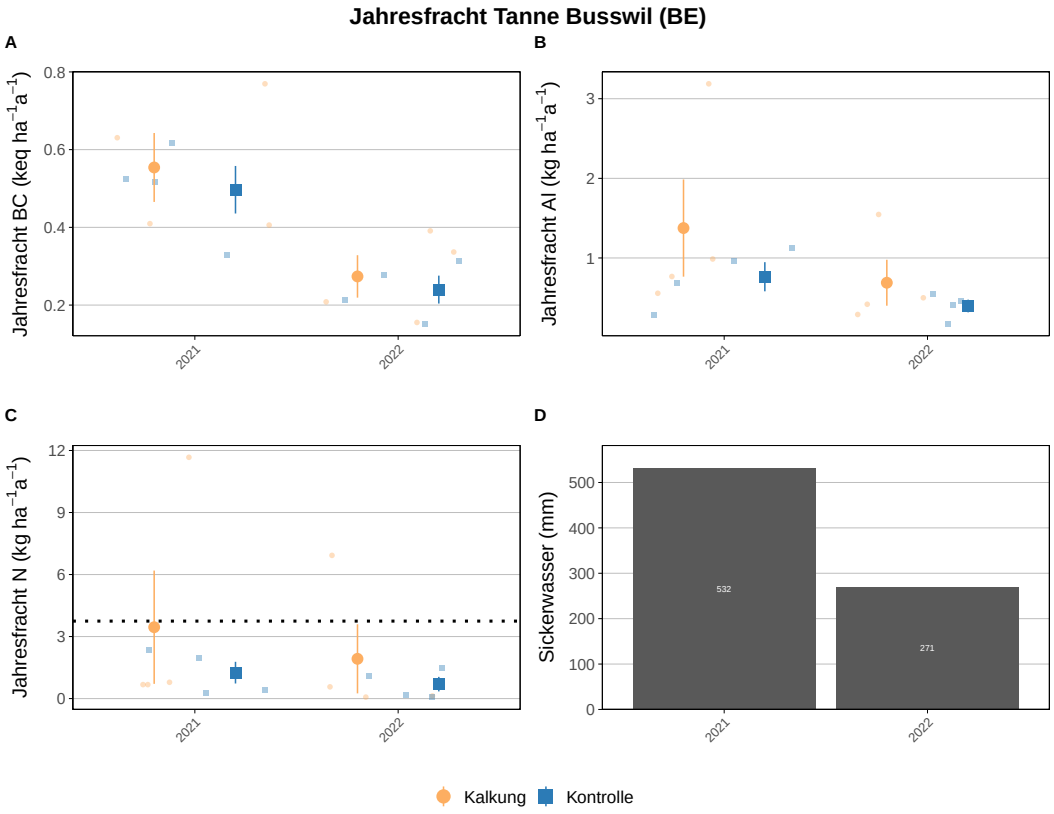
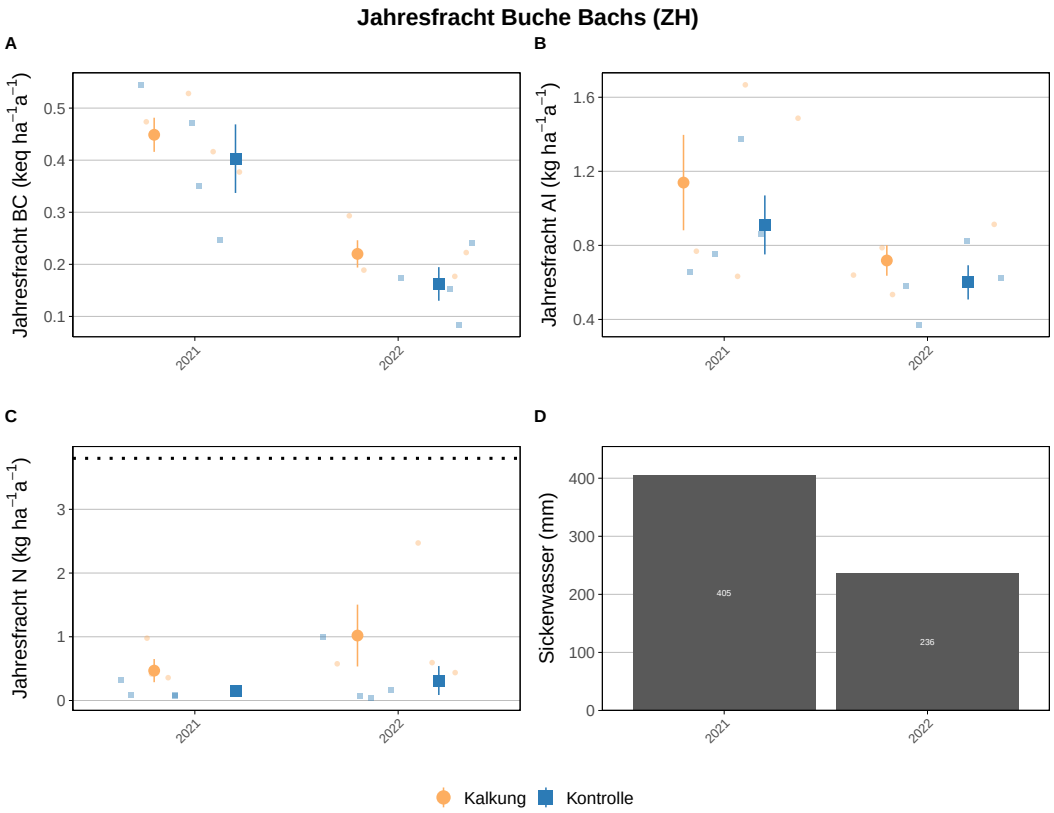


Abb. 15. Jährliche Frachten in der Bodenlösung in Busswil berechnet jeweils mit gemessenen Elementkonzentrationen aus dem tiefsten Lysimeter (80 cm). A) basische Kationen B) Aluminium, C) N-Fracht mit dem Grenzwert für N-Auswaschung als Punktlinie (500 m = 4, 1500 m = 2, dazwischen mit linearem Gradienten von 4-2 kg N $ha^{-1}a^{-1}$, D) Sickerwassermenge.



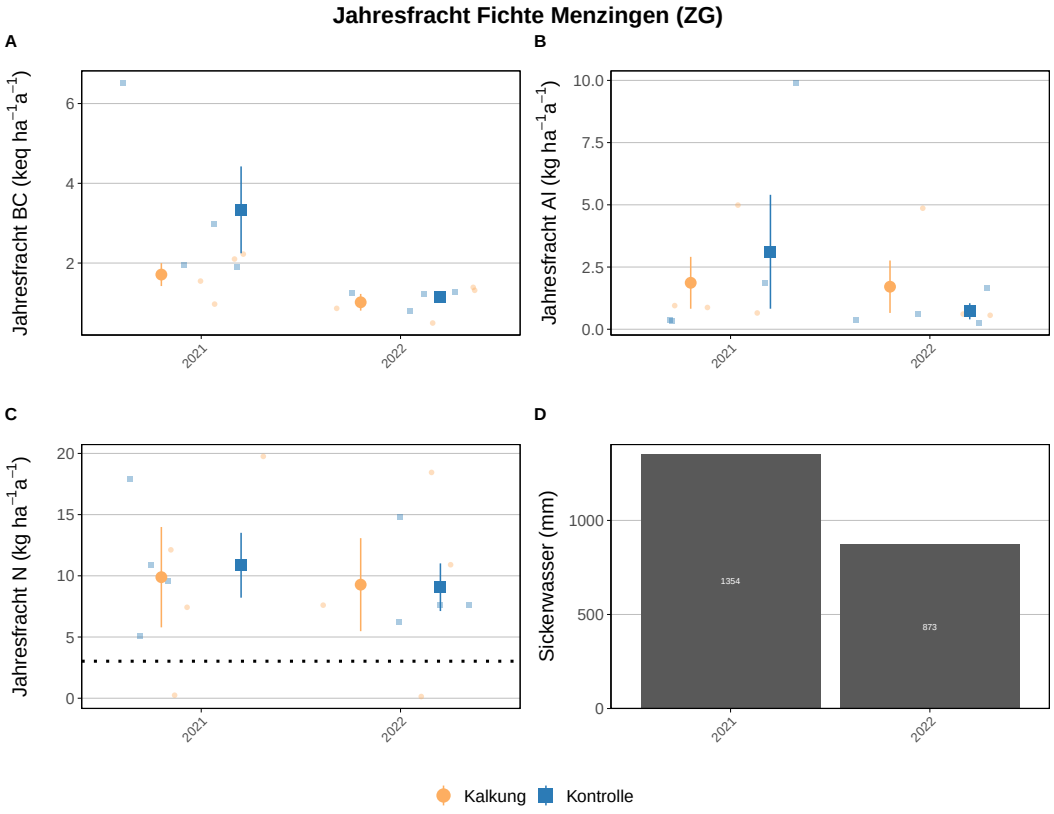


Abb. 16. Jährliche Frachten in der Bodenlösung in Bachs (oben) und Menzingen (unten) berechnet jeweils mit gemessenen Elementkonzentrationen aus dem tiefsten Lysimeter (60 cm). A) basische Kationen B) Aluminium, C) N-Fracht mit dem Grenzwert für N-Auswaschung als Punktlinie (500 m = 4, 1500 m = 2, dazwischen mit linearem Gradienten von 4-2 kg N $ha^{-1}a^{-1}$, D) Sickerwassermenge.

3.3 Blatt- / Nadel-Elementgehalte

Die Abb. 18 - Abb. 20 zeigen die Nährstoffgehalte der einzelnen Baumarten vor der Kalkung. Sie werden mit den Werten für eine ausgewogene Ernährung nach Göttlein (2016) verglichen. Gruppiert sind sie bereits nach dem zukünftigen Behandlungstypen. Eine weitere Probenernte ist für Sommer 2023 geplant.

Bei den Tannen in Busswil liegen die Nadelkonzentrationen für Phosphor deutlich und für Kalium leicht unter dem Grenzwert für eine ausgewogene Ernährung (Abb. 18). Das N:P-Verhältnis ist sehr hoch.

Die Fichten in Menzingen weisen beim Phosphor einen sehr starken, beim Stickstoff einen leichten Mangel auf (Abb. 19). Das N:P-Verhältnis ist aber hoch, weshalb nicht von Stickstoffmangel gesprochen werden kann. Die Magnesiumkonzentrationen liegen um den unteren Grenzwert herum.

Auch die Buchen in Bachs weisen Defizite bei Phosphor und Magnesium auf (Abb. 20).



Abb. 17. Gipfeltrieb von einer Tanne aus der Parzelle A (Kontrolle) in Busswil (BE). Die gelb verfärbten Nadelspitzen weisen auf einen K-Mangel hin (Kaliumgehalt der Probe: 1.42 mg g^{-1} TS).

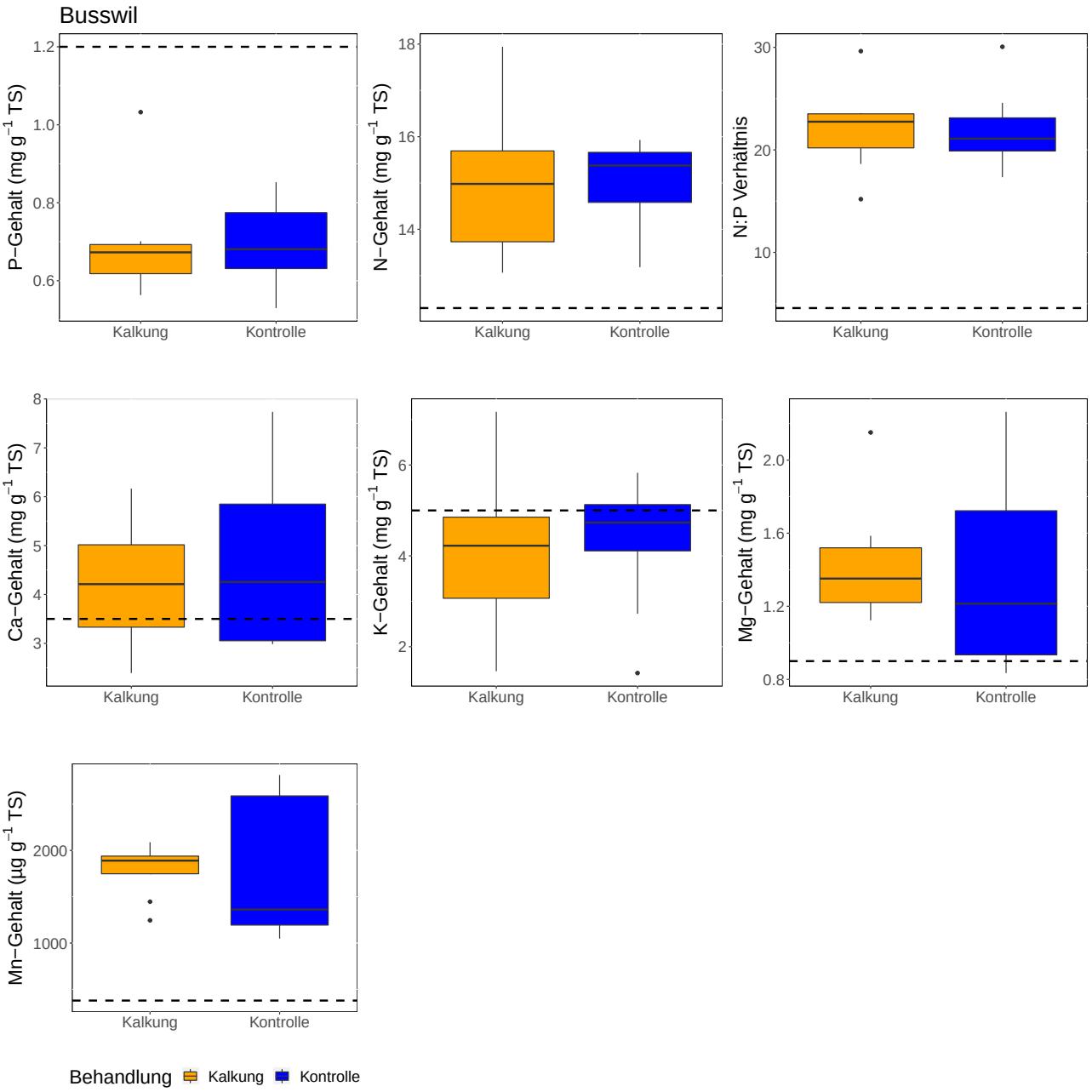


Abb. 18. Nährstoffgehalte der Tannennadeln von Gipfeltrieben aus Busswil, getrennt nach Behandlungstyp. Gestrichelte Linie = Untere Grenzwerte der Nährstoffgehalte für eine optimale Ernährung nach Göttlein (2016).

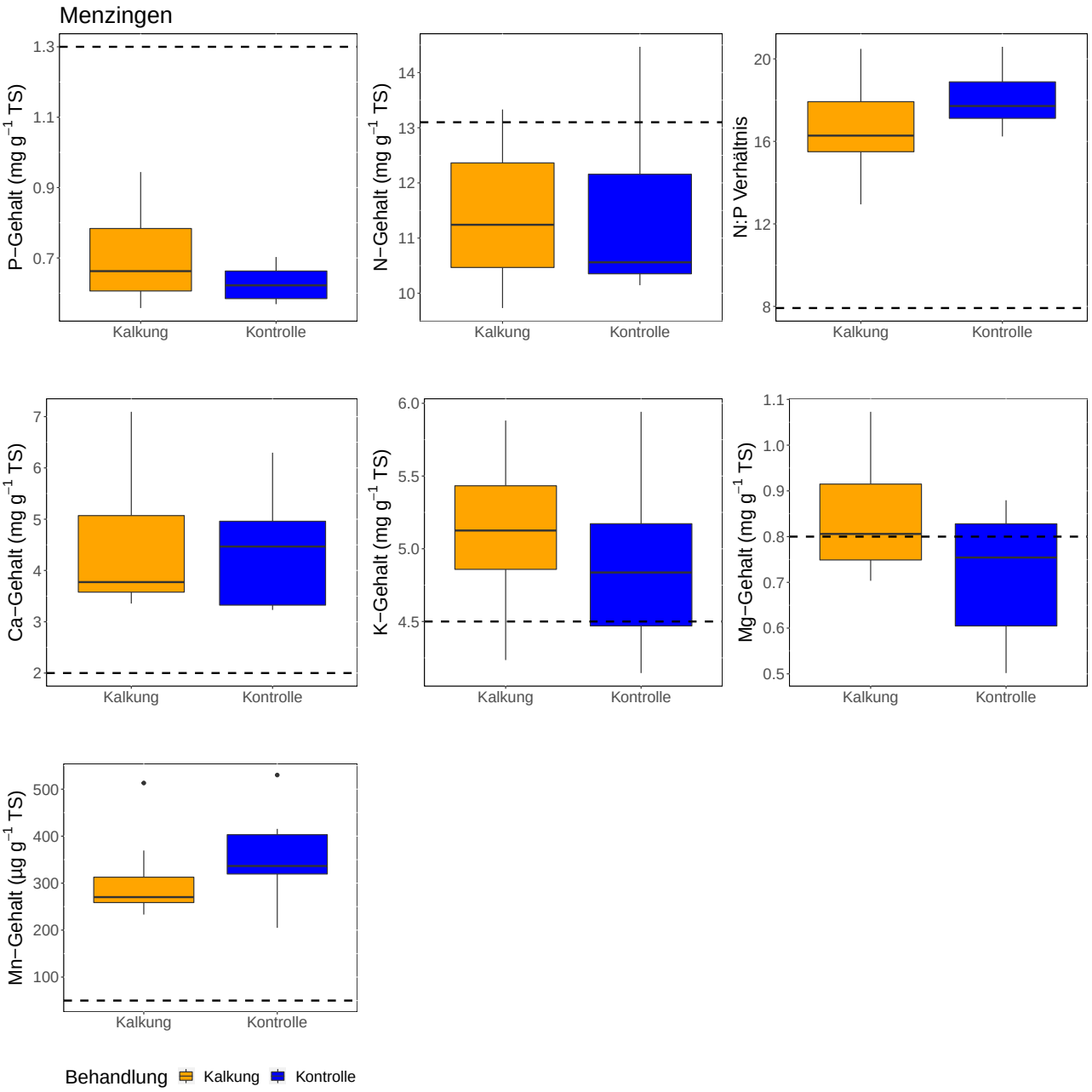


Abb. 19. Nährstoffgehalte der Fichtennadeln von Gipfeltrieben aus Menzingen, getrennt nach Behandlungstyp. Gestrichelte Linie = Untere Grenzwerte der Nährstoffgehalte für eine optimale Ernährung nach Göttlein (2016).

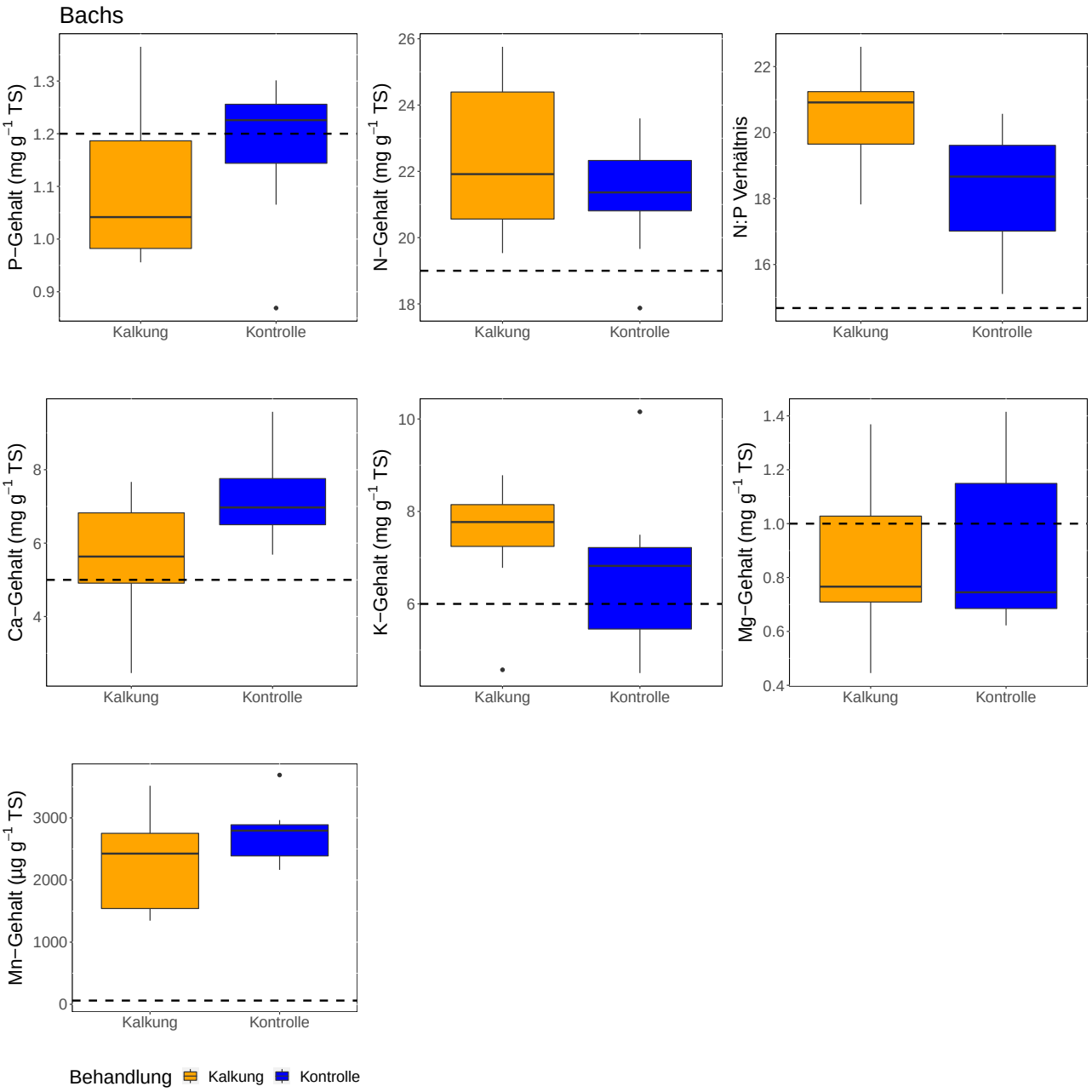


Abb. 20. Nährstoffgehalte der Buchenblätter von Gipfeltrieben aus Bachs, getrennt nach Behandlungstyp. Gestrichelte Linie = Untere Grenzwerte der Nährstoffgehalte für eine optimale Ernährung nach Göttlein (2016).

3.4 Streufall

Streufall ist weder ein Nährstoffeintrag noch ein Austrag, sondern ein Recyclingfluss. Um die Grössenordnungen darzustellen, wurde der Nährstofffluss in der Streu in Beziehung gesetzt zu den Frachten in der Auswaschung und der Deposition aus der Luft (Abb. 21). Noch nicht berücksichtigt sind in diesem Vergleich der Eintrag durch Verwitterung und der Nährstoffverlust durch Entzug. Beim Phosphor sind weder Eintrag über die Deposition noch Austrag über die Bodenlösung bekannt. Die tiefe P-Fracht in der Streu von Menzingen ist bemerkenswert, sie stimmt nicht mit den Konzentrationen im Laub überein. Bei den basischen Kationen fällt der hohe Fluss durch Einträge in Menzingen auf. Dieser ist bedingt durch die hohe Niederschlagsrate (Nassdeposition). Bei Mg ist die Deposition an allen drei Standorten die höchste Fracht.

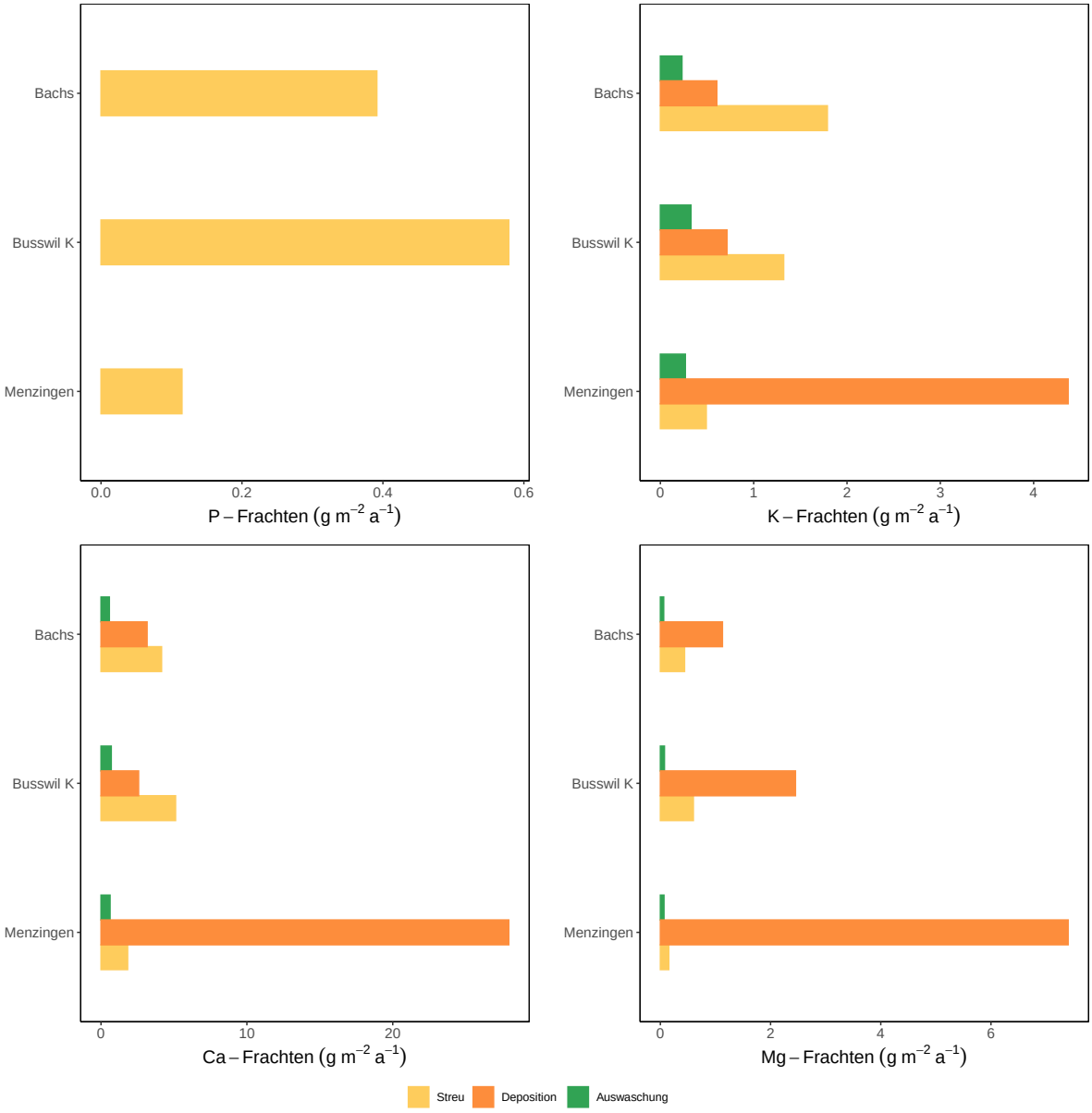


Abb. 21. Frachten von P, K, Ca und Mg in Streufall, Deposition und Auswaschung. Datengrundlage der Streu Mittelwerte 2020-2022 und bei der Auswaschung Mittelwerte 2020-2022. Deposition: Modell Meteotest.

3.5 Bodeneigenschaften

Bodenprofile

Die bodenkundlichen Aufnahmen wurden falls nicht anders angegeben nach der KA5 (Eckelmann et al. 2005) gemacht. Die Bodenprofile mit Angaben zur nutzbaren Feldkapazität (nFK), des Wurzelraums, Bodenform, Bodenart (Feldaufnahme), Humusform, Durchwurzelungstiefe, Geologie (Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000), Vernässung, Luftkapazität, pH, Basensättigung, Porenverteilung, Skelettgehalt, Humusgehalt, Lagerungsdichte und C/N-Verhältnis der Bodenauflage sind in den 8 Bodenprofilen pro Untersuchungsfläche angegeben (Anhang D).

Basensättigung

Die Basensättigung der Bodenmischproben welche vor der Kalkung genommen wurden, zeigen einen typischen Verlauf mit der Bodentiefe bei stark versauerten Waldstandorten. Höhere Basensättigungswerte > 15% finden sich in den Auflagehorizonten und dann wieder in den tiefsten Horizonten (SdBt, BtCv, CvBv, BvCv, Abb. 22). Da die Messung vor der Kalkung gemacht wurden, kann nur darauf geschlossen werden, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den später gekalkten und den Kontrollflächen besteht. Die grösste Streuung in der Basensättigung wurde in der Fläche Menzingen gefunden. Dort sind vor allem die Parzellen A und D (siehe Ausreisserpunkte in Abb. 22) sowie in der organischen Auflage von E und G basenreichere Bodenmischproben gemessen worden. Die Bodenhorizonte waren auf dieser Fläche auch nicht so einheitlich wie bei den anderen beiden Flächen. Die genaue Profilabfolge pro Parzelle ist in Anhang D ersichtlich. Die Geologie ist granitische Molasse für alle Parzellen aber die Bodenformen sind unterschiedlich für A-D: Psuedogley-Parabraunerde, E: Parabraunerde-Pseudogley, F-H: Pseudogley-Braunerde. Das Untersuchungsgebiet weisst auch eine deutliche Hangneigung (15-22°) auf. Damit verbunden sind natürlich auch Rutschungen und Bodenverfrachtungen welche zu Heterogenitäten im Boden führen. Die unterschiedlichen Bodenformen widerspiegeln auch die unterschiedlichen Waldgesellschaften der Parzellen (Anhang B), welche grob eingeteilt NaiS 19 (Waldsimsen-Ta-Bu-Wald) für G und H sind, Nais 8* (Waldhirsen-Bu-Wald mit Rippenfarn) für A-D sowie 8a (Typ. Waldhirsen-Bu-Wald) für E und F, welches im Ökogramm als weniger sauer beschrieben wird (Frehner et al. 2005).

Korngrössenanalyse

Im Korngrössendreieck wird ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen den Parzellen vor allem auf dem Sandgehalt basieren. Bei der Buchenfläche sind die Korngrössen aller Parzellen sehr nahe bei einander. Der Ausreisser mit viel Schluff ist die Probe aus Parzelle H mit der Bodentiefe von 110 cm. Bei der Fichtenfläche ist die Variation im Sandgehalt ein wenig grösser zwischen den Parzellen. Die Probe welche am meisten Sand aufweisen liegen in den tieferen Bodenschichten. Dies gilt auch für die Tannenfläche (Abb. 23).

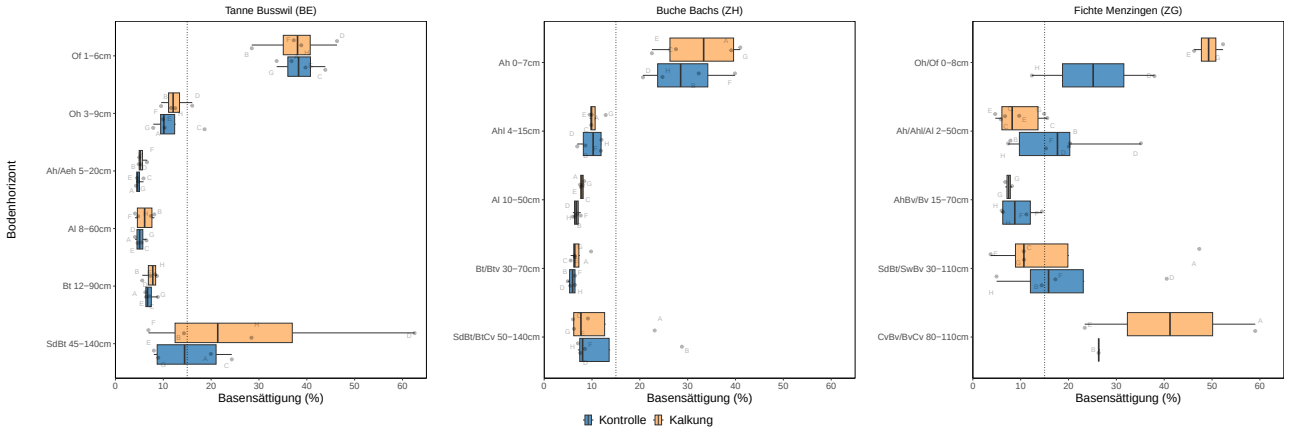
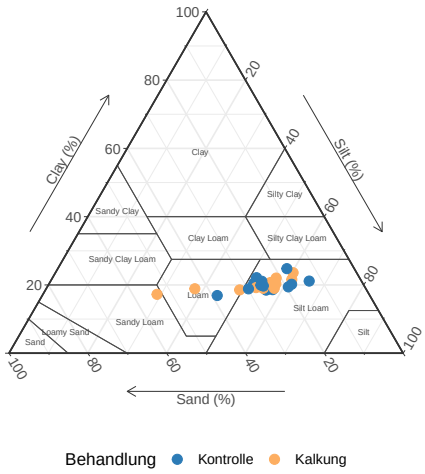
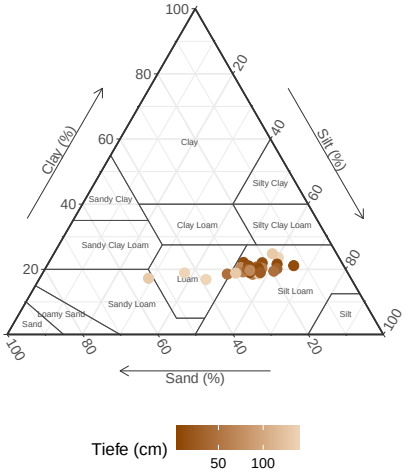


Abb. 22. Basensättigung nach Bodenhorizont gemessen in den Bodenmischproben vor der Bodenschutzkalkung.

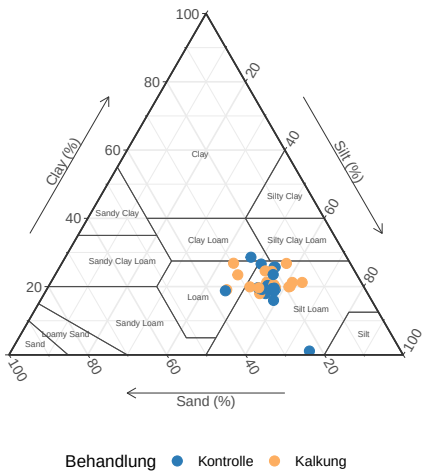
Tanne Busswil (BE)
Soil texture diagram (USDA classification)



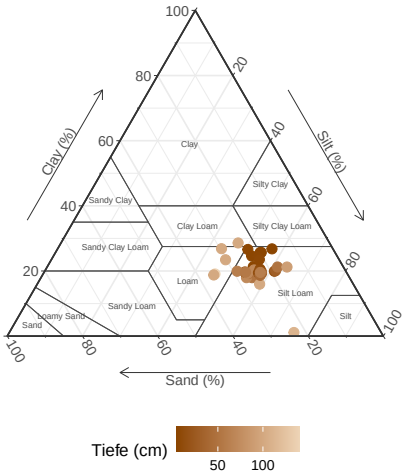
Tanne Busswil (BE)
Soil texture diagram (USDA classification)



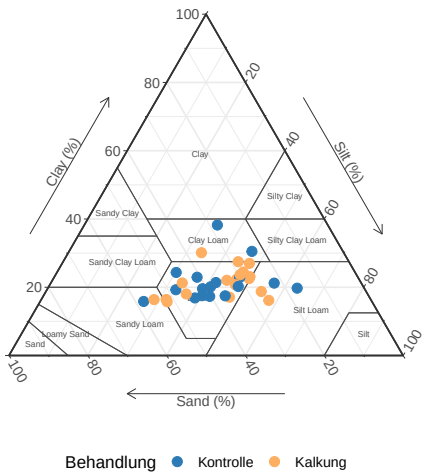
Buche Bachs (ZH)
Soil texture diagram (USDA classification)



Buche Bachs (ZH)
Soil texture diagram (USDA classification)



Fichte Menzingen (ZG)
Soil texture diagram (USDA classification)



Fichte Menzingen (ZG)
Soil texture diagram (USDA classification)

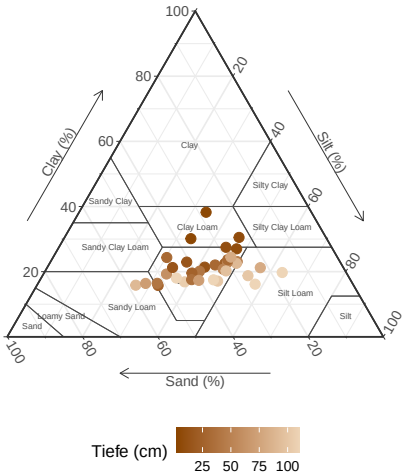


Abb. 23. Korngrössenverteilung in allen Flächen im Korngrössendreieck nach USDA Klassifikation.

3.6 Stammzuwachs

Mit dem Ablesen der Zuwachsmessbänder im November 2022 konnte das dritte Jahr für die Zuwachsmessung abgeschlossen werden. Auf Grund der sehr kurzen Zeitspanne sollten noch keine Schlüsse aus den Daten gezogen werden. Zur besseren Interpretation wurden die Messwerte in Grundflächen umgerechnet (Abb. 24). Trotz der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen in den drei Messjahren unterscheiden sich die mittleren Wachstumsraten nicht stark.

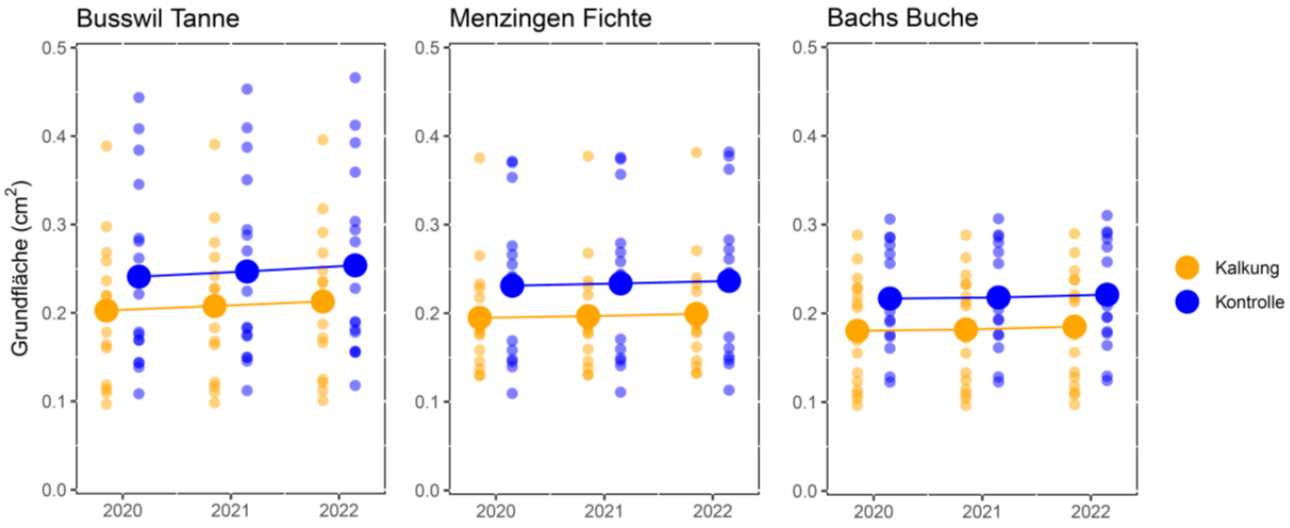


Abb. 24. Grundflächenzuwachs von 2020 bis 2022, aufgeteilt nach Baumart und Behandlungstyp. Kleine Punkte = Grundflächen der einzelnen Bäume, grosse Punkte = Mittelwert über den Behandlungstyp.

Vollkluppierung

Neben den Zuwachsmessungen mittels Zuwachsmessbänder wurde beim Einrichten der Versuchsflächen auch der Durchmesser aller nummerierten Bäume mit einer Kluppe auf 1.3 m über Boden gemessen. Daraus wurde die Grundfläche pro Parzelle und Versuchsfläche berechnet (Tab. 8).

Tab. 8. Übersicht zu den Grundflächen pro Hektar, nach Parzelle getrennt. Daten der Vollkluppierung bei der Erstaufnahme im 2020.

Standort	Parzelle	Grundfläche m^2 pro ha
Busswil	A	26.15
	B	31.25
	C	20.88
	D	38.79
	E	20.60
	F	27.69
	G	20.43
	H	19.57
Mittelwert		24.95
Menzingen	A	41.86
	B	50.96
	C	44.32
	D	42.14
	E	28.35
	F	28.35
	G	32.72
	H	42.41
Mittelwert		37.33
Bachs	A	18.79
	B	15.31
	C	19.89
	D	23.98
	E	17.01
	F	15.43
	G	21.21
	H	19.04
Mittelwert		18.29

3.7 Vegetationsaufnahmen

Im Juni 2020 wurde auf allen Versuchsflächen pro Parzelle eine Vegetationsaufnahme nach Braun-Blanquet durchgeführt (n= 21). Allgemein sind die untersuchten Parzellen eher spärlich bedeckt, artenarm und beinhalten einige Säurezeiger (Abb. 25). Der Deckungsgrad lag für die meisten Arten bei ”selten = r” oder ”spärlich = +”.
Eine abschliessende Auswertung der Vegetationsdaten ist - bei Projektverlängerung - nach Abschluss der zweiten Aufnahme für 2026 vorgesehen. Eine frühere Wiederholung der Aufnahmen macht nach aktuellen Einschätzungen keinen Sinn. Zum einen sind in der Bodenlösung noch keine grösseren Veränderungen der Bodenchemie zu sehen, zum andern verändert sich die Vegetation nur sehr langsam und ist dabei auch durch die Lichtverhältnisse und Konkurrenz in der Kraut- und Strauchschickt beeinflusst. Ersteres könnte ein beeinträchtigender Faktor in den eher dunklen Buchenbeständen in Bachs und Tannenbeständen von Busswil sein. Letzteres dürfte gerade in den z.T. stark von Brombeeren dominierten Beständen in Busswil und Menzingen ein Hindernis für das vermehrte Aufkommen anderer Arten, sowie dem Ankommen neuer Arten sein.
Nachstehend werden die Auswertungen der Erstaufnahme gezeigt. Die Berechnung der gemittelten Zeigerwerte erfolgte ohne Einbezug der Brombeere, da diese nicht bis auf die Art bestimmt werden konnte. Der Versuch einer Artbestimmung der vorhandenen Brombeeren im Sommer 2022 war nicht erfolgreich. Die Brombeere wird somit nur in die Auswertungen über Artenreichtum, -Verteilung und Deckung einbezogen. Ihr jeweiliger Anteil an der Deckung wird zudem separat ausgewiesen.



Abb. 25. Häufig vorkommende Säurezeiger: Schönes Wiedertonmoos (*Polytrichum formosum*, ob. li.), Breitblättriger Dornfarn (*Dryopteris dilatata*, ob. re.), Hainsimse (*Luzula sylvatica*, unt. li.), Heidelbeere (*Vaccinum myrtillus*, unt. re.) .

Wo das Sonnenlicht auf den Boden kam, dominierte in **Busswil** die Brombeere. In den schattigeren Parzellen waren es vor allem die Moose, welche höhere Deckungsgrade erreichten (Abb. 26). In allen Parzellen war das Schöne Wiedertonmoos als Säurezeiger mit Deckungsgraden von 1-3 vorhanden. Mit Ausnahme der Parzelle D war auch die Heidelbeere mit ”r” bis 1 vertreten. Als leichter Säurezeiger war der breitblättrige Dornfarn mit ”r” bis 2 zu finden. Mit insgesamt 28 Arten ist Busswil die artenärmste Fläche. Die Krautschicht weist auf einen trockenen und sehr stark sauren Standort hin (Abb. 27, Tab. 9).



Abb. 26. Überblick Parzelle F der Tannenfläche in Busswil (BE, 18.06.2020).

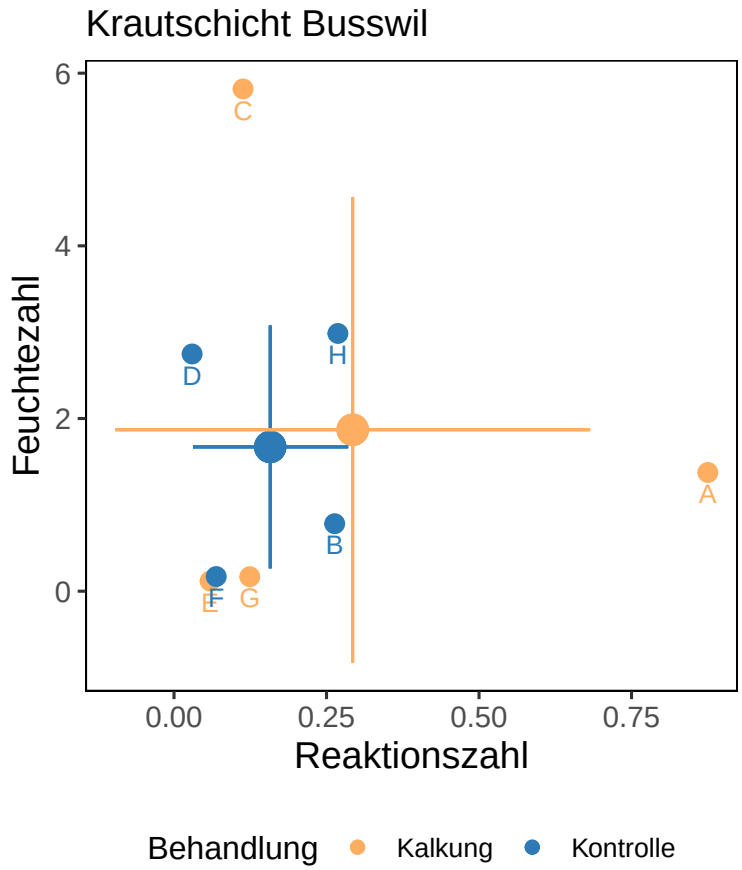


Abb. 27. Ökogramm der Krautschicht in Busswil, nach Parzellen (Punkte) und als Mittelwert mit Standardabweichung nach Behandlungstyp dargestellt.

Tab. 9. Kennzahlen der Krautschichtauswertung von Busswil (BE).

Parzelle	Behandlung	Shannon	Evenness	Deckung (%)	Anzahl Arten	Anteil Brombeere (%)
A	Kalkung	0.14	0.07	38.3	7	97.91
B	Kontrolle	1.37	0.66	39.3	8	38.17
C	Kalkung	0.57	0.25	78.4	10	79.72
D	Kontrolle	1.25	0.54	36.7	10	8.17
E	Kalkung	0.62	0.35	18.6	6	0
F	Kontrolle	0.70	0.34	53.4	8	70.22
G	Kalkung	0.39	0.18	16.1	9	0
H	Kontrolle	1.10	0.61	6.7	6	0

Parzelle	Behandlung	Feuchtezahl	Reaktionszahl	Nährstoffzahl
A	Kalkung	1.4	0.9	1.8
B	Kontrolle	0.8	0.3	1.3
C	Kalkung	5.8	0.1	6.8
D	Kontrolle	2.7	0.0	3.2
E	Kalkung	0.1	0.1	0.2
F	Kontrolle	0.2	0.1	0.2
G	Kalkung	0.2	0.1	0.2
H	Kontrolle	3.0	0.3	3.5

Der Bestand in **Menzingen** wurde vor dem Einrichten des Versuchs noch durchforstet (Abb. 28). Wie sich die Vegetation auch aufgrund der neuen Lichtsituation entwickelt, wird sich in den kommenden Jahren zeigen. Es bleibt zu hoffen, dass sich die Brombeere, welche bereits jetzt dominiert, trotz der besseren Lichtverhältnisse nicht zu sehr ausbreitet. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen gab es stellenweise bereits gute Fichten- und Tannenverjüngung in der Krautschicht. Insgesamt wurden 43 Arten gefunden und bestimmt. Somit ist Menzingen auch die Fläche mit den meisten Arten. Die Arten sind jedoch ungleichmässig über die Aufnahmetransekte verteilt, was zu einer tiefen Evenness führt (Tab. 10). Die aller meisten Arten wiesen einen Deckungsgrad von ”r” oder ”+” auf. Die Hainsimse als starker Säurezeiger war in allen acht Parzellen mit einem Deckungsgrad von ”r” bis ”2” vertreten. Ebenfalls war die Heidelbeere in allen Parzellen von ”r” bis ”2”, in Parzelle F gar bis ”3” als Säurezeiger vertreten. Die Krautschicht weist auf einen sehr trockenen und stark sauren Standort hin (Abb. 29, Tab. 10).



Abb. 28. Überblick Parzelle B in der Fichtenfläche Menzingen (ZG, 19.06.2020).

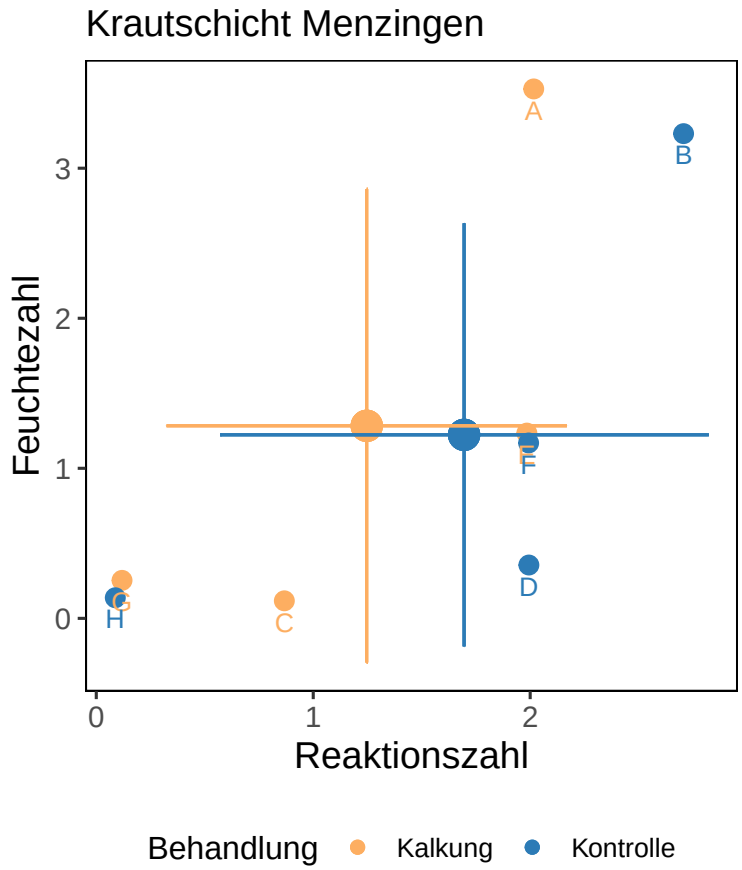


Abb. 29. Ökogramm der Krautschicht in Menzingen, nach Parzellen (Punkte) und als Mittelwert mit Standardabweichung nach Behandlungstyp dargestellt.

Tab. 10. Kennzahlen der Krautschichtauswertung von Fichtenfläche Menzingen (ZG).

Parzelle	Behandlung	Shannon	Evenness	Deckung (%)	Anzahl Arten	Anteil Brombeere (%)
A	Kalkung	0.81	0.25	74.8	26	83.6
B	Kontrolle	1.53	0.56	40.6	15	36.9
C	Kalkung	1.5	0.62	51.8	11	29
D	Kontrolle	0.63	0.24	79.1	14	79
E	Kalkung	0.95	0.37	57.1	13	65.7
F	Kontrolle	1.4	0.5	106.8	16	35.1
G	Kalkung	1.07	0.39	32.2	15	0.6
H	Kontrolle	1.14	0.46	34.3	12	0.3

Parzelle	Behandlung	Feuchtezahl	Reaktionszahl	Nährstoffzahl
A	Kalkung	3.5	2	4
B	Kontrolle	3.2	2.7	4.1
C	Kalkung	0.1	0.9	1.3
D	Kontrolle	0.4	2	3
E	Kalkung	1.2	2	3.1
F	Kontrolle	1.2	2	3
G	Kalkung	0.3	0.1	0.2
H	Kontrolle	0.1	0.1	0.1

Auch am Buchenwaldstandort **Bachs** ist die Bodenvegetation nicht sehr üppig ausgeprägt, viele Stellen sind kahl. Das Beispiel in Abb. 30 zeigt die Parzelle C, wo der Waldmeister (Galium odoratum) doch noch einen Deckungsgrad von 4 erreicht, was allerdings die grosse Ausnahme ist. Unter den 31 Arten befinden sich die säurezeigenden Moose Zypressenschlafmoos (Hypnum cupressiforme) und das schöne Wiedertonmoos. Beide in allen Parzellen und mit einem Deckungsgrad "r" vertreten. Auch der breitblättrige Dornfarn kam mit Ausnahme der Parzelle A überall mit Deckungsgraden von "+" bis "r" vor. Die Krautschicht weist auf einen frischen und stark sauren Standort hin (Abb. 31, Tab. 11).



Abb. 30. Überblick über die Parzelle C in Bachs (ZH, 11.06.2020).

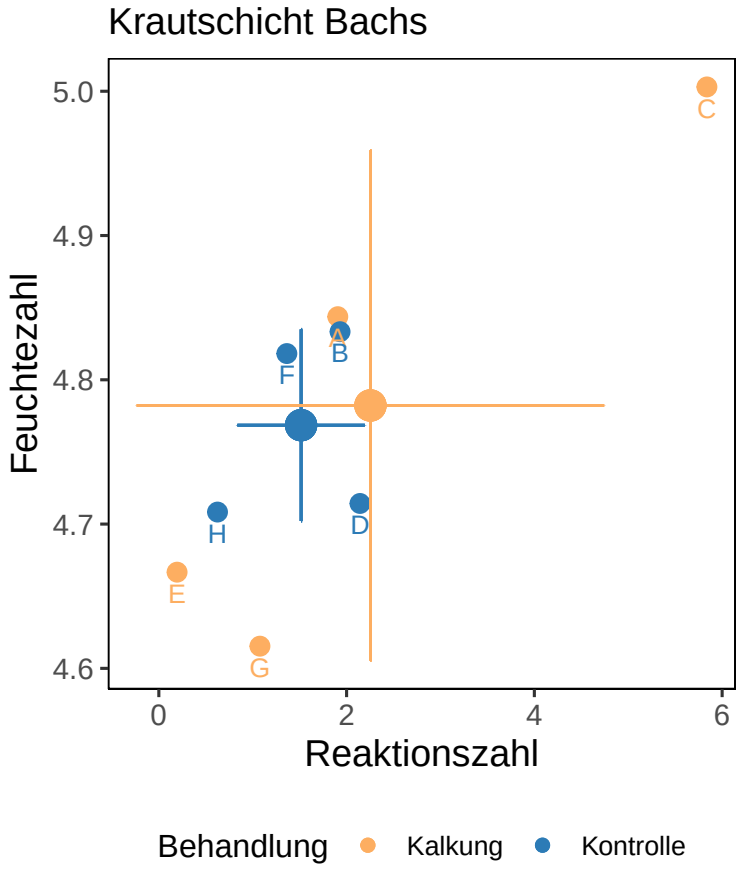


Abb. 31. Ökogramm der Krautschicht in Bachs, nach Parzellen (Punkte) und als Mittelwert mit Standardabweichung nach Behandlungstyp dargestellt.

Tab. 11. Kennzahlen der Krautschichtauswertung von Bachs (ZH).

Parzelle	Behandlung	Shannon	Evenness	Deckung (%)	Anzahl Arten	Anteil Brombeere (%)
A	Kalkung	0.95	0.59	6.4	5	0
B	Kontrolle	1.38	0.58	7.2	11	0
C	Kalkung	0.32	0.13	66.8	11	0.1
D	Kontrolle	2.43	0.98	1.6	12	12.5
E	Kalkung	0.82	0.42	3.7	7	2.7
F	Kontrolle	2.14	0.97	1.2	9	8.3
G	Kalkung	2.03	0.98	1.3	8	0
H	Kontrolle	1.68	0.64	5	14	4

Parzelle	Behandlung	Feuchtezahl	Reaktionszahl	Nährstoffzahl
A	Kalkung	4.8	1.9	2.9
B	Kontrolle	4.8	1.9	3.1
C	Kalkung	5	5.8	5
D	Kontrolle	4.7	2.1	4.3
E	Kalkung	4.7	0.2	0.6
F	Kontrolle	4.8	1.4	3.5
G	Kalkung	4.6	1.1	3.5
H	Kontrolle	4.7	0.6	1.5

A | Kalkung in Zahlen

	Anzahl pro Fläche	Aufteilung	Sampling	Total
Flächen		1x Buche, 1x Fichte, 1x Tanne		3
Parzellen	8	4 gekalkt, 4 Kontrolle		24
Bäume		247 Buchen, 249 Fichten, 263 Tannen	Kronenverlichtung und Vergilbung, 1x pro Jahr	759
Zuwachsmessbänder	32	4 pro Parzelle	2x jährlich	96
Gipfeltriebe	16	2 pro Parzelle	Zweimal in vier Jahren für Triebwachstum und Nährstoffe	48
Lysimeter	96	12 pro Parzelle in zwei Tiefen	monatlich	288
Sensoren Bodenwassergehalt	24	3 Tiefen pro Parzelle	stündlich	72
Sensoren Bodenwasserspannung	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	zweimal in vier Jahren	24
Bodenproben für Bodenchemie		Aus dem Bodenprofil plus 6-8 Einstiche pro Parzelle	zweimal in vier Jahren	130

Tab. 12. Übersicht der Installationen und Messungen in den Versuchsflächen.

B | Flächenpläne

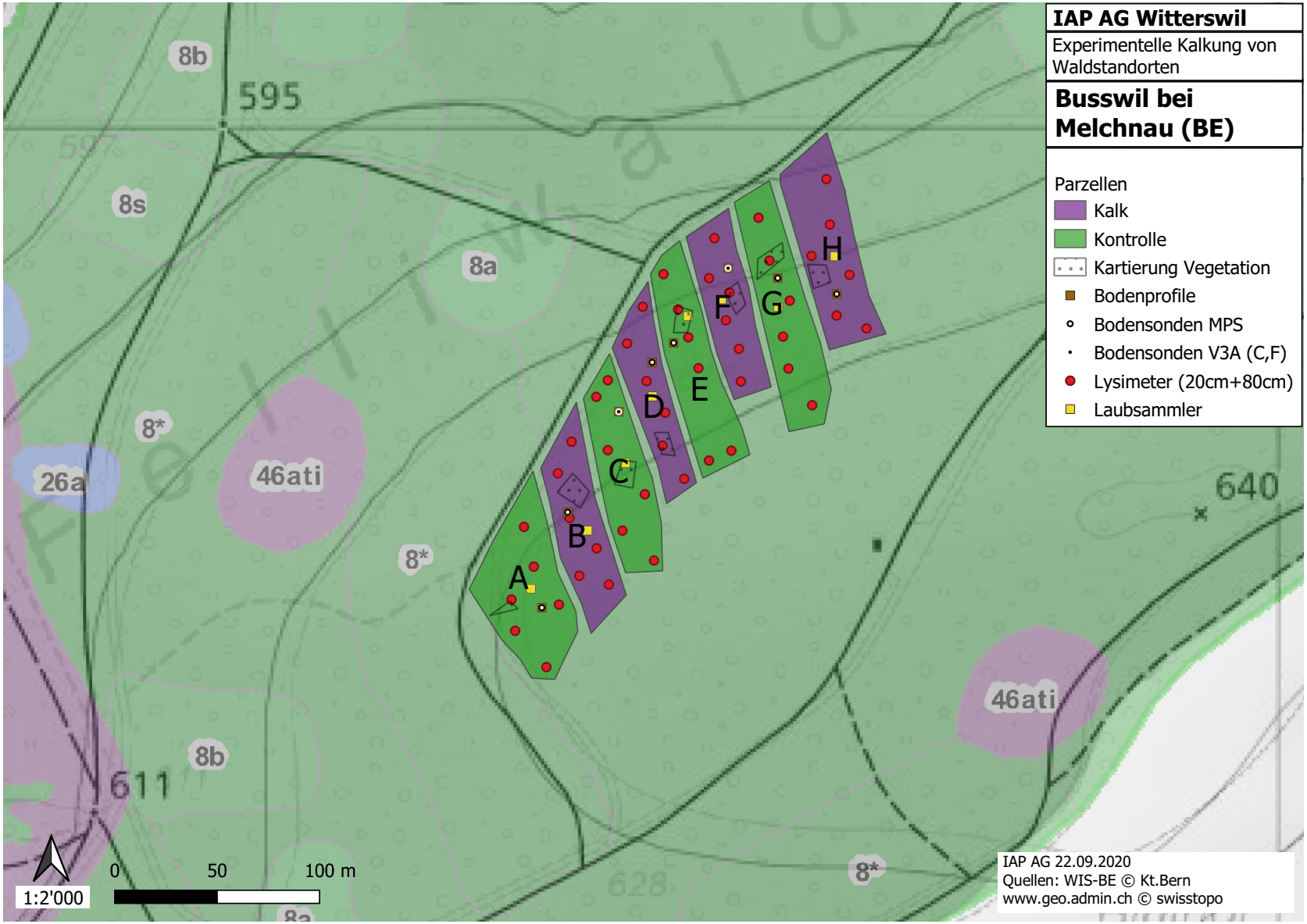


Abb. 32. Flächenplan Busswil (BE) Tannen. Randomised block design für statistische Auswertungen der Bodenlösung: Block 1: A & H, Block 2: B & C, Block 3: D & E, Block 4: F & G.

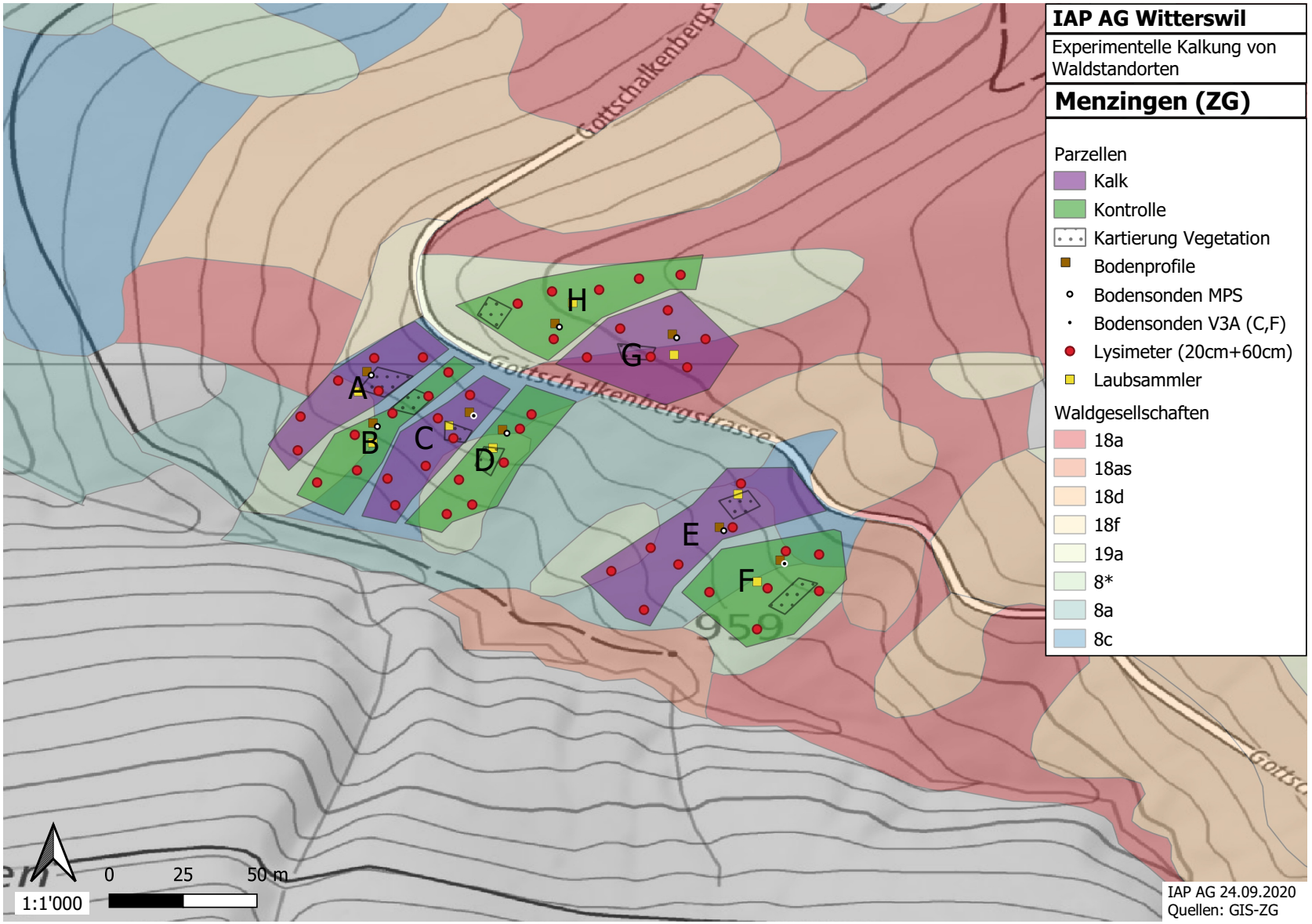


Abb. 33. Flächenplan Menzingen, Fichten. Randomised block design für statistische Auswertungen der Bodenlösung: Block 1: A & F, Block 2: B & C, Block 3: D & E, Block 4: G & H.

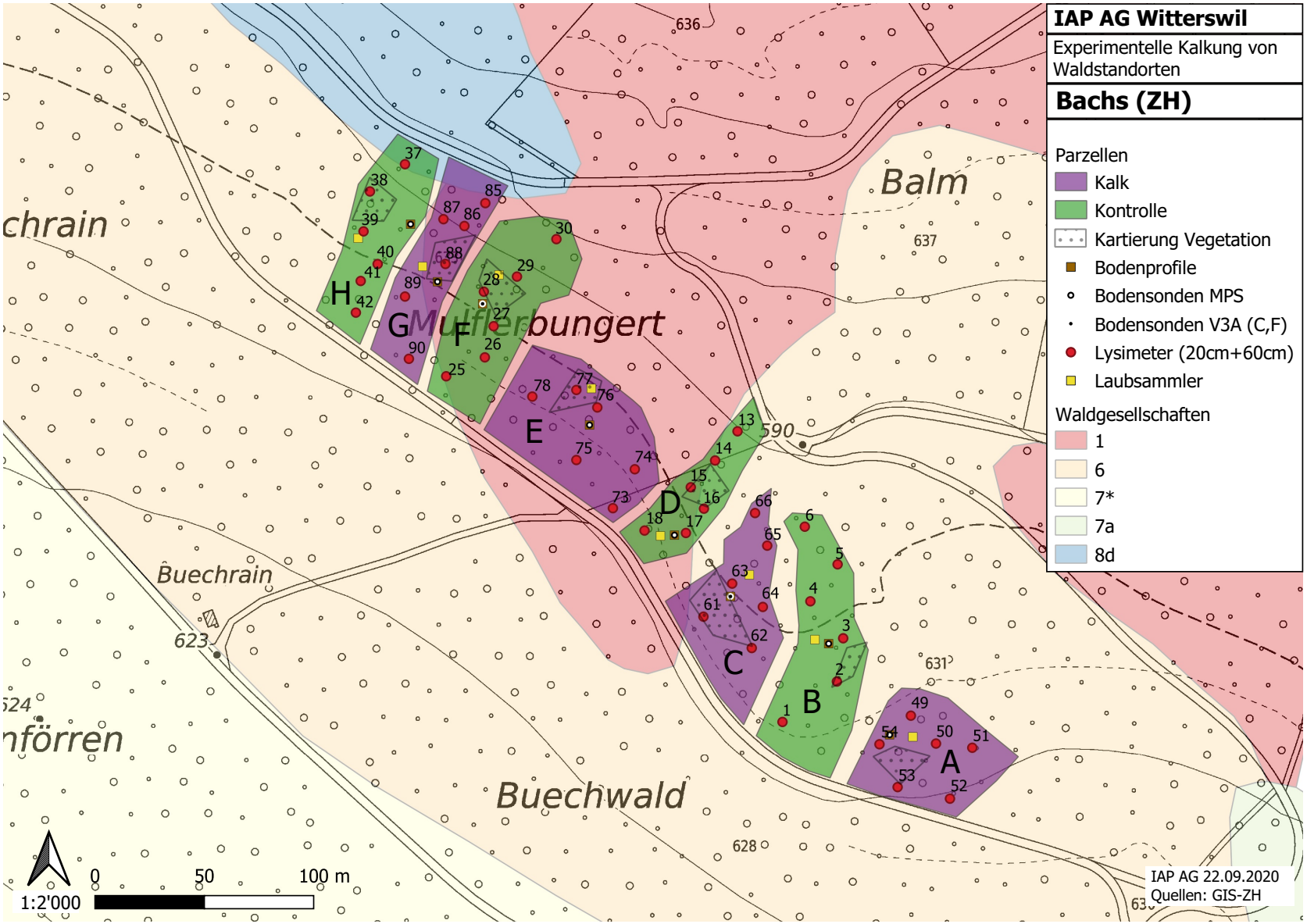


Abb. 34. Flächenplan Bachs (ZH), Buchen. Randomised block design für statistische Auswertungen der Bodenlösung: Block 1: A & B, Block 2: C & D, Block 3: E & F, Block 4: G & H.

C | Impressionen der Feldarbeit



Abb. 35. Entnahme von Bodenproben für die Messung des pH-Werts und der Basensättigung. Rechts: Nummerierung und Beschriftung der ausgewählten Bäume.



Abb. 36. Kluppierung der ausgewählten Bäume.



Abb. 37. Oben: Graben von Bodenprofilen. Unten links: Entnahme von räumlich repräsentativen Bodenmischproben (6 Proben pro Parzelle unterteilt pro Bodenhorizont). Unten rechts: Installation von Lysimeter.



Abb. 38. Oben links: Laubsammler. Rest: Installation von Bodenwasserspannung- und Bodenwasserpotentialsonden in den bestehenden Bodenprofilen.

D | Bodenprofilaufnahmen



Abb. 39. Erstellung Profil in Busswil (Parzelle C). Die Bodenprofile wurden nach der Bodenansprache, dem Bodenprobensampling und der Installation der Bodenfeuchte und Wasserspannungssensoren wieder geschlossen.



Abb. 40. Bodenansprache im Profil und Entnahme von Stechzylinderproben für die Messung von physikalischen Bodeneigenschaften

Tanne Busswil (BE) Bodenprofile

Profilfoto

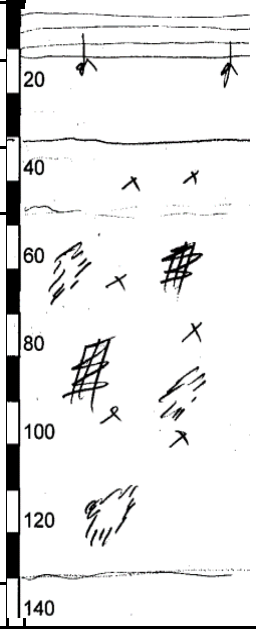


Standort-Daten

Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau		
Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, A		
Koordinaten (1:25'000)	629640 226767		
Datum der Aufnahme	23.04.2020		
Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung		
Neigung	2° Höhe		
Exposition	290°		
Lage im Relief	Mittelhang		
	Verbale Kurzbeschreibung		
Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde		
Humusform	fha Moder		
Durchwurzelungstiefe (cm)	45	mittel	
nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	62.7	gering	
Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	167	gering	
Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass	
Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel	
Basensättigung 0-40 cm (%)	4.8	sehr kritisch	
pH(CaCl2) 0-40 cm	3.91	sehr stark sauer	
pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*			

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-2	Of			3.16	0				1	58	0	4		
4-5	Oh		10YR 2/1	3.15	0		bro	68/ 10/ 42/ 58	1	23.4	0	4	14.37	19.8
5-10	Ah		7.5YR 3/4	3.69	0	Uls	Sub2	49/ 9/ 32/ 40	1	6.9	0	3	4.51	
10-30	Al		10YR 5/4	3.94	0	Ls4	Sub2	45/ 7/ 28/ 38	1	3.51	1	2	4.1	
30-45	Bt		10YR 6/3	4.06	0	Lt3	pol3	43/ 5/ 22/ 38	3	1.91	0	1	6.27	
45-130	SdBt		10YR 7/1 4/6	4.03	0	LtS	pol3	36/ 3/ 19/ 33	4	0.33	0	0	19.94	



Profilfoto



Standort-Daten

Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau
Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, B
Koordinaten (1:25'000)	629653 226813
Datum der Aufnahme	23.04.2020
Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung
Neigung	8° Höhe
Exposition	310°
Lage im Relief	Mittelhang

Verbale Kurzbeschreibung

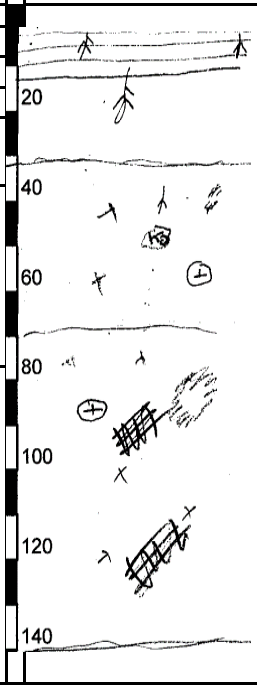
Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
Humusform	fhr Moder	
Durchwurzelungstiefe (cm)	45	mittel
nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	46.3	sehr gering
Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	156	gering
Vernässung (Stufe 0-6)	3	mittel staunass
Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
Basensättigung 0-40 cm (%)	6.3	kritisch
pH(CaCl2) 0-40 cm	3.82	sehr stark sauer
pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-2 2-3	Ol Of			3.16	0				1	41.5	1	2		18.4
3-6	Oh		10YR 2/1	3.14	0		Sub2	68/ 10/ 42/ 58	1	29.4	1	2		17.9
6-9	Aeh			3.36	0	UlS	Sub2	55/ 8/ 35/ 47	1	10.4	1	2	4.85	
9-25	Al		10YR 3/3	3.79	0	Lt2	Sub3	52/ 14/ 28/ 38	1	2.92	1	2	8.14	
25-45	Bt		10YR 5/4 6/4	3.97	0	Lt3	Sub3	37/ 3/ 17/ 34	3	1.07	1	1	5.61	
45-130	SdBt		10YR 7/1 10YR 5/8	3.88	0	Ls4	Sub3	33/ 1/ 17/ 32	3	0.27	1	0	14.3	

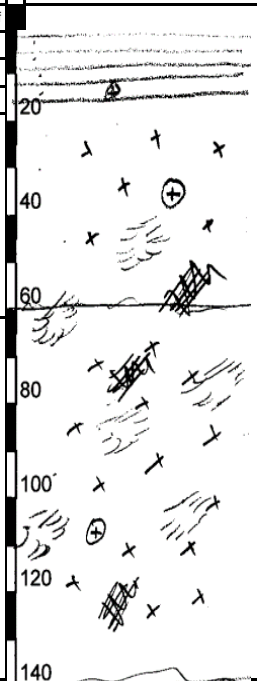
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau	
	Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, C	
	Koordinaten (1:25'000)	629678 226862	
	Datum der Aufnahme	23.04.2020	
	Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung	
	Neigung	8° Höhe	
	Exposition	340°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fha Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	140	sehr tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	120	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	418	hoch
	Vernässung (Stufe 0-6)	1	sehr schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	2	gering
	Basensättigung 0-40 cm (%)	5.2	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.31	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-5	Ol								1		0			
5-6	Of			3.14	0		bröbrö	68/ 10/ 42/ 58	1	53.6	0	4		18.3
6-7	Oh			3.14	0		bröbrö	68/ 10/ 42/ 58	1	29.4	0	4		18.2
7-12	Aeh		2/2	3.48	0	Uls	Sub2	60/ 13/ 34/ 47	2	8.59	0	2	4.75	
12-30	Al		10YR 3/3	3.89	0	Lt2	Sub3	60/ 12/ 33/ 48	2	8.37		2	5.46	
30-70	Bt		10YR 5/5	3.99	0	Ltu	pol3	38/ 4/ 21/ 34	3	1.12	1	1	7.05	
70-140	SdBt		10YR 6/3 10YR 6/6	3.99	0	Ts3	pol4	38/ 2/ 14/ 36	4	0.26	1	0.5	24.3	

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau	
	Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, D	
	Koordinaten (1:25'000)	629694 226886	
	Datum der Aufnahme	23.04.2020	
	Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung	
	Neigung	8° Höhe	
	Exposition	335°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fha Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	60	mittel
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	67.4	gering
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	192	gering
	Vernässung (Stufe 0-6)	3	mittel staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	6.6	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.94	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-1 1-3	Ol Of		10YR 3/1	3.28	0		brö	68/ 10/ 42/ 58	1	34.4		4		20.3
3-5	Oh		10YR 3/1	3.17	0		brö	68/ 10/ 42/ 58	1	51.1		3		18.5
5-8	Ahe		4/2	3.39	0	Uls	Sub2	54/ 7/ 35/ 47	1	25.9	1	2	5	
8-12	Al		5/4	3.83	0	Uls	Sub2	43/ 8/ 28/ 35	1	10.1	1	2	4.75	
12-60	Bt		10YR 7/3	4.03	0	Ls2	pol3	38/ 5/ 21/ 33	3	3.37	1	1	7.3	
60-140	SdBt		10YR 7/2 10YR 5/8	4.23 4	0	Lts	pol4	36/ 7/ 14/ 30	4	1.09	1	0	62.5	

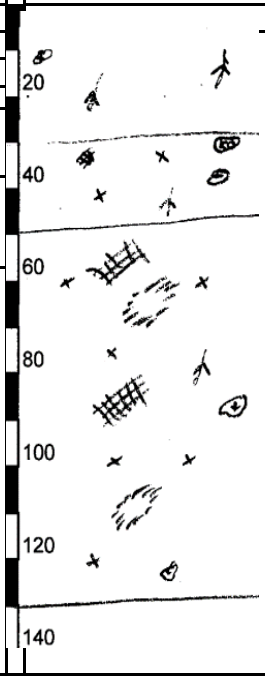
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau	
	Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, E	
	Koordinaten (1:25'000)	629704 226896	
	Datum der Aufnahme	23.04.2020	
	Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung	
	Neigung	10° Höhe	
	Exposition	330°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fhr Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	130	sehr tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	137	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	436	hoch
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	4.0	sehr kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.68	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-3 3-5	Ol Of			3.12	0			68/ 10/ 42/ 58	1	63.8	0	5		19.5
5-9	Oh		2/1	3.29	0		brö	68/ 10/ 42/ 58	1	17.5	0	4		16.7
9-20	Aeh		10YR 4/3	3.79	0	Uls	krü-Sub2	47/ 9/ 29/ 38	2	4.35	0	3	4.29	
20-35	Al		10YR 6/4	3.97	0	Lt2	Sub3	40/ 6/ 27/ 34	2	2.26	1	2	4.63	
35-60	Bt		10YR 7/3	4.01	0	Ltu	pol3	37/ 3/ 21/ 34	3	1.26	1	1	6.38	
60-130	BtSd		10YR 7/1 10YR 5/8	4.07 4	0	Tu2	pol4	37/ 2/ 19/ 36	4	0.65	1	0.5	8.03	

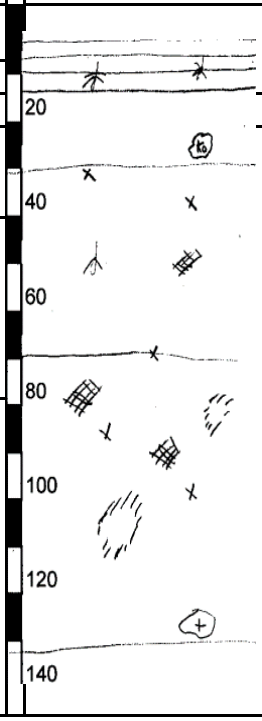
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau	
	Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, F	
	Koordinaten (1:25'000)	629731 226932	
	Datum der Aufnahme	23.04.2020	
	Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung	
	Neigung	10° Höhe	
	Exposition	340°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fhr Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	130	sehr tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	133	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	447	hoch
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	3.4	sehr kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.85	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

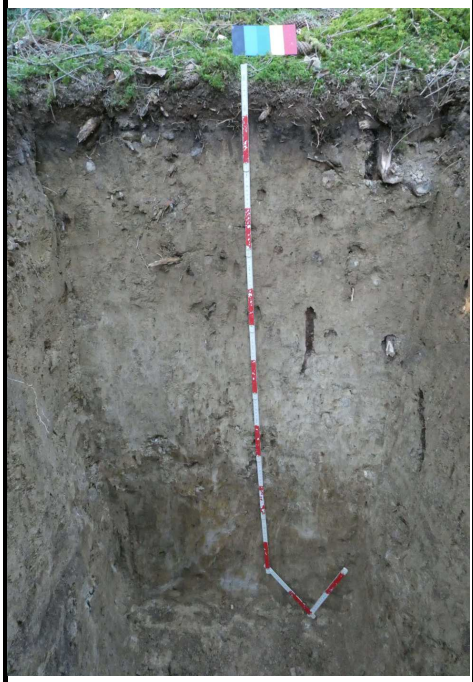
Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-2	Ol							71/ 11/ 43/ 60	1			3		
2-6	Of			3.08	0			71/ 11/ 43/ 60	1	66.1		3		16.5
6-8	Oh		2/2	3.25	0		brö	71/ 11/ 43/ 60	1	22.6		3		16.7
8-13	Aeh		3/2	3.78	0	Ul2	krü-	43/ 9/ 29/ 34	2	4.46	1	2	6.6	
13-30	Al		10YR 5/4	4.06	0	Ul2	Sub2	43/ 7/ 27/ 36	2	1.92	1	2		
30-50	Bt		10YR 5/4	4.05	0	Ut3	pol3	39/ 2/ 21/ 36	3	0.98	1	1	8.31	
50-130	BtSd		10YR 6/3 7.5YR 4/6	4.04 4	0	Ltu	pol3	39/ 3/ 19/ 36	4	0.87	1	0.5	6.9	

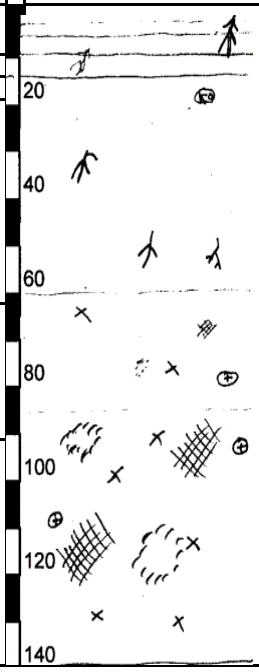
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau	
	Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, G	
	Koordinaten (1:25'000)	629755 226927	
	Datum der Aufnahme	23.04.2020	
	Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung	
	Neigung	12° Höhe	
	Exposition	330°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fhr Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	130	sehr tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	141	hoch
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	472	hoch
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	2	gering
	Basensättigung 0-40 cm (%)	6.3	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.79	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-2 2-4	Ol Of			3.17	0		brö	68/ 10/ 42/ 58	1 1	26		0 2		17.6
4-7	Oh		3/1	3.17	0	Uls	krü-Sub2	68/ 10/ 42/ 58	1	20.4	1	4	5.87	15.6
7-11	Aeh		3/3	3.42	0	Uls	krü-Sub2	45/ 11/ 34/ 34	1	8.85		2	5.87	
11-30	Al		10YR 4/3	4.01	0	Uls	Sub2	38/ 0/ 28/ 39	2	2.86	1	2	6.49	
30-70	Bt		10YR 5/5	4.07	0	Lu	Sub3	41/ 5/ 21/ 36	3	0.87	1	2	8.86	
70-130	BtSd		10YR 6/2 10YR 6/6	3.95	0	Lt2	pol3	38/ 0/ 19/ 38	4	0.47	1	0.5	8.95	

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Busswil bei Melchnau	
	Standortbezeichnung	1211, Busswil Kalkung, H	
	Koordinaten (1:25'000)	629780 226926	
	Datum der Aufnahme	23.04.2020	
	Geologie	Grundmoraene der Riss-Vergletscherung	
	Neigung	12° Höhe	
	Exposition	350°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Parabraunerde	
	Humusform	fhr Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	90	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	116	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	327	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	1	sehr schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	5.8	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.83	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8*, NaiS 8*		

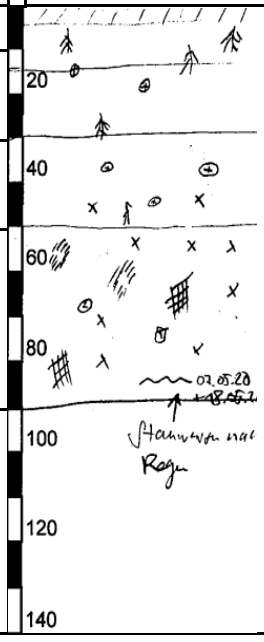
Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-2	Ol		5/2	3.07	0		-	70/ 10/ 42/ 61	1	55.4	0	0		17.6
2-6	Of		3/3				brö		1		0	2		
6-9	Oh		2/1	3.1	0		brö	70/ 10/ 42/ 61	1	68.6	0	3		15.6
9-14	Ah	20	3/4	3.49	0	Ul3	Sub3	69/ 20/ 32/ 49	2	7.56	0	2		
14-60	Al	40 60	10YR 5/4	4.11	0	Ul4	Sub3	44/ 8/	3	2.16	1	1	7.45	
60-90	Bt	80	10YR 6/3 10YR 6/8	4.06	0	Lt2	pol3	38/ 0/	3	0.72	0	0.5	8.69	
90-140	BtSd	100 120 140	10YR 6/2 10YR 6/8	4.09 4	0	Ltu	pol4	35/ 2/	4	0.29	0	0	28.4	

Buche Bachs (ZH) Bodenprofile

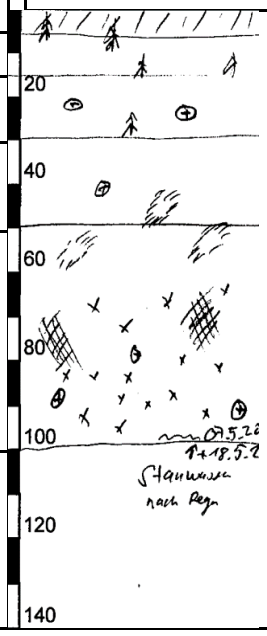
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Bachs	
	Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, A	
	Koordinaten (1:25'000)	673249 265021	
	Datum der Aufnahme	07.05.2020	
	Geologie	Bachs-Schotter	
	Neigung	4° Höhe	
	Exposition	0°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	Of-Mull	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	90	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	85.5	gering
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	282	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	11.3	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	4.11	stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a		

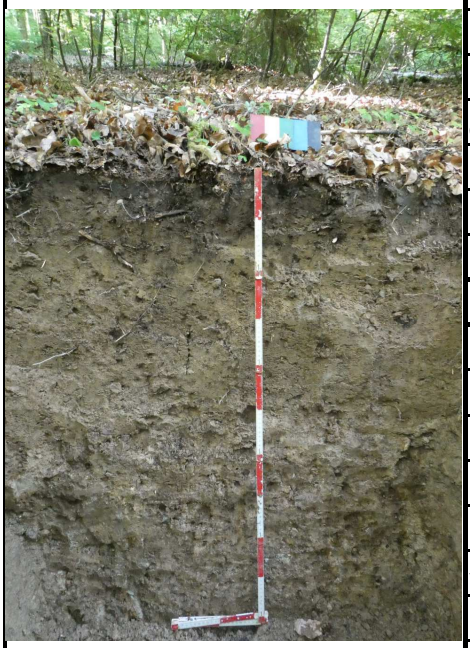
Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-4 4-15	Ah Ahl		3/2 3/4	3.56 4.01	0 0	UL Lt2	Krü.su sub2	59/ 11/ 34/ 44 54/ 8/ 29/ 46	2 2	17.9 4.82	0 10	3 3	39.13 9.86	17.5
15-30	Al		10YR 4/6	4.2	0	Lt3	sub2	41/ 3/ 27/ 38	2	2.36	10	3	7.69	
30-50	Bt		10YR 5/4 4/4 Flecke	4.22	0	Lt3	pol2	40/ 5/ 21/ 35	3	0.99	20	1	9.81	
50-90	SdBt		10YR 6/3 10YR 5/6 Flecke	4.08	0	LtS	pol3	37/ 3/ 19/ 34	4	0.31	20	0.5	23.11	

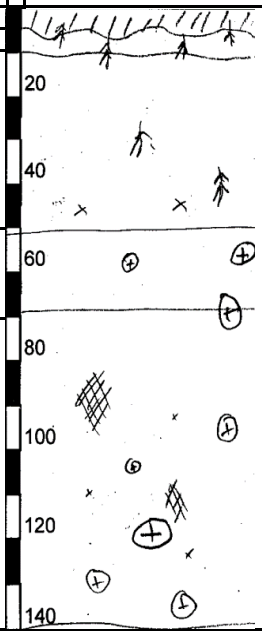
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Bachs	
	Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, B	
	Koordinaten (1:25'000)	673262 264994	
	Datum der Aufnahme	07.05.2020	
	Geologie	Bachs-Schotter	
	Neigung	2° Höhe	
	Exposition	350°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	Mullartiger Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	100	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	90.1	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	258	gering
	Vernässung (Stufe 0-6)	3	mittel staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	9.1	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	4.05	stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-5	Ah		2/2	3.43	0		Sub2	63/ 9/ 34/ 53	1	18.7	10	3	32.32	17.8
5-15	AhL		4/3	3.87	0	LU	Sub2	44/ 9/ 31/ 36	2	6.6	10	3	8.61	
15-30	Al		10YR 5/4	4.15	0	Lt2	Sub2	47/ 8/ 28/ 39	2	3.22	10	2	6.94	
30-50	SW		10YR 5/6	4.27	0	Lt3	Sub2	39/ 5/ 26/ 34	2	1.11	20	2	5.45	
50-100	SdBt		10YR 6/3 5/6 Flecke 2/2 Mn	4.14	0	Lts	pol3	36/ 4/ 24/ 32	3	0.28	40	0.5	28.8	

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Bachs	
	Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, C	
	Koordinaten (1:25'000)	673282 264984	
	Datum der Aufnahme	07.05.2020	
	Geologie	Bachs-Schotter	
	Neigung	4° Höhe	
	Exposition	60°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Parabraunerde	
	Humusform	Mullartiger Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	140	sehr tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	119	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	335	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	1	sehr schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	10.2	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.98	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-5	Ah		2/2	3.46	0	Ul2	Sub2	50/ 7/ 40/ 43	1	17.2	10	3	27.56	17.9
5-10	AhL		3/3	3.64	0	Ul4	Sub2	43/ 8/ 32/ 35	2	6.7	10	3	9.92	
10-50	Al		10YR 4/4	4.1	0	Lu	Sup2	40/ 9/ 28/ 31	2	3.07	10	2	8.08	
50-70	Btv		10YR 5/4	4.31	0	Lt3	Sub3	42/ 7/ 26/ 35	2	0.74	20	1	5.56	
70-140	BtLv		10YR 5/4	4.19	0	Tu3	Sub3	39/ 8/ 17/ 32	3	0.46	40	1	6.23	

Profilfoto



Standort-Daten

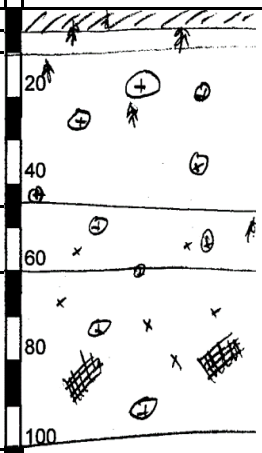
Politische Gemeinde	Bachs		
Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, D		
Koordinaten (1:25'000)	673331 264929		
Datum der Aufnahme	07.05.2020		
Geologie	Verlehmter Hangschutt, Solifluktionsschutt		
Neigung	18° Höhe		
Exposition	50°		
Lage im Relief	Mittelhang		
Verbale Kurzbeschreibung			
Bodenform	Parabraunerde		
Humusform	Of-Mull		
Durchwurzelungstiefe (cm)		120	tiefgründig
nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		104	mittel
Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		322	mittel
Vernässung (Stufe 0-6)		1	sehr schwach staunass
Luftkapazität (Stufe 1-5)		3	mittel
Basensättigung 0-40 cm (%)		7.7	kritisch
pH(CaCl2) 0-40 cm		4.00	sehr stark sauer
pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a			

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-6	Ah		3/2	3.4	0	UL2	Sub2	60/ 15/ 34/ 4	1	17.5	10	4	20.7	17.7
6-12	Ahl		3/3	3.66	0	UL4	Sub3	49/ 10/ 32/ 3	2	6.9	10	3	6.92	
12-50	Al	20 40	10YR 5/6	4.15	0	LtU	Sub3	46/ 11/ 27/ 35	2	2.19	10	3	5.99	
50-70	Bt	60	10YR 4/6	4.22	0	LtS	Sub-pol3	41/ 5/ 21/ 37	3	0.63	10	2	4.94	
70-120	SdBt	80 100 120	10YR 5/6 4/6 Flecke	4.13	0	LtS	pol3	43/ 6/ 17/ 37	3	0.28	50	0.5	7.57	
		140												

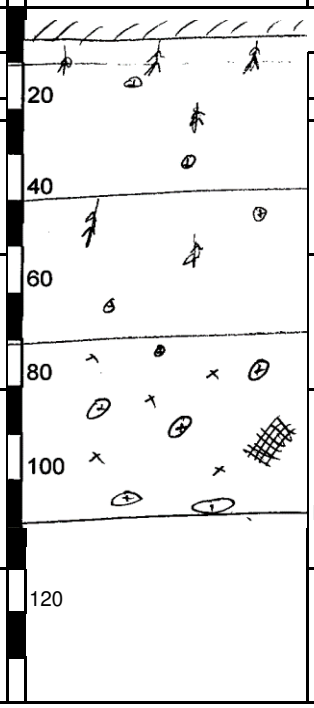
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Bachs	
	Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, E	
	Koordinaten (1:25'000)	673370 264879	
	Datum der Aufnahme	07.05.2020	
	Geologie	Verlehmter Hangschutt, Solifluktionsschutt	
	Neigung	12° Höhe	
	Exposition	50°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Parabraunerde	
	Humusform	Mullartiger Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	60	mittel
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	59.2	gering
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	158	gering
	Vernässung (Stufe 0-6)	1	sehr schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	9.4	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	4.06	stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-5	Ah		10/3	3.53	0	UL4	Sub2	55/ 9/ 39/ 46	2	14.5	10	3	22.53	16.9
5-10	Ahl		3/4	3.83	0	Ut4	Sub2	57/ 13/ 30/ 44	2	5.6	10	3	9.51	
10-45	Al		10YR 4/6	4.17	0	LU	Sub2	39/ 3/ 27/ 35	2	1.99	25	2	7.5	
45-60	Bt		10YR 4/6	4.12	0	TU4	Sub2	41/ 7/ 21/ 34	3	0.5	30	2	6.41	
60-100	SdBt		10YR 5/4 7.5YR 4/6	4.02	0	TS4	pol3	39/ 3/ 15/ 36	3	0.47	50	0	9.15	

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Bachs	
	Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, F	
	Koordinaten (1:25'000)	673396 264851	
	Datum der Aufnahme	07.05.2020	
	Geologie	Verlehmter Hangschutt, Solifluktionsschutt	
	Neigung	10° Höhe	
	Exposition	40°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	Of-Mull	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	110	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	99.1	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	308	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	1	sehr schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	10.7	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	4.09	stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-0.5	Of													
0.5-5	Ah		10YR 3/2	3.63	0	UL4	Sub2	58/ 8/ 34/ 50	1	17.4	10	3	39.88	19.1
5-10	Ahl		3/4	3.78	0	UL4	Sub2	49/ 7/ 30/ 42	2	5.76	10	3	11.87	
10-40	Al		10YR 4/4	4.18	0	LU	Sub3	40/ 7/ 28/ 34	2	2.84	10	3	7.65	
40-70	Bt		10YR 4/6	4.18	0	Lt3	pol2	38/ 4/ 21/ 33	3	0.6	20	2	6.45	
70-110	SdBt		10YR 5/4 4/6 Flecke	3.95	0	Lt2	pol2	40/ 5/ 12/ 35	4	0.3	30	0.5	8.51	

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Bachs	
	Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, G	
	Koordinaten (1:25'000)	673441 264829	
	Datum der Aufnahme	07.05.2020	
	Geologie	Verlehmter Hangschutt, Solifluktionsschutt	
	Neigung	12° Höhe	
	Exposition	40°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	Mullartiger Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	100	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	90.1	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	258	gering
	Vernässung (Stufe 0-6)	1	sehr schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	4	hoch
	Basensättigung 0-40 cm (%)	13.7	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	4.06	stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-6	Ah		2/3	3.63	0	UL3	Sub2	56/ 11/ 39/ 45	1	15.8	10	3	41.01	17.5
6-10	Ahl		3/4	3.86	0	UL4	Sub2	50/ 12/ 31/ 38	2	6.36	10	3	12.87	
10-40	Al	20 40	10YR 4/5	4.18	0	Lu	Sub2	59/ 30/ 27/ 30	2	2.72	10	3	8.39	
40-55	Bt		10YR 4/6	4.2	0	Lts	Sub-pol2	40/ 5/ 21/ 35	3	0.53	20	2	6.4	
55-100	SdBt	60 80 100	10YR 4/6 Flecke 5/4	4.07	0	Lts	pol3	43/ 7/ 17/ 36	3	0.41	40	1	6.03	
		120												

Profilfoto



Standort-Daten

Politische Gemeinde	Bachs		
Standortbezeichnung	1212, Bachs Kalkung, H		
Koordinaten (1:25'000)	673468 264787		
Datum der Aufnahme	07.05.2020		
Geologie	Verlehmter Hangschutt, Solifluktionsschutt		
Neigung	15° Höhe		
Exposition	30°		
Lage im Relief	Mittelhang		
	Verbale Kurzbeschreibung		
Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde		
Humusform	Of-Mull		
Durchwurzelungstiefe (cm)		110	tiefgründig
nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		101	mittel
Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		303	mittel
Vernässung (Stufe 0-6)		1	sehr schwach staunass
Luftkapazität (Stufe 1-5)		3	mittel
Basensättigung 0-40 cm (%)		9.7	kritisch
pH(CaCl2) 0-40 cm		4.05	stark sauer
pflanzensoziologische Einheit nach Schmider et al. 6 (7*), NaiS 7a			

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-7	Ah		2/3	3.51	0	Ul2	krü.-	69/ 12/ 39/ 57	1	14.6	10	3	24.74	17.3
7-12	Ahl		3/4	3.88	0	Ul4	Sub2	50/ 11/ 31/ 34	2	6	10	3	12	
12-40	Al	20 40	4/6	4.18	0	Lu	Sub3	44/ 10/ 27/ 34	2	1.96	10	4	6.46	
40-60	Bt	60	4/5	4.22	0	Ltu	pol3	40/ 7/ 21/ 33	3	0.45	10	3	6.45	
60-110	SdBt	80 100	4/6 3/2 Rost-fleche	4.13	0	Lts	pol3	38/ 4/ 19/ 34	4	0.28	30	0.5	7.06	
		120												

Fichte Menzingen (ZG) Bodenprofile

Profilfoto



Standort-Daten

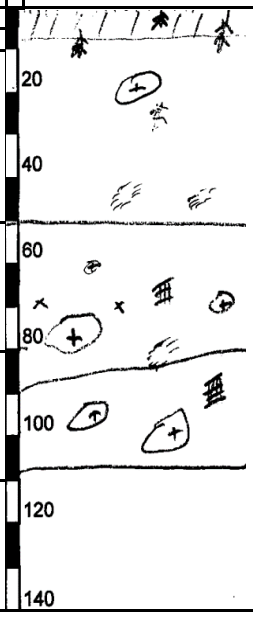
Politische Gemeinde	Menzingen		
Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, A		
Koordinaten (1:25'000)	692336 223995		
Datum der Aufnahme	18.06.2020		
Geologie	Granitische Molasse		
Neigung	18° Höhe		
Exposition	200°		
Lage im Relief	Mittelhang		
	Verbale Kurzbeschreibung		
Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde		
Humusform	fein humusarmer Moder		
Durchwurzelungstiefe (cm)		100	tiefgründig
nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		128	mittel
Feldkapazität des Wurzelraums (mm)		413	hoch
Vernässung (Stufe 0-6)		2	schwach staunass
Luftkapazität (Stufe 1-5)		2	gering
Basensättigung 0-40 cm (%)		81.1	hoch
pH(CaCl2) 0-40 cm		4.53	stark sauer
pflanzensoziologische Einheit B+S 8c, NaiS 8*			

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-2	Oh		2/1	3.85	0		Krü 2	72/ 10/ 31/ 62	1	45.4	0	5		20.5
2-20	Ah		10YR 3/3	4.55	0	Lt2	Sub3	60/ 3/ 31/ 57	2	9.45	0	4	87.75	
20-45	Al		10YR 4/4	4.56	0	Lu	Sub2	53/ 5/ 26/ 48	2	4.93	2	3	81.59	
45-90	SdBt		10YR 6/5 2.5YR 7/2 7.5YR 6/6	4.39	0	Lts	pol3	44/ 3/ 18/ 41	3	2.31	20	1	47.34	
90-100	BvCv		10YR 6/3	4.6	0	LtU	pol4	43/ 1/ 17/ 41	3	0.47	20	0.5	59.03	

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Menzingen	
	Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, B	
	Koordinaten (1:25'000)	692338 223970	
	Datum der Aufnahme	18.06.2020	
	Geologie	Granitische Molasse	
	Neigung	22° Höhe	
	Exposition	210°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fein humusarmer Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	110	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	86.8	gering
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	331	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	1	sehr gering
	Basensättigung 0-40 cm (%)	7.9	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.86	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8c, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-2	Oh		2/1	3.52	0		Krü	69/ 11/ 37/ 58	1	68.5		5	95.02	22.2
2-7	Ah		3/3	3.31	0	Lu	Krü	65/ 18/ 33/ 47	2	15		4	20.33	
7-50	Al		10YR 5/6 Flecke 2.5YR 7/2	3.86	0	Lu	Sub2	43/ 2/ 19/ 41	3	3.23	5	4	7.87	
50-80	SdBt		10YR 5/6 Rost 6/8 2.5YR 7/2	3.89	0	Ls2	Sub3	42/ 1/ 21/ 41	3	0.69	30	0.5	14.39	
80-110	BvCv		2.5YR 7/2	3.97	0	Ls4	pol3	38/ 2/ 21/ 36	3	0.23	30	0.5	26.3	

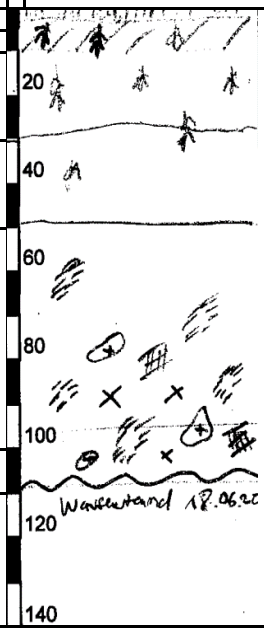
Profilfoto



Standort-Daten

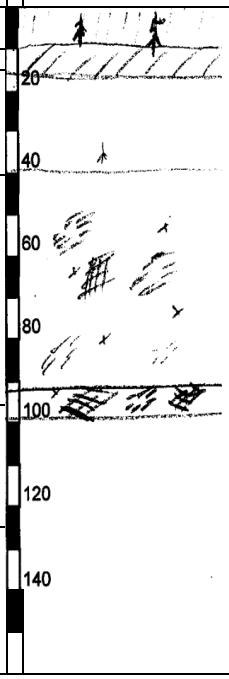
Politische Gemeinde	Menzingen	
Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, C	
Koordinaten (1:25'000)	692371 223976	
Datum der Aufnahme	18.06.2020	
Geologie	Granitische Molasse	
Neigung	20° Höhe	
Exposition	200°	
Lage im Relief	Mittelhang	
Verbale Kurzbeschreibung		
Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
Humusform	fein humusreicher Moder	
Durchwurzelungstiefe (cm)	110	tiefgründig
nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	134	mittel
Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	493	hoch
Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
Basensättigung 0-40 cm (%)	11.4	kritisch
pH(CaCl2) 0-40 cm	3.78	sehr stark sauer
pflanzensoziologische Einheit B+S 8c, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont Tiefe	Horizont Bez. 62	Profilskizze	Farbe Munsell	pH CaCl2	Kalk Mü. 94	Bd.art Mü. 80	Gefüge Mü. 125	Poren GPV /LK /nFK /FK	Dichte Mü. 126	Humus org. S%	Skelett Vol%	Wurz. Mü. 130	BS %	C/N
0-3	Oh		2/2	3.25	0	Lu	Krü2	69/ 11/ 37/ 58	1	61.8	0	4	83.2	19.8
3-8	Ah		3/3	3.45	0	Ls	Krü2	57/ 16/ 33/ 41	1	13.4	0	4	15.6	
8-30	Ahl		10Yr 4/4	3.81	0	Ls4	Sub2	54/ 7/ 26/ 47	2	4.58	0	4	6.73	
30-50	Al		10YR 5/8	3.98	0	Ls3	Sub3	54/ 6/ 24/ 48	2	2.66	0	4	5.85	
50-100	SdBt		10YR 5/6 7.5YR 5/8 Rost 2.5YR 7/1 Flecke	4.04	0	Ltu	Sub3	56/ 4/ 22/ 51	3	1.59	10	2	10.7	
100-110	BvCv		2.5YR 7/1	4.88	0	Ls3	pol3	34/ 0/ 24/ 34	3	0.63	10	0.5	79.5	
			7.5YR 5/8 Rost											

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Menzingen	
	Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, D	
	Koordinaten (1:25'000)	692382 223967	
	Datum der Aufnahme	18.06.2020	
	Geologie	Granitische Molasse	
	Neigung	20° Höhe	
	Exposition	200°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Pseudogley-Parabraunerde	
	Humusform	fein humusreicher Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	95	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	123	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	369	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	3	mittel staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	34.9	tief
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.88	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8c, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-8	Oh		10YR 2/1	3.28	0		brö3	69/ 11/ 37/ 58	1	25.8	0	4	47.33	17.7
8-13	Ahl		3/3	3.68	0	Lu	Sub3	45/ 5/ 27/ 40	1	5.41	0	4	20.07	
13-40	Al		10YR 5/3	4.04	0	Lt3	Sub3	45/ 2/ 25/ 43	2	2.89	0	3	35.14	
40-95	SdBt		10YR 6/4 5YR 4/8 Rost 2.5YR 7/1 Flecke	4.16	0	Lt3	pol3	42/ 1/ 18/ 40	3	1.83	10	1	40.53	
95-105	BvCv		2.5XR 6/2 7.5YR 5/8 Rost	4.56	0	Ls4	pol3	45/ 1/ 17/ 44	3	0.56	60		68.89	

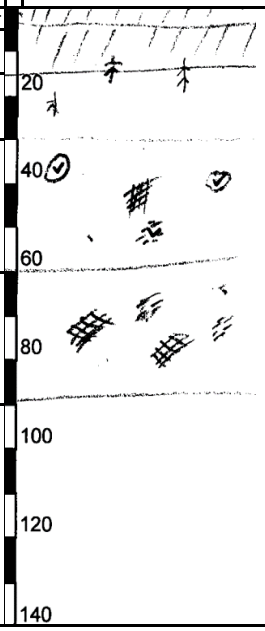
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Menzingen	
	Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, E	
	Koordinaten (1:25'000)	692453 223924	
	Datum der Aufnahme	18.06.2020	
	Geologie	Granitische Molasse	
	Neigung	20° Höhe	
	Exposition	230°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Parabraunerde-Pseudogley	
	Humusform	humusreicher Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	110	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	127	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	486	hoch
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	10.3	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.73	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8c, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-5	Oh		2/1	3.4			Sub2	69/ 11/ 37/ 58	1	30.3	0	5	55.11	16.2
5-10	Ah		3/2	3.41		Lu	Sub2	58/ 7/ 27/ 51	2	9.85	0	4	9.71	
10-30	Al	20	10YR 5/4	3.81		Ls2	Sub3	59/ 10/ 25/ 50	2	3.19	0	3	4.68	
30-80	Sd	40 60 80	10YR 6/4 7.5YR 6/8 Rost 10YR 7/3 Flecke	3.84		Ls2	pol3	47/ 1/ 17/ 46	3	1.5	5	1	3.72	
80-110	BvCv	100	5Y 6/1 10YR 6/6 Flecke	3.91		Ls4	pol2	45/ 1/ 17/ 44	3	0.43	10	0.5	23.39	
		120 140												

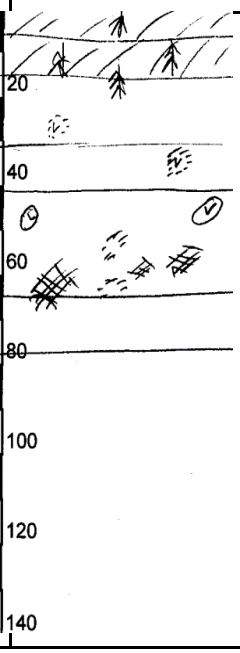
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Menzingen	
	Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, F	
	Koordinaten (1:25'000)	692477 223904	
	Datum der Aufnahme	18.06.2020	
	Geologie	Granitische Molasse	
	Neigung	20° Höhe	
	Exposition	230°	
	Lage im Relief	Mittelhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Psuedogley-Braunerde	
	Humusform	Mullartiger Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	90	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	105	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	340	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	3	mittel staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	18.0	tief
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.81	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 8c/19a, NaiS 8*		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-4	Ah ober		3/1	3.63	0		Krü	57/ 6/ 29/ 51	2	30.9	0	5	71.93	19
4-15	Ah unter		10YR 3/2	3.73	0	SLu	Krü	57/ 6/ 26/ 51	2	5.93	0	4	15.3	
15-30	AhBv		10YR 3/4	3.8	0	Slu	Sub2	54/ 12/ 24/ 42	2	3.74	0	3	11.21	
30-60	Bv		10YR 5/4	3.93	0	SL4	Sub2	39/ 4/ 22/ 35	2	1.35	5	2	14.44	
60-90	SwBv		2.5YR 7/2 10YR 6/8 Flecke	3.94	0	Su2	pol3	39/ 2/ 16/ 37	3	0.31	10	0.5	17.27	

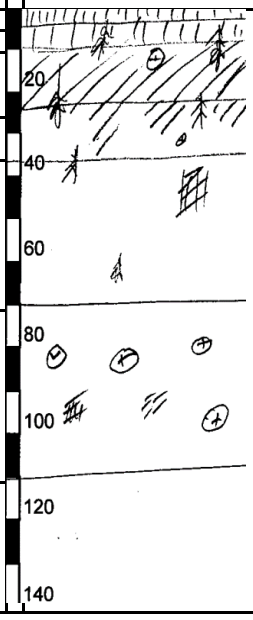
Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Menzingen	
	Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, G	
	Koordinaten (1:25'000)	692436 224016	
	Datum der Aufnahme	18.06.2020	
	Geologie	Granitische Molasse	
	Neigung	15° Höhe	
	Exposition	200°	
	Lage im Relief	Oberhang	
		Verbale Kurzbeschreibung	
	Bodenform	Pseudogley-Braunerde	
	Humusform	Mullartiger Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	70	mittel
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	97.4	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	212	gering
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	13.1	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.70	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 19a, NaiS 19		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-4	Ah ob.		3/2	3.27	0	Su4	krü	54/ 11/ 34/ 44	2	30.8	0	4	52.3	20
4-15	Ah unt.		10YR 3/3	3.38	0	Su4	krü Sub2	54/ 11/ 31/ 44	2	10 4.46	0	3	14.93	
15-25	AhBv		10YR 4/3	3.79	0	Su4	Sub2	47/ 8/ 26/ 39	2	3.35	0	2	8.18	
25-40	Bv		10YR 4/4	3.96	0	Su3	Sub2	53/ 4/ 25/ 49	2	2	2	2	6.79	
40-70	SwBv		10YR 6/4 7.5YR 5/8 Rost 2.5YR 7/1	4.17	0	Ls4	pol4	43/ 14/ 17/ 29	3	0.84	10	0.5	10.64	
70-90	Cv										100			

Profilfoto	Standort-Daten		
	Politische Gemeinde	Menzingen	
	Standortbezeichnung	1213, Menzingen Kalkung, H	
	Koordinaten CH1903	692399 224020	
	Datum der Aufnahme	18.06.2020	
	Geologie	Granitische Molasse	
	Neigung	15° Höhe	
	Exposition	200°	
	Lage im Relief	Oberhang	
	Verbale Kurzbeschreibung		
	Bodenform	Pseudogley-Braunerde	
	Humusform	fein humusreicher Moder	
	Durchwurzelungstiefe (cm)	110	tiefgründig
	nutzbare Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	131	mittel
	Feldkapazität des Wurzelraums (mm)	388	mittel
	Vernässung (Stufe 0-6)	2	schwach staunass
	Luftkapazität (Stufe 1-5)	3	mittel
	Basensättigung 0-40 cm (%)	11.2	kritisch
	pH(CaCl2) 0-40 cm	3.78	sehr stark sauer
	pflanzensoziologische Einheit B+S 19a, NaiS 19		

Profil-Aufnahme

Horizont		Profilskizze	Farbe	pH	Kalk	Bd.art	Gefüge	Poren	Dichte	Humus	Skelett	Wurz.	BS	C/N
Tiefe	Bez. 62		Munsell	CaCl2	Mü. 94	Mü. 80	Mü. 125	GPV /LK /nFK /FK	Mü. 126	org. S%	Vol%	Mü. 130	%	
0-3	Of		3/1	3.25	0			69/ 11/ 37/ 58	1	84.7	0	5	96.89	24.5
3-8	Oh		3/1	3.1	0		brö2	69/ 11/ 37/ 58	1	18.1	0	4	15.92	
8-25	Ah		10YR 3/3	3.71	0	Lu	Sub2	59/ 11/ 26/ 48	2	5.6	2	4	7.38	
25-35	AhBv		10YR 6/8	4.01	0	Ls4	Sub2	59/ 12/ 25/ 48	2	2.89	2	3	6.32	
35-70	Bv		10YR 7/6	4.13	0	Ls4	Sub3	39/ 2/ 18/ 36	3	1.62	5	2	6.03	
70-110	SwBv		10YR 6/6 10YR 7/1 Flecke 7.5YR 5/6 Rost	4.02	0	Ls2	Sub3	40/ 4/ 23/ 36	2	0.12	30	1	4.95	

Forum für Wissen 2022: 65–70

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 Dolomitkalkes 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 Luftreinhaltemassnahmen führten zu einer markanten Abnahme der Emissionen von SO_2-S und NO_x-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 Streuzersetzng. 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 Bodens erfolgt sowohl durch den direkten Eintrag von starken Säuren wie Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3), welche vorwiegend aus antropogenen Quellen (Verbrennungsprozesse und Landwirtschaft) stammen, als auch vorwiegend durch die Auswaschung von überschüssigem Nitrat (NO^{3-}) (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, Brennnesseln, Brombeeren), Nitrat im Trinkwasser, und nicht zuletzt die Wirkung von Stickoxiden, welche bei der Denitrifizierung frei werden, als Treibhausgas (N_2O) und als Vorstufe der Ozonbildung in der Troposphäre (NO_x; 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 Säureeinträge
- Verbesserung der Magnesium-, Kalium- und Phosphorversorgung der Bäume

Bei einer Bodenschutzkalkung mit Dolomitkalk werden in der Bodenlösung Ca^{2+} und 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 HCO^{3-} erhöht die Alkalinität der Bodenlösung und wirkt zusätzlich puffernd (Sverdrup und Warfvinge 1993). Somit können Säureeinträge 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 Deckungsgrad und die Artenzahl erhöht waren, und in der Biodiversität im Boden, mit posititven Effekten der Kalkung auf die epigäischen (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 Dolomitkalk 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 Standortswahl 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 Busswil bei Melchnau (BE), eine Buchenfläche bei Bachs (ZH) und eine Fichtenfläche bei Menzingen (ZG), siehe Tabelle 1. Die Einrichtun-

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

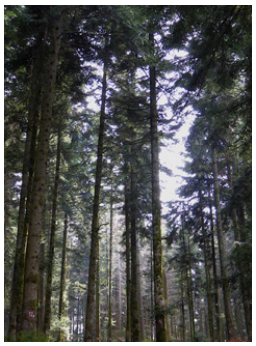
Jede Untersuchungsfläche wurde in 8 Parzellen unterteilt, jeweils 4 gekalkt und 4 zur Kontrolle ohne Kalkung. Vor der Kalkung wurden Bodenproben gesammelt und Bodenprofile erstellt für die Bodenansprachen. Zudem wurden Bodenfeuchtesonden und Lysimeter für das Bodenwassersampling (12 Lysimeter in 2 verschiedenen 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 Elementkonzentrationen 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 % $CaCO_3$ und 10 % $MgCO_3$ (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 hochaufgelöst (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^{2+}- und Ca^{2+}-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 Standortswasserbilanz 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 $CaCl_2$) und die Basensättigung sind berechnet für 0–40 cm Bodentiefe. Die modellierten N-Depositionen (Nass- und Trockendeposition) wurden gemäss Rihm 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^{-1} a^{-1})	31,8	20,3	24,8

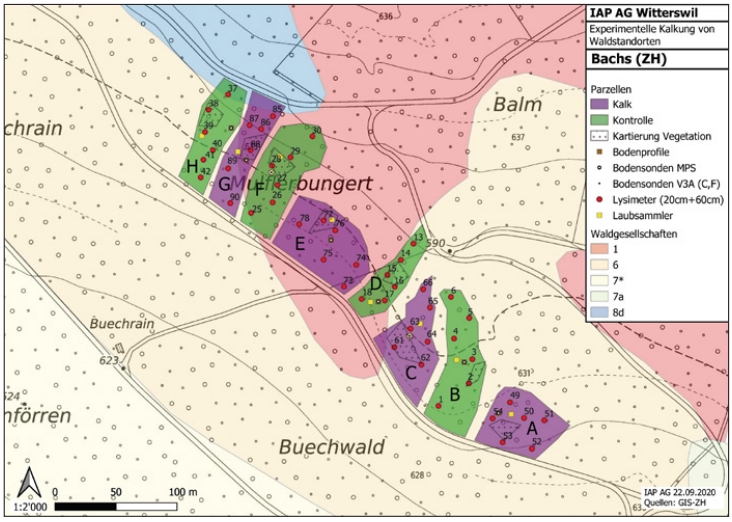


Abb. 1. Einrichtungen in den Untersuchungsflächen anhand des Beispiels der Buchenfläche in Bachs (ZH), eingezeichnet in die pflanzensoziologische Karte des Kantons Zürich. Die zwei Farben der 8 Parzellen stellen die Behandlung dar. Das Bodenwasser wird an den 12 Lysimeterstandorten pro Parzelle monatlich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

schlag pro Jahr und für den Tannenstandort 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. Langzeituntersuchungen der WDB zeigen, dass sich die Vitalität mit erhöhter N-Deposition verschlechtert und Anfälligkeiten gegenüber Krankheiten oder Käferbefall gegenüber (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

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 Dolomitkalks 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 Nährstoffentzüge 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

CC BY

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.

Literaturverzeichnis

Augustin, S. and Achermann, B. 2012. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Entwicklung, aktueller Stand und Bewertung. *Schweizerische Zeitschrift fur Forstwes.*, 163(9):323–330.

BAFU. Internationaler Workshop «Kriterien der Kalkungsbedürftigkeit», 2017.

BMELV, 2009. Waldbericht der Bundesregierung. Technical report, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn.

Bobbink, R., Braun, S., Nordin, A., et al. 2011. *Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. Proceedings of an expert workshop, Noordwijkerhout, 23-25 June 2010.* CCE.

Bobbink, R., Loran, C., and Tomassen, H. 2022. Review and revision of empirical critical loads of nitrogen for Europe. *Texte Umweltbundesamt*, 110:1–358.

Børja, I. and 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(1-2):109–119.

Braun, S., 2017. Untersuchungen über die Zusammensetzung der Bodenlösung. Bericht 2017. Technical report, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Witterswil.

Braun, S., Belyazid, S., Burger, T., et al., 2015. Erfassung und Behandlung gefährdeter Waldstandorte. Bericht 2006-2014. Technical report, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.

Braun, S., Schindler, C., and 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., Tresch, S., and Augustin, S. 2020. Soil solution in Swiss forest stands: A 20 year's time series. *PLoS One*, 15(7):e0227530.

Butterbach-Bahl, K., Gundersen, P., Ambus, P., et al. 2011. Nitrogen Processes in Terrestrial Ecosystems. In Sutton, M., Howard, C. M., Erisman, J. W., et al., editors, *Eur. Nitrogen Assess.*, chapter 6, pages 99–125. Cambridge University Press.

CLRTAP. 2004. *Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends.* Number 52/04. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.

Court, M., van der Heijden, G., Didier, S., et al. 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. Manage.*, 409:872–889.

de Witte, L., Rosenstock, N., van der Linde, S., and 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(1):337–350.

Eckelmann, W., Sponagel, H., Grottenthaler, W., et al. 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5.* Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, 5 edition.

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), 2020. Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Situation mit Bezug zur Landwirtschaft im Zeitraum 2000–2018. Technical report, Bern.

Ellenberg, H. and Leuschner, C. 2010. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht.* UTB Uni-Taschenbücher. UTB GmbH.

Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., et al. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa, 1991.

EMEP, 1996. Manual for sampling and chemical analysis. Technical report, NILU.

Etzold, S., Ferretti, M., Reinds, G. J., et al. 2020. Nitrogen deposition is the most important environmental driver of growth of pure, even-aged and managed European forests. *For. Ecol. Manage.*, 458: 117762.

Frehner, M., Wasser, B., and Schwitter, R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Technical report, Bern.

Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., et al. 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53(4):341–356.

Göttlein, A. 2016. Ableitung von Nährelelementrelationen für die mitteleuropäischen Hauptbaumarten aus dem Wertebereich normaler Ernährung im Vergleich zu verfügbaren Literaturdaten. *Allg. Forst- und Jagdzeitung*, 187:237–246.

Greve, M., Block, J., Schüler, G., and Werner, W. 2021. Long Term Effects of Forest Liming on the Acid-Base Budget. *Appl. Sci.*, 11(3):955.

Hamacher, J., Fuchs, J., and Oehlmann, M., 2021. Stickstoff: zu viel des Guten! Beteiligung von Bürger*innen auf dem Weg zu einer nationalen Stickstoffminderung. Technical report.

Huber, C., Baier, R., Göttlein, A., and Weis, W. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany, 2006.

ICP Forests. 2003. *Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe. Technical Report*. Brussels, Geneva.

Jansen, F. and Dengler, J. 2008. GermanSL - eine universelle taxonomische Referenzliste für Vegetationsdatenbanken. *Tuxenia*, 28:239–253.

Jönsson, C., Warfvinge, P., and Sverdrup, H. 1995. Application of the safe model to the Solling spruce site. *Ecol. Modell.*, 83(1-2):85–96.

Mainwaring, D. B., Maguire, D. A., and Perakis, S. S. 2014. Three-year growth response of young Douglas-fir to nitrogen, calcium, phosphorus, and blended fertilizers in Oregon and Washington. *For. Ecol. Manage.*, 327(October 2017):178–188.

Manghabati, H., Kohlpaintner, M., Ettl, R., et al. 2018. Correlating phosphorus extracted by simple soil extraction methods with foliar phosphorus concentrations of Picea abies (L.) H. Karst. and Fagus sylvatica (L.). *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 181(4):547–556.

Nilsen, P. 2001. Fertilization Experiments on Forest Mineral Soils: A Review of the Norwegian Results. *Scand. J. For. Res.*, 16(6):541–554.

Nilsson, S., Andersson, S., Valeur, I., et al. 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. Manage.*, 146(1-3): 55–73.

Persson, H. and Ahlström, K. 1990. The effects of forest liming on fertilization on fine-root growth. *Water, Air, Soil Pollut.*, 54(3):365–375.

Persson, T., Andersson, S., Bergholm, J., et al. 2021. Long-Term Impact of Liming on Soil C and N in a Fertile Spruce Forest Ecosystem. *Ecosystems*, 24(4): 968–987.

Puhlmann, H., Hartmann, P., Mahlau, L., et al. 2021. Regenerationsorientierte Bodenschutzkalkung in den Wäldern Baden-Württembergs – Evaluierung der Umsetzung und der Wirksamkeit des Kalkungsprogramms in den Jahren 2010 bis 2019. *Berichte Freiburg. Forstl. Forsch.*, 104.

RCore Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022.

Rihm, B. and 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. Technical report, Bern.

Rihm, B. and Künzle, T., 2023. Nitrogen deposition and exceedances of critical loads for nitrogen in Switzerland. Technical report, Meteotest, FOEN, Bern.

Schulla, J. 2019. *Model description WaSiM-ETH*. Hydrology Software Consulting J. Schulla, Zürich.

Schweizerischer Bundesrat, 2017. Optionen zur Kompensation der Versauerung von Waldböden und zur Verbesserung der Nährstoffsituation von Wäldern - Darstellung und Bewertung. Technical report.

Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., et al. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science (80-.).*, 347 (6223):1259855–1259855.

Sverdrup, H. and 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*. Lund University, Department of Chemical Engineering II, Lund.

Tresch, S., Hopf, S., and Braun, S. 2022. Pilotprojekt Experimentelle Kalkung von Waldstandorten: Hintergrund und erste Ergebnisse. *WSL Berichte*, 126: 65–70.

Ulrich, B. 1986. Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkd.*, 149(6):702–717.

van der Linde, S., Suz, L. M., Orme, C. D. L., et al. 2018. Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi. *Nature*, 558(7709):243–248.

Walinga, I., van der Lee, J. J., Houba, V. J., van Vark, W., and Novozamsky, I. Plant analysis manual, 1995.

Weis, W., Gruber, A., Huber, C., and Göttlein, A. 2009. Element concentrations and storage in the aboveground biomass of limed and unlimed Norway spruce trees at Höglwald. *Eur. J. For. Res.*, 128(5): 437–445.

Wellbrock, N., Lauer, A., Eickenscheidt, N., et al. 2016. Bodenversauerung und Nährstoffverfügbarkeit. In Wellbrock, N., Bolte, A., and Flessa, H., editors, *Dynamik und räumliche Muster Forstl. Standorte Deutschl. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*, chapter 4, pages 75–134. Johann Heinrich von Thünen-Institut, 43 edition.