Zeitschrift: Mitteilungen / Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn
Band: 45 (2023)

Artikel: Forschung im Waldreservat am Bettlachstock
Autor: Waldner, Peter / Hobi, Martina / Stillhard, Jonas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1007786

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Forschung im Waldreservat am Bettlachstock

Peter Waldner, Martina Hobi, Jonas Stillhard, Peter Brang†, Christian Hug, Anne Thimonier, Maria Schmitt, Marco Walser, Roger Köchli, Alois Zürcher, Daniel Christen, Noureddine Hajjar, Marcus Schaub, Flurin Sutter, Matthias Häni, Katrin Meusburger, Arthur Gessler, Anita Nussbaumer, Tatiana Hirsiger, Joachim Zhu

Dr. Peter Waldner
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
peter.waldner@wsl.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung | **163**

Schlagworte | **163**

1 Einleitung | **164**

2 Material und Methoden | **166**

2.1 Monitoring zur Erforschung der Waldentwicklung im Reservat | **166**

2.2 Einrichten einer Fläche eines Internationalen Kooperationsprogramms zur Erfassung des Waldzustandes | **167**

3 Resultate | **169**

3.1 Vielfältiges und naturnahes Waldreservat | **169**

3.2 Umwelteinflüsse auf den Wald | **172**

4 Diskussion | **174**

5 Schlussfolgerungen | **175**

6 Dank | **176**

7 Literatur | **176**

Forschung im Waldreservat am Bettlachstock

Peter Waldner, Martina Hobi, Jonas Stillhard, Peter Brang†, Christian Hug, Anne Thimonier, Maria Schmitt, Marco Walser, Roger Köchli, Alois Zürcher, Daniel Christen, Noureddine Hajjar, Marcus Schaub, Flurin Sutter, Matthias Häni, Katrin Meusburger, Arthur Gessler, Anita Nussbaumer, Tatiana Hirsiger, Joachim Zhu

Zusammenfassung

Bewirtschaftung und Umweltbedingungen beeinflussen die Gestalt von Wäldern. Mit der Einrichtung eines Naturwaldreservats wurden am Bettlachstock im Kanton Solothurn die Weichen zur Entwicklung in Richtung eines Naturwaldes gestellt. Im Waldreservat werden im Rahmen des «Monitoring Naturwaldreservate Schweiz» mit Stichprobeninventuren die natürlichen Prozesse der Waldentwicklung und in der «Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF)» mit kontinuierlichen Messungen der Einfluss von Luftverschmutzung und Klimawandel auf den Wald erforscht. Beides sind langfristige Untersuchungen, die Methoden der Waldinventur und Erfassung des Waldzustandes verwenden. Das Reservat ist aufgrund der Standortsvielfalt reich an verschiedenen Baumarten. Diese widerspiegeln das natürliche Artenspektrum. Der hohe Anteil an Fichten zeigt jedoch, dass die frühere Bewirtschaftung diese bewusst gefördert hat. Die Luftbelastung und das Klima hatten und haben nachweislich einen Einfluss auf den Wald am Bettlachstock. Die Luftbelastung ist eher rückläufig und die Klimaveränderung eher zunehmend. Beide stehen aus heutiger Sicht grundsätzlich der Entwicklung zu einem naturnahen Wald an diesem Standort nicht im Wege. Eine Zunahme von trockenen Sommern ist zu erwarten und könnte die Standorteigenschaften verändern. In Teilen des Reservats könnte dies mittelfristig zu vermehrtem Absterben von Tannen und Fichten und in der Folge zu einer Zunahme des Totholzvolumens führen. Langfristig könnte dies Verschiebungen der Höhenstufen und in der Baumartenzusammensetzung hin zu mehr Laubbaumarten auslösen.

Schlagworte

Walddynamik, Luftverschmutzung, Klimawandel, Umweltveränderung

1 Einleitung

In Wäldern bilden Bäume und viele weitere Pflanzen, Tiere und Kleinstlebewesen eine Lebensgemeinschaft, welche den Lebensraum Wald über Jahre gestaltet. Äussere Einflüsse wirken auf die einzelnen Lebewesen ein, was auch deren Wechselbeziehungen laufend verändert und zuweilen auch die Struktur des Waldes. Bei intensiver Nutzung, zum Beispiel durch Waldbewirtschaftung, bewegen sich Wälder vom ursprünglichen Zustand weg. Mit dem Anfang des 20. Jahrhunderts aufkommenden Naturschutz kamen erste Bestrebungen auf, Waldreservate auszuscheiden, in denen Naturwälder erhalten werden oder naturnahe Wälder wieder entstehen können.

Ende der 1970er und Anfang der 1980er Jahre beobachteten Förster Waldschäden, welche die damals zunehmende Luftbelastung als Störfaktor für eine natürliche Waldentwicklung in den Fokus rückten: Aufgrund von Untersuchungen im Ruhrgebiet wurde damals postuliert, dass eine hohe Luftbelastung durch versauernde und eutrophierende Stoffe im Regen den Wald beeinträchtigen kann (Ulrich et al. 1979). Heute zeigt sich zudem, dass auch der Klimawandel die Wälder in der Schweiz beeinflusst und stark umgestalten kann (Pluess et al. 2016).

Die Waldreservate im Gebiet Bettlachstock-Hasenmatt am Südhang der ersten Jurakette (Gemeinden Bettlach und Selzach, Kanton Solothurn) bilden ein bedeutendes Schutzgebiet (Abb. 1 und 2). Mit einer Gesamtfläche von 458 ha ist es nach dem Naturerlebnispark Sihlwald (rund 1098 ha, Gründung 2017) das zweitgrösste Buchen-Naturwaldreservat der Schweiz. In den Wäldern der ursprünglichen Zone des Reservates (rund 90 ha) wurde seit der Gründung im Jahr 1985 kein Holz mehr genutzt. In den umliegenden Wäldern wurde die Nutzung im Zuge der Erweiterungen der Reservate in den Jahren 1998 und 2002 eingestellt. Seit Juli 2021 sind die Reservate zudem Teil eines gesamteuropäischen UNESCO Weltnaturerbes (siehe Kasten).

In diesem Waldreservat wurde in den 1990er Jahren eine Fläche der Langfristigen Waldökosystem-Forschung (LWF) eingerichtet, auf welcher der Einfluss von Luftverschmutzung und Klimawandel auf den Wald untersucht wird. Das Waldreservat ist Teil des Monitoring Naturwaldreservate Schweiz, welches die natürliche Entwicklung von Wäldern erforscht und Vergleiche mit anderen, natürlichen und bewirtschafteten Wäldern zulässt.

Abbildung 1: Bettlachstock (1298 m ü. M.) aus dem Westen aufgenommen mit Solothurn im Hintergrund in der Bildmitte und Balmfluechöpfli (1289 m ü. M) am linken Bildrand. Das Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt erstreckt sich von Rotflue/Büelen in der Gemeinde Bettlach (rechts ausserhalb des Bildes) bis um die Hasenmatt in der Gemeinde Selzach (1445 m ü. M., links ausserhalb des Bildes). Bild: Peter Flückiger

Der Bettlachstock ist Teil eines gesamteuropäischen UNESCO Weltnaturerbes

Im Juli 2021 wurden die Buchenwälder am Bettlachstock im Kanton Solothurn zusammen mit den Buchenwäldern in den Maggia-Seitentälern Lodano, Busai und Soladino (Gemeinde Maggia, Kanton Tessin) als Weltnaturerbe anerkannt. Sie sind nun Teil eines gesamteuropäischen Netzwerks von Buchenwäldern unter dem Schutz der UNESCO in 18 europäischen Ländern mit dem Titel «Alte Buchenwälder und Buchenurwälder der Karpaten und anderer Regionen Europas».

Das UNESCO-Gebiet am Bettlachstock umfasst eine Kernzone von 195 ha, eine Pufferzone von 90 ha zum Schutz vor äusseren Einflüssen rund um die Kernzone sowie eine Landschaftsschutzzone von 1004 ha. Die Kernzone umfasst untermontane Buchenwälder (64 %), obermontane Tannen-Buchenwälder (17 %) sowie Wälder, in denen die Buche aufgrund von extremen Standortsbedingungen nicht dominiert (6 %). Dies sind Ahorn- und Lindenwälder auf bewegtem Hangschutt, Föhrenwälder auf sehr trockenen Felsstandorten sowie Eschen- und Ahornwälder auf nassen Standorten entlang der Bäche. Das Gebiet umfasst auch 7 % ehemals gemähte und beweidete Flächen, welche nicht mehr bewirtschaftet werden. Rund 6 % der Kernzone sind natürlicherweise unbestockt (z. B. Felsen). Die ältesten Bäume im Gebiet sind rund 200 Jahre alt.

In diesem Artikel möchten wir für das Beispiel des Bettlachstocks aufzeigen, wie sich der Wald im Waldreservat entwickelt. Das Ziel war zu beurteilen, wie sich einerseits der Nutzungsverzicht und andererseits die Umwelteinflüsse auf die Entwicklung des Waldes in Richtung naturnaher Wald auswirken.

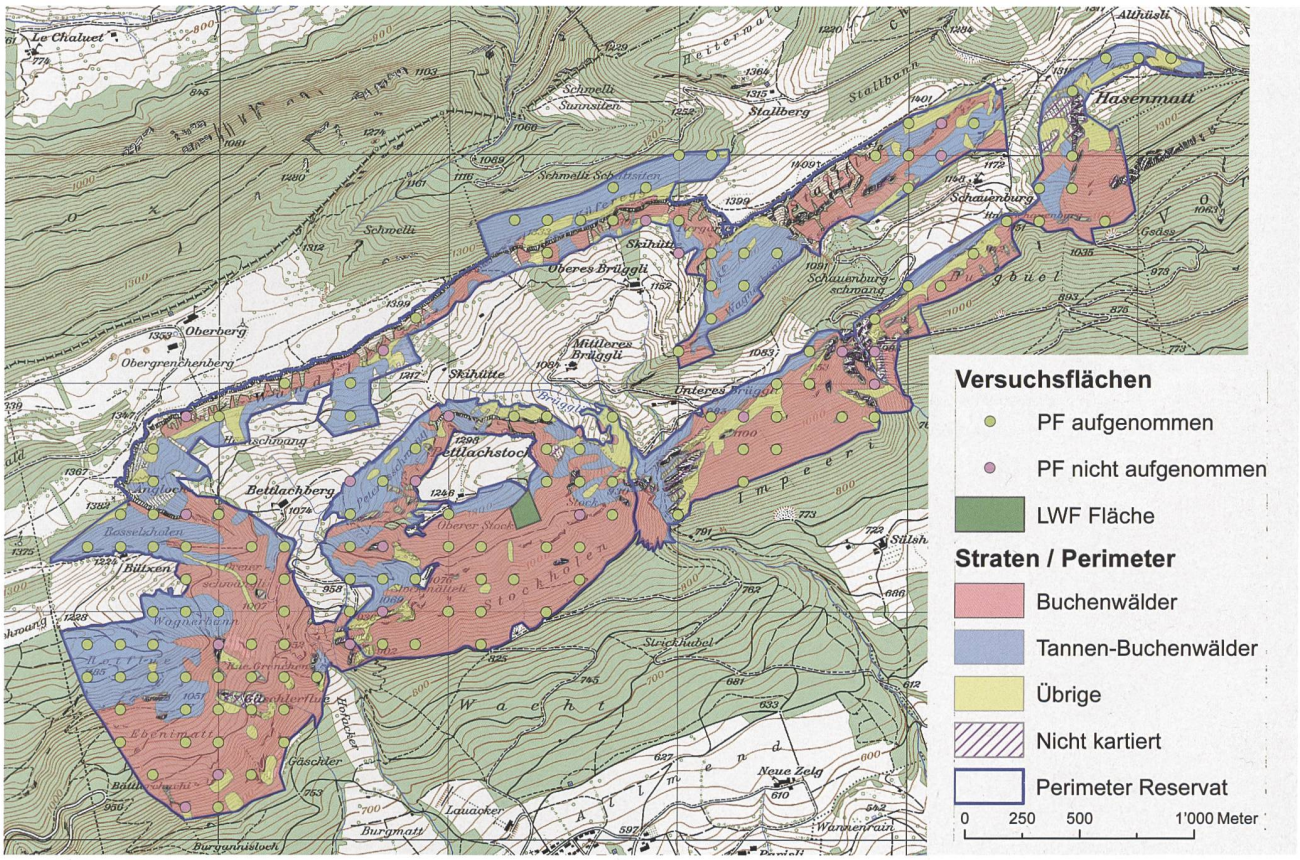

Abbildung 2: Karte mit der Anordnung der Probeflächen (PF) der Stichprobeninventur im Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt und Standort der Fläche der Langfristigen Waldökosystem-Forschung (LWF) am Bettlachstock an der ersten Jurakette im Kanton Solothurn. Kartendaten: swisstopo

2
Material und Methoden

Um die Entwicklung des Waldes zu untersuchen, konnte einerseits auf eine Stichprobeninventur mit 145 regelmässig im Reservat verteilten Probeflächen (siehe Kap. 2.2) und andererseits auf die intensiven Untersuchungen einer kleinen Teilfläche im Reservat im Rahmen der LWF (siehe 2.3) zurückgegriffen werden (Abb. 2).

2.1
Monitoring zur Erforschung der Waldentwicklung im Reservat

Das Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt ist Teil eines Netzwerks von 50 über die gesamte Schweiz verteilten Naturwaldreservaten. In diesem Netzwerk beobachten die WSL, die ETH Zürich und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) im Rahmen des Kooperationsprojektes «Monitoring Naturwaldreservate» die natürliche Waldentwicklung. Als Teil dieses Projektes und im Auftrag des Amts für Wald, Jagd und Fischerei des Kanton Solothurns startete Hasspacher & Iseli GmbH im Jahr 2014 das Monitoring im Reservat Bettlachstock-Hasenmatt. Es basiert auf einer Stichprobeninventur der lebenden und toten Bäume und hat zum Ziel, die strukturelle Entwicklung dieses Waldes zu beobachten.

Die Inventur im Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt wurde im Winter 2014/15 zum ersten Mal durchgeführt (Commarmot et al. 2017). 145 permanente Probeflächen wurden auf einem regelmässigen Netz auf einer Fläche von 369 ha verteilt (Abb. 2). Es wurden 126 Probeflächen aufgenommen und Informationen zum Baumbestand, zum Totholz, zu Habitatstrukturen und zur Verjüngung erfasst. Habitatstrukturen sind beispielsweise Totholz in der Krone, Risse und Spalten am Stamm oder Baumhöhlen, die wichtige Lebensräume für verschiedene Insekten und Vogelarten bieten (Abb. 3). Mit aus den erhobenen Daten abgeleiteten Kennzahlen wurden die zwei im Reservat am stärksten vertretenen Waldtypen, der Buchenwald und der Tannen-Buchenwald, charakterisiert. Auch ausserhalb dieser zwei Waldtypen gelegene Probeflächen wurden aufgenommen, um ein Gesamtbild über den Wald im Waldreservat zu erhalten.

Die Aufnahmen erfolgten auf zwei kreisförmigen Probeflächen: einer kleinen Fläche von 200 m² und einer grossen Fläche von 500 m². Erfasst wurden alle lebenden und toten stehenden Bäume mit einem Stammdurchmesser auf Brusthöhe (BHD) von mindestens 7 cm auf den kleinen und 36 cm auf den grossen Probeflächen. Auf drei

Abbildung 3: Konsolenpilze an Totholz als Beispiel für Habitatstrukturen. Bild: Markus Bolliger

Verjüngungsprobeflächen wurden alle Bäumchen mit einer Höhe von 10 bis 39.9 cm (10 m²-Probekreis), einer Höhe von 40 bis 129.9 cm (20 m²-Probekreis) und einer Höhe ab 130 cm sowie einem BHD bis 6.9 cm (50 m²-Probekreis) erfasst. Das liegende Totholz wurde auf drei Linientransekten von 15 m Länge erfasst. Basierend auf diesen Daten wurden Kennzahlen wie die Stammzahl, die Basalfläche (die Querschnittsfläche aller Baumstämme) und das Holzvolumen pro Hektare mittels Lokaltarifen der Bürgergemeinde Bettlach geschätzt. Die Schätzgenauigkeit der Mittelwerte aller Kennzahlen wird durch den einfachen Standardfehler angegeben. Dieser beschreibt die obere und untere Vertrauensgrenze für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 68 %. Um eine Aussagewahrscheinlichkeit von 95 % zu erhalten, muss der Standardfehler mit 1.96 multipliziert werden.

2.2 Einrichten einer Fläche eines Internationalen Kooperationsprogramms zur Erfassung des Waldzustandes

Da die Luftbelastung an Landesgrenzen nicht Halt macht, vereinbarten die Länder Europas in der Genfer UNECE Konvention 1979 über weitreichende Luftbelastung (Air Convention) ein gemeinsames Vorgehen in der Luftreinhaltung (SR 0.814.32 1979). Im zugehörigen Internationalen Kooperationsprogramm zum Wald (ICP Forests) wurde Mitte der 1980er Jahre damit begonnen, den Waldzustand jährlich systematisch auf einem 16 x 16 km Netz von Probeflächen aufzunehmen (In der Schweiz: Sanasilva Inventur, siehe Brang 1998; Europa: ICP Forests, siehe Michel et al. 2021). Bald liessen mehrere grossangelegte Forschungsprogramme wie jenes des Schweizer Nationalfonds (NFP 14: Haemmerli et al. 1992) mit Standorten an der Lägern (Wettingen AG), im Alptal (Alpthal SZ) und im Seehornwald (Davos GR) vermuten, dass dies nicht genügt, um mit genügender Sicherheit auf die Ursachen von Waldzustandsveränderungen zu schliessen.

Im ICP Forests Meeting 1990 in Interlaken, bei dem die Schweiz Gastgeberin war, wurde angestrebt, ein gemeinsames Flächen-Messnetz einzurichten, um Ursache-Wirkungsbeziehungen zwischen Umwelteinflüssen und deren Auswirkungen auf das Ökosystem Wald intensiv zu untersuchen. In den Expertengremien wurden in der Folge harmonisierte Methoden entwickelt (ICP Forests 2010).

In der Schweiz begann die WSL ab 1993 in Zusammenarbeit mit den Kantonen mit der Auswahl von 1 bis 2 ha

Abbildung 4: Regensammler (links), Tensiometer zur Messung des Matrixpotentials des Bodenwassers (Bildmitte) und Streusammler (rechts) auf der LWF-Fläche am Bettlachstock. Bild: WSL

grossen Flächen für die Langfristige Waldökosystem-Forschung (LWF) unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien: Unter anderem sollten die Flächen homogen sein und die wichtigsten Waldgesellschaften und die verschiedenen Regionen sollten abgedeckt werden. Von 16 vom Kanton Solothurn vorgeschlagenen Flächen wurden zwölf besichtigt und schliesslich eine Fläche am oberen Bettlachstock ausgewählt (Abb. 2). Die Fläche lag im Reservat und zudem an der oberen Nebelgrenze, wo eine Aufkonzentration von Schadstoffen in den Nebeltröpfchen vermutet wurde. Den Nutzungsvertrag zwischen dem Kanton Solothurn und der WSL unterzeichnete im Juni 1995 unter anderem der damalige Kantonsoberförster J. Froelicher.

Bereits im selben Sommer wurden auf dieser Fläche die ersten jährlichen Waldzustandsaufnahmen und im November die Messung der Nährstoffversorgung der Nadeln (Blattspiegelwerte) an Tannen durchgeführt. Im Jahr 1996 folgte die erste der 5-jährlichen Baum-Inventuren und eine detaillierte Bodenbeprobung. Ab 1998 bzw. 1999 begannen kontinuierliche Probenahmen von Niederschlag, Streufall und Bodenwasser (Bodenlösung) für chemische Analysen (Abb. 4). Auf der Fläche im Wald und ausserhalb des Waldes (Stockmätteli) wurde zudem je eine meteorologische Station eingerichtet (Abb. 5). Die Entwicklung der Kronenverlichtung auf der LWF-Fläche haben wir mit einem paarweisen T-Test und linearer Regression untersucht.

Die 1.3 ha grosse, eher steile (66 % geneigte) Fläche liegt auf einer Höhe zwischen rund 1100 und 1200 m ü. M. am Südhang des Bettlachstocks in einem Linden-Zahnwurz-Buchenwald mit Grauem Alpendost (*Cardamino-Fagetum tilietosum*, Nr. 13h nach Ellenberg und Klötzli 1972). Im Bestand kommen neben Buchen, Tannen und Fichten auch Bergahorne und einzelne Eschen, Ulmen und Eiben vor. Der Hang ist mit hartem kalkhaltigem Hangschutt aus der Dogger-Zeit bedeckt. Der Boden ist fast überall kalkhaltig und enthält mit einem Gesteinsvolumen von 50–75 % sehr viele Steine (Walthert et al. 2003). Zwischen den Steinen ist der Oberboden locker gelagert und enthält viel Humus. Die Wurzeln können den Boden an vielen Stellen bis mindestens 1 m Tiefe erschliessen, lokal auch weniger tief als Folge von felsigem Untergrund. Der Boden wird als Rendzina und an flachgründigen Stellen als Lithosol klassiert. Der Mull als Humusform weist auf eine hohe biologische Aktivität und Mineralisierungsrate im Oberboden hin. Die anfallende Blattstreu wird demnach innerhalb eines Jahres weitgehend zersetzt.

Die LWF-Fläche wurde in der Folge unter anderem auch im Rahmen von Exkursionen besucht, wie beispielsweise im Jahr 2010 anlässlich einer Exkursion der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Solothurn an den Bettlachstock (Abb. 5).

Abbildung 5: Die Naturforschende Gesellschaft des Kantons Solothurn auf einer Exkursion am Bettlachstock im September 2010 vor der meteorologischen Messstation und den Niederschlagssammlern der Langfristigen Waldökosystem-Forschung (LWF) ausserhalb des Waldes auf dem Stockmätteli. Bild: Peter Flückiger

3
Resultate

3.1
Vielfältiges und naturnahes Waldreservat

Bei der Stichprobeninventur 2014/15 wurden im Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt 21 Baumarten erfasst (Commarmot et al. 2017). Die häufigste Baumart im gesamten Reservat war mit einem Anteil von 38.9 % an der Anzahl der Stämme die Buche gefolgt von der Tanne und der Fichte, deren Anteil je 14.3 % ausmachte. Relativ häufig mit einem Anteil zwischen 0.7 und 9 % waren auch Bergahorn, Esche, Mehlbeere, Eibe, Waldföhre, Bergföhre, Bergulme, Vogelbeere und Weide. Die Baumartenmischung in den verschiedenen Waldtypen unterscheidet sich dabei nur geringfügig (Abb. 6). Im Reservat fanden sich 735 ± 46 lebende Bäume pro Hektar (ha) mit einer Basalfläche von 36.1 ± 1.3 m² pro ha und einem Volumen von 371 ± 15 m³ pro ha. Der Totholzvorrat lag bei 35.0 m³ pro ha, wovon 57 % liegendes Totholz waren. Interessanterweise unterschieden sich die beiden Waldtypen Buchenwald und Tannen-Buchenwald betreffend den Kennzahlen Stammzahl, Basalfläche, Holzvorrat und Totholz kaum (Abb. 7). Lediglich die Dichte der Baumgiganten (Bäume mit BHD ≥ 80 cm) war im Tannen-Buchenwald mit 3.6 ± 1.4 lebenden Giganten pro ha deutlich höher als im Buchenwald (0.6 ± 0.4 pro ha). Das entspricht einem Gesamtwert von 1.8 ± 0.6 Giganten pro ha im ganzen Reservat. Die Bäume im Reservat wiesen eine Vielzahl an Habitatstrukturen auf, wobei flächige Rindenverletzungen, Löcher am Stamm und Kronentotholz am häufigsten waren. Insgesamt fanden sich 136 ± 13 lebende und 13 ± 2 tot stehende Bäume pro ha mit Habitatstrukturen.

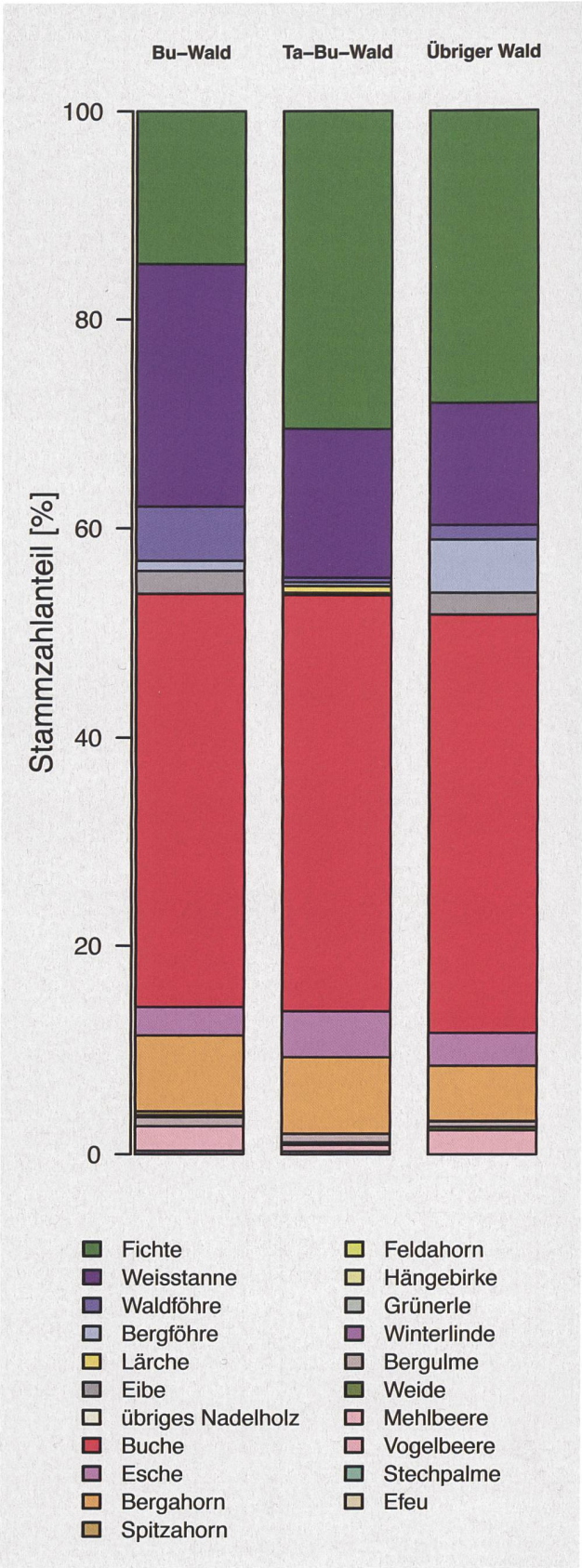

Abbildung 6: Stammzahlanteile der Baumarten nach Waldtyp-Straten im Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt gemäss Stichprobeninventur von 2014 bis 2015 (Bu-Wald = untermontaner Buchenwald, Bu-Ta-Wald = obermontaner Tannen-Buchenwald).

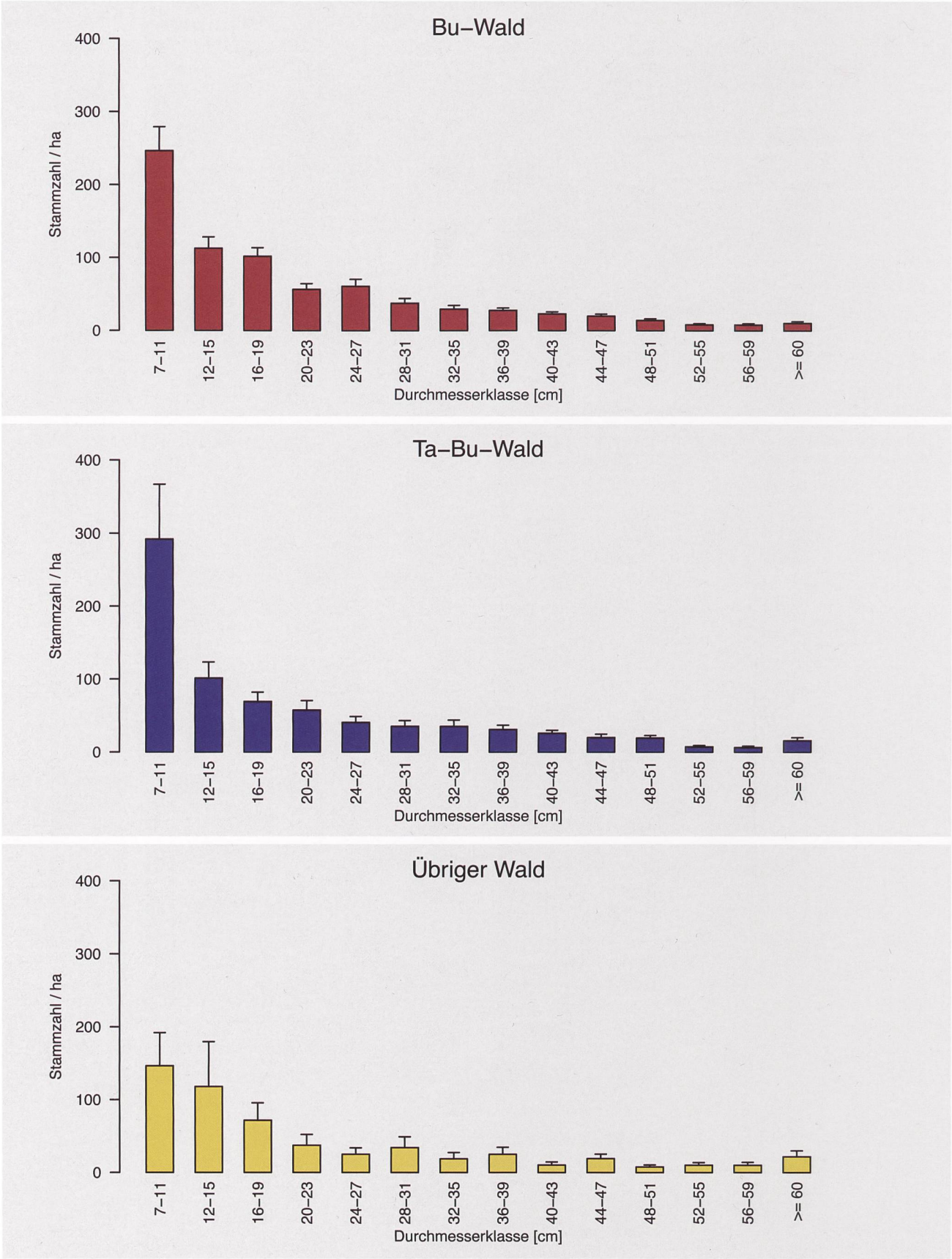

Abbildung 7: Durchmesserverteilung der stehenden Bäume nach Waldtyp-Straten im Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt gemäss Stichprobeninventur von 2014 bis 2015 (Bu-Wald = untermontaner Buchenwald, Bu-Ta-Wald = obermontaner Tannen-Buchenwald).

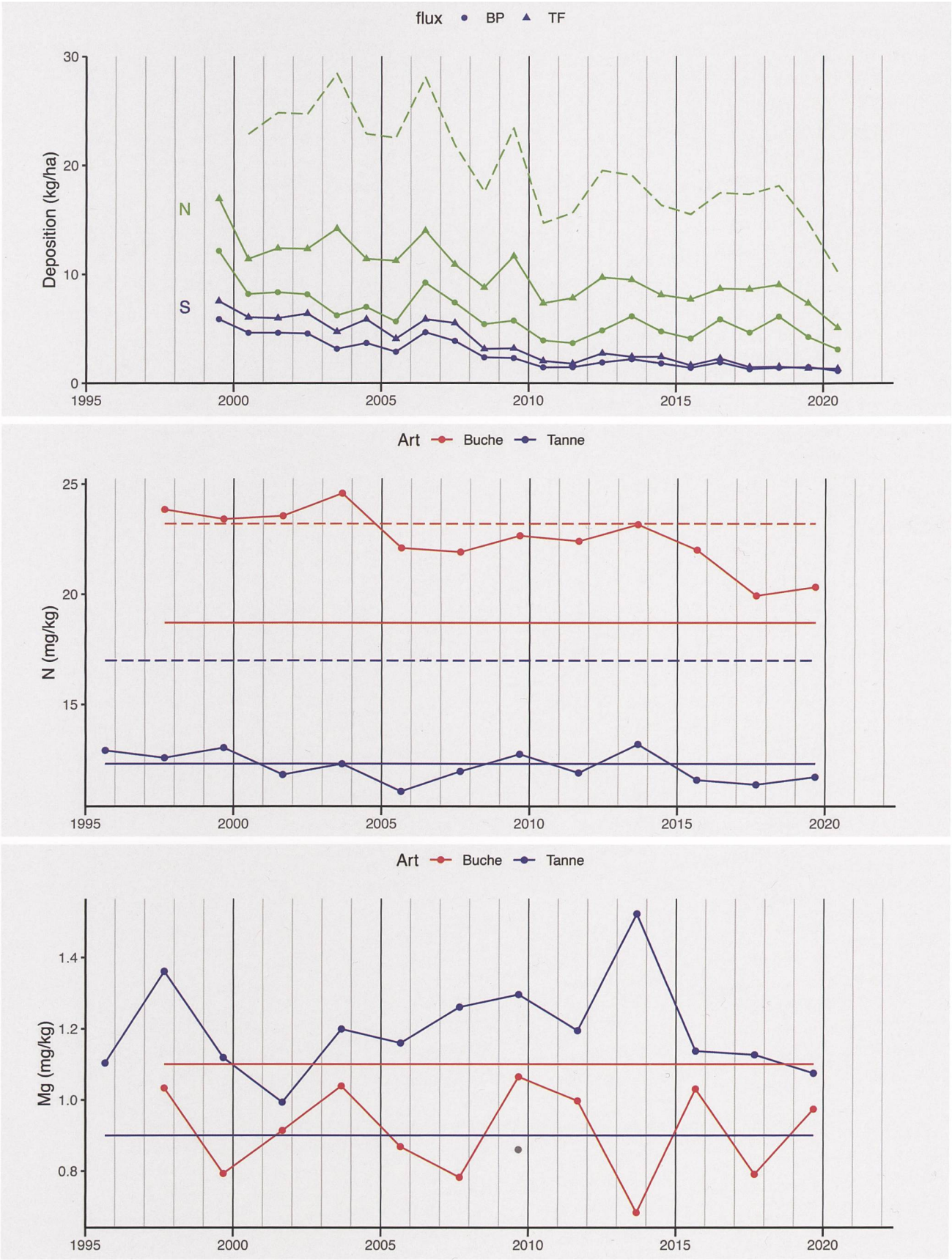

Abbildung 8: Atmosphärische Deposition von anorganischem Stickstoff (N) und Schwefel (S) im Freiland (BP) und Bestand (TF) sowie zweifache N-Deposition (gestrichelt), Konzentrationen von Stickstoff (N) und Magnesium (Mg) in den Blättern und Nadeln (Blattspiegelwerte) mit eingezeichnetem genügendem bis optimalem Bereich (gestrichelt: Obergrenze, durchgezogen: Untergrenze) nach Göttlein (2011) auf der LWF-Fläche am Bettlachstock.

3.2
Umwelteinflüsse auf den Wald

Der Holzvorrat auf der 1.3 ha grossen LWF-Fläche lag in den Aufnahmen von 1995, 2000 und 2005 mit 354 m³, 372 m³ und 400 m³ pro ha durchaus im für das ganze Reservat typischen Bereich (371 ± 15 m³ pro ha im Jahr 2014, siehe 3.2). Der mittlere Zuwachs betrug rund 5 bis 6 m³ pro ha und Jahr. Die Mortalität war mit rund 0.16 % pro Jahr eher tief.

Wie erwartet, war die Luftbelastung in den 1990er Jahren – trotz des eher ländlichen Gebietes über dem Mittelland – spürbar. Die Gesamtdeposition von Stickstoff betrug 1999 rund 18 bis 36 kg pro ha und jene des ebenfalls versauernd wirkenden Schwefels gegen 10 kg pro ha (Abb. 8). Bei Stickstoff lag somit vermutlich eine Überschreitung der kritischen Belastungswerte (Critical Loads) vor (Thimonier et al. 2019). Dies spiegelte sich auch in den Konzentrationen in den Blättern (Abb. 8). Die Konzentration von Stickstoff lag anfangs bei Buchen leicht über dem genügenden bis optimalen Bereich (nach Göttlein et al. 2011) und jene von Magnesium leicht darunter. Bei der zweiten Hauptbaumart, der Tanne, waren die Werte für Stickstoff – wie für Nadelbäume in der Schweiz typisch – eher am unteren Rand des optimalen Bereichs (Jonard et al. 2012). Mangelsymptome wurden bei den untersuchten Blättern jedoch nicht beobachtet. In den darauffolgenden Jahren bewirkten die Luftreinhaltemassnahmen eine deutliche Abnahme der Deposition, was sich auch in den Stickstoffkonzentrationen der Blätter der Buchen spiegelte (Waldner et al. 2014, Waldner et al. 2015).

Auf der LWF-Fläche reflektiert der visuell begutachtete Kronenzustand jedoch weniger die Luftbelastung, sondern eher die Trockenjahre und bei Buchen die Mastjahre (Abb. 9). Der Niederschlag war in den Jahren 2003, 2005, 2015 und 2018 insbesondere im Sommer bis Frühherbst (Juni bis Oktober) relativ gering, und die Böden trockneten in den oberen Schichten (15 bis 75 cm Tiefe) stärker aus als in anderen Jahren (Abb. 9). Da die Kronenverlichtung bereits Anfang Sommer beurteilt wird, ist sie jeweils im Folgejahr erhöht, was bei Buchen im Jahr 2016 und 2019 gut ersichtlich war (Abb. 9). Buchen produzieren typischerweise alle zwei (bis drei) Jahre viele Buchennüsse (Mastjahre). In diesen Mastjahren produzieren sie tendenziell weniger Blätter (Nussbaumer et al. 2021a). Im Jahr 2018 blieb trotz starker Blüte im Frühling wegen der Trockenheit im Sommer das Mastjahr schliesslich aus (Nussbaumer et al. 2021b). Insgesamt ist keine Verschlechterung des Kronenzustands zu beobachten, so war mittels T-Test, je nachdem welche Jahre miteinander verglichen wurden, eine signifikante Zu- oder Abnahme oder keine signifikante Veränderung zu beobachten. Eine lineare Regression über alle erfassten Jahre ergab bei Tannen eine leichte Abnahme (Trend: –0.57 % pro Jahr, $n = 25$, $R^2 = 0.49$, $p < 0.01$). Bei Buchen resultierte hingegen eine leichte, nicht signifikante Zunahme der Kronenverlichtung (Trend: +0.09 % pro Jahr, $n = 55$, $R^2 = 0.03$, $p = 0.36$).

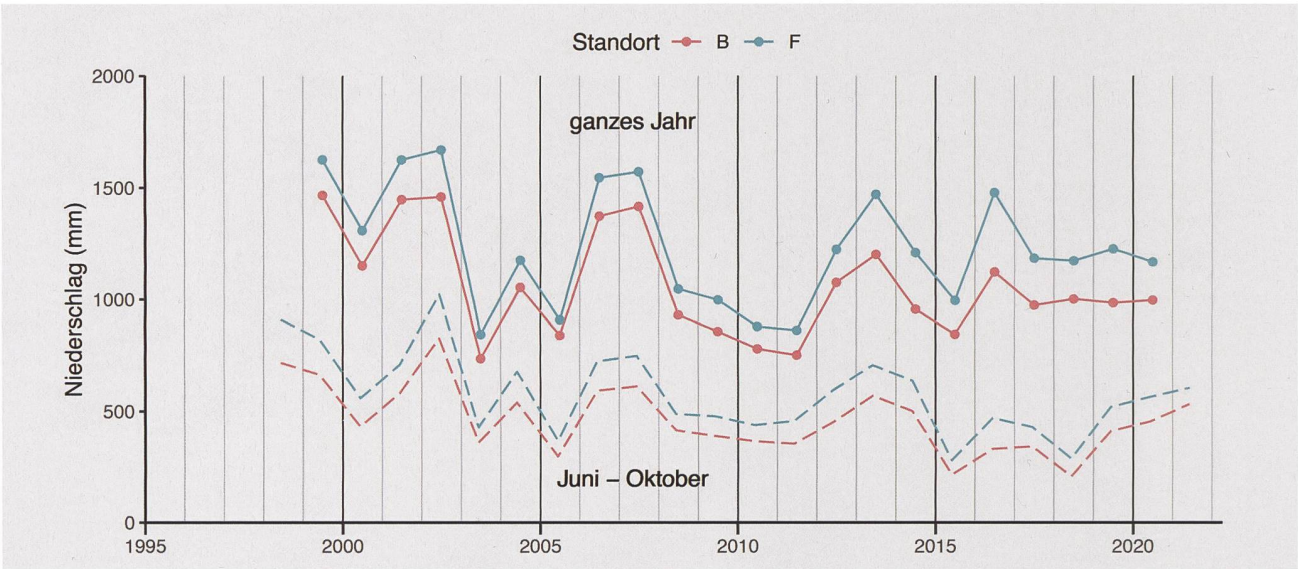

Abbildung 9: Niederschlag (mm) im Freiland (F) und Bestand (B) für das ganze Jahr (durchgezogene Linie) und die Monate Juni bis Oktober (gestrichelt); Matrixpotential des Bodenwassers; mittlere Kronenverlichtung und Streufall auf der LWF-Fläche am Bettlachstock.

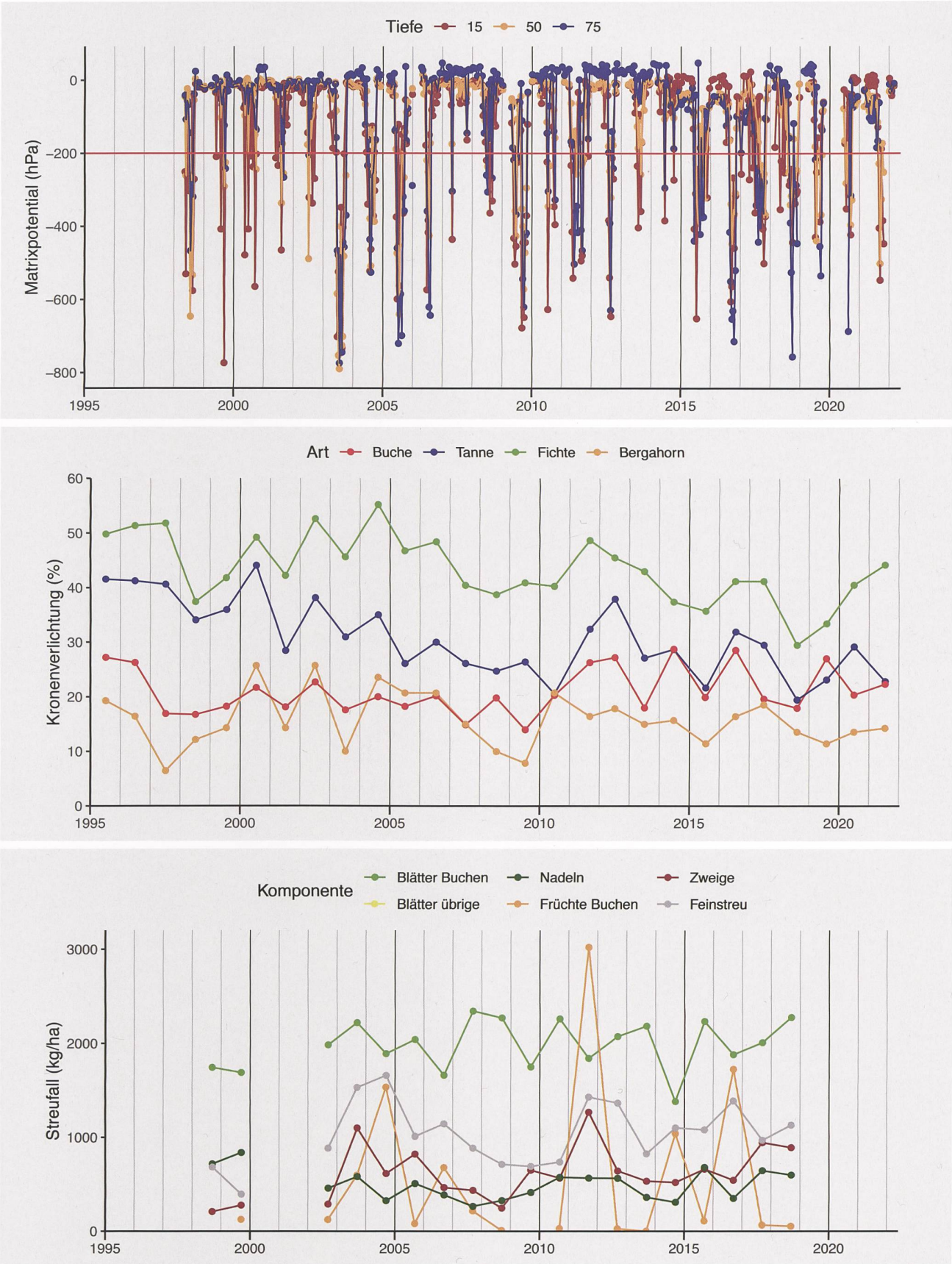

Abbildung 9: Fortsetzung

4
Diskussion

In Bezug auf die Waldstruktur und die Baumartenzusammensetzung befindet sich das Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt somit bereits in einem naturnahen Zustand. Dazu beigetragen hat hauptsächlich die schon früher grosse Zurückhaltung bei der Bewirtschaftung und vermutlich auch bereits der Nutzungsverzicht in der ursprünglichen Zone seit Gründung des Waldreservates im Jahr 1985. Die Zusammensetzung der Baumarten entspricht weitgehend dem Artenspektrum wie sie für die Waldgesellschaft an diesem Standort als typisch postuliert wurde (Ellenberg und Klötzli 1972). Es ist jedoch anzunehmen, dass im letzten und vorletzten Jahrhundert lokal Fichten gepflanzt wurden und diese bei der Bewirtschaftung auch sonst begünstigt wurden. In Bezug auf die Waldstruktur hebt sich das Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt vor allem bei der Basalfläche, der Stammzahl und beim Totholz deutlich vom bewirtschafteten Wald ab. Um die Ergebnisse mit denen des Schweizerischen Landesforstinventars zu vergleichen, müssen Bäume mit einem BHD zwischen 7 und 11.9 cm ausgeschlossen werden. Mit 34.6 m^2 pro ha liegt die Basalfläche im Waldreservat über dem Durchschnitt des Schweizer Waldes im Mittelland (30.8 m^2 pro ha), aber etwa im Bereich der Werte im gesamten Jura (33.4 m^2 pro ha) (Abegg et al. 2020a). Die Stammzahl war mit 484 lebenden Bäumen pro ha deutlich höher als im Durchschnitt im Mittelland (373 Stämme pro ha) und im Jura (410 Stämme pro ha) (Cioldi et al. 2020). Auch die Dichte der Giganten ist mit 1.8 pro ha ± 0.6 im Reservat grösser als der Durchschnitt im Jura (1.0 ± 0.3 pro ha) und im Mittelland (1.7 ± 0.4 pro ha) (Abegg et al. 2020b). Allerdings liegen sowohl die Dichte der Giganten als auch der Totholzvorrat noch immer deutlich unter den in Buchenurwäldern der Karpaten gefundenen Werten, wo 2019 rund 8.6 ± 1.9 Giganten pro ha und 26.3 ± 7.1 m^3 stehendes und 154.5 ± 21.1 m^3 liegendes Totholz pro ha gemessen wurden (Stillhard et al. 2022).

In Bezug auf die Luftbelastung liegen die Blattspiegelwerte bei der Buche mit eher erhöhten Stickstoff- und eher zu tiefen Magnesium-Werten in einem Bereich, der als typisches Anzeichen für ein beginnendes Nährstoffungleichgewicht postuliert wird (Aber et al. 1989). Auf den anderen LWF-Flächen wurden diese Anzeichen nicht in dieser Kombination beobachtet (Waldner et al. 2009, Thimonier et al. 2010). Das Fehlen weitergehender Symptome lässt darauf schliessen, dass die negativen Auswirkungen auf die Vitalität der Bäume (noch) gering sind. Da die Belastung nun wieder rückläufig ist und die Stickstoffwerte bei den Buchenblättern bereits darauf reagieren, gehen wir davon aus, dass sich die Lage nicht weiter verschlechtern sollte (Abb. 8).

Bei den Trockenjahren wird hingegen eine Zunahme erwartet (Pluess et al. 2016). Am Bettlachstock waren die Auswirkungen auf der LWF-Fläche bis jetzt nicht sehr ausgeprägt. Dies könnte damit zusammenhängen, dass der Boden zwar steinig, aber doch bis zu einer beachtlichen Tiefe durchwurzelbar ist und damit den Bäumen recht viel Wasser zur Verfügung stellt. An anderen Stellen am Bettlachstock waren nach dem Sommer 2018 mehrere abgestorbene Tannen und auch beeinträchtigte Buchenkronen zu beobachten. Zischg et al. (2021) sagen aufgrund der Klimamodelle eine Verschiebung der Vegetationshöhenstufen nach oben voraus: In den beiden Szenarien «mässig trocken» (+1.8°C) und «trocken» (+4.4°C) käme das Gebiet des Reservats von der ober- und untermontanen in die submontane Höhenstufe. Die Fichte und zum Teil auch die Weisstanne wären dann nicht mehr unter den empfohlenen Baumarten. Bei der Buche und den weiteren vorkommenden Baumarten wird erwartet, dass sie auch für das künftige Klima an diesem Standort angepasst sind (Frehner et al. 2005/2009).

5
Schlussfolgerungen

Das Waldreservat Bettlachstock-Hasenmatt ist schon in einem relativ naturnahen Zustand, was wir hauptsächlich auf eine geringe Intensität der früheren Waldnutzung zurückführen. Der Nutzungsverzicht seit knapp 40 Jahren fördert die Entwicklung zu einem naturnahen Wald weiter, der Wald zeigt jedoch immer noch gewisse Spuren einer früheren Bewirtschaftung. Die grosse Diversität der Gehölzarten widerspiegelt die Standortvielfalt und macht das Waldreservat zusammen mit der hohen Dichte an Habitatstrukturen an lebenden und toten Bäumen zu einem wertvollen Lebensraum (Abb. 10). Während die Luftbelastung heute, nach einer Periode mit erhöhten Werten, tendenziell wieder rückläufig ist, dürften Trockenjahre künftig tendenziell zunehmen. Es ist davon auszugehen, dass bis Ende des 21. Jahrhunderts grosse Teile des Waldreservats von der obermontanen und untermontanen Höhenstufe in die wärmere und trockenere submontane Stufe wechseln (Zischg et al. 2021). Fichten und Weisstannen könnten künftig in trockenen Sommern insbesondere an flachgründigen Standorten vermehrt absterben und durch nachkommende Laubbaumarten ersetzt werden.

Durch den Nutzungsverzicht erwarten wir einen zunächst weiter ansteigenden Holzvorrat, aber später durch Alterung und insbesondere infolge des Klimawandels eine erhöhte Mortalität und eine markante Zunahme des Totholzvorrates. Es wird interessant sein, was künftige Forschungsgenerationen über die Entwicklung der Biodiversität im Reservat berichten werden.

Abbildung 10: Ausblick aus der oberen Baumkrone anlässlich der Beprobung der Nadeln einer Tanne (Nr. 4) bei der LWF-Fläche am Bettlachstock am 18. Oktober 2021. Bild: WSL

6
Dank

Bei den Erhebungen der LWF haben viele Leute mitgewirkt. Besonders verdanken möchten wir den Forstbetrieb Leberberg, besonders M. Leimer und M. Christ für die 2-wöchentlichen Probenahmen, den Kanton Solothurn und die Gemeinde Bettlach für die Bereitschaft, die LWF-Fläche zu Forschungszwecken zur Verfügung zu stellen und für die Mitwirkung beim Projekt. Weiter erwähnen möchten wir, O. Schramm (Installationen), C. Hug und Feldequipen (Inventuren), A. Brechbühl, T. Hirsiger (Streufall), N. Hajjar, A. Zürcher, D. Christen (Labor), D. Pezzotta und sein Team (Zentrallabor), P. Suter und M. Gysin (Blattbeprobung). In der Vorbereitung, dem Aufbau und der Leitung eine tragende Rolle hatten N. Kuhn, J. Innes, N. Kräuchi, M. Dobbertin und A. Gessler. Für die fachliche Betreuung verantwortlich waren unter anderem G. Schneiter, M. Häni (Meteo), L. Walthert (Boden), P. Waldispühl, E. Graf Pannatier, K. Meusburger (Bodenwasser), M. Schmitt, A. Thimonier, P. Waldner (Deposition, Streufall, Blattspiegelwerte), A. Nussbaumer (Streufall, Mast).
Für die Naturwaldreservatsforschung geht unser Dank an das Inventurteam unter der Leitung von G. Keller und R. Iseli von der Hasspacher&Iseli GmbH und an B. Commarmot, J. Wunder und C. Heiri für die Begleitung des Projektes von der WSL. Dem Amt für Wald, Jagd und Fischerei des Kanton Solothurn und dem Bundesamt für Umwelt danken wir für die finanzielle Unterstützung. Dem Landesforstinventar danken wir für Vergleichsdaten. Wir danken den Gutachtenden für den Review dieses Artikels und den wertvollen Input.
Wir gedenken Peter Brang und seinem Beitrag zur Waldreservatsforschung und zum LWF im Allgemeinen wie auch zu diesem Artikel.

7
Literatur

Abegg, M., U.-B. Brändli, F. Cioldi, C. Fischer, A. Herold, R. Meile, E. Rösler, S. Speich und B. Traub. 2020a. Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 822461: Gesamtbasalfläche, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, doi: 10.21258/1389509.

Abegg, M., U.-B. Brändli, F. Cioldi, C. Fischer, A. Herold, R. Meile, E. Rösler, S. Speich und B. Traub. 2020b. Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnistabelle Nr. 837202: Stammzahl, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, doi: 10.21258/1463250.

Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Steudler und J. M. Melillo. 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. BioScience 39, 378–386.

Brang, P. 1998. Sanasilva-Bericht 1997. Zustand und Gefährdung des Schweizer Waldes – eine Zwischenbilanz nach 15 Jahren Waldschadenforschung. Berichte WSL, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Switzerland, 102 p.

Cioldi, F., U.-B. Brändli, M. Didion, C. Fischer, C. Ginzler, A. Herold, M. Huber und E. Thürig. 2020. Waldressourcen. In M. Abegg, U.-B. Brändli und B. Allgaier Leuch, eds. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Eidg. Forschungsanstalt für Land, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 35–119.

Commarmot, B., J. Wunder und C. Heiri. 2017. Auswertung der Stichprobeninventur 2014 im Naturwaldreservat Bettlachstock-Hasenmatt, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Eidg. Technische Hochschule, Professur Waldökologie.

Ellenberg, H. und F. Klötzli. 1972. Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. Mitteilungen der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (EAFV) 48, 587–930.

Frehner, M., B. Wasser und R. Schwitter. 2005/2009. Herleitung von Klima angepassten Baumartenempfehlungen für Schweizer Wälder. Adaptierte Ökogramme. Forschungsprogramm Wald und Klimawandel, 24, doi: 10.3929/ethz-b-000341108.

Göttlein, A., R. Baier und K. H. Mellert. 2011. Neue Ernährungskennwerte für die forstlichen Hauptbaumarten in Mitteleuropa – Eine statistische Herleitung aus VAN DEN BURG's Literaturzusammenstellung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift 182, 173–186.

Haemmerli, F., N. Kräuchi und M. Stark. 1992. The Swiss National Research Program „Forest Damage and Air Pollution“ (NFP 14+). In T. Schneider, ed. Acidification Research. Evaluation and Policy Applications. Elsevier Science Publishers, 449–459.

ICP Forests. 2010. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP Forests). Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP). UN-ECE, Hamburg, 578 p.

Jonard, M., A. Legout, M. Nicolas, E. Dambrine, C. Nys, E. Ulrich, R. van der Perre und Q. Ponette. 2012. Deterioration of Norway spruce vitality despite a sharp decline in acid deposition: a long-term integrated perspective. Global Change Biology 18, 711-725, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02550.x.

Michel, A., T. Kirchner, A.-K. Prescher und K. Schwärzel. 2021. Forest Condition in Europe: The 2021 Assessment. ICP Forests Technical Report under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention), Thünen Institute, Eberswalde, 103 p., doi: 10.3220/ICPTR1624952851000.

Nussbaumer, A., A. Gessler, S. Benham, B. de Cinti, S. Etzold, M. Ingerslev, F. Jacob, F. Lebourgeois, T. Levanič, H. Marjanović, M. Nicolas, M. Z. Ostrogović Sever, T. Priwitzer, P. Rautio, P. Roskams, T. G. M. Sanders, M. Schmitt, V. Šrámek, A. Thimonier, L. Ukonmaanaho, A. Verstraeten, L. Vesterdal, M. Wagner, P. Waldner und A. Rigling. 2021a. Contrasting resource dynamics in mast years for European beech and oak – a continental scale analysis. Frontiers in Forests and Global Change 4, doi: 10.3389/ffgc.2021.689836.

Nussbaumer, A., K. Meusburger, M. Schmitt, P. Waldner, R. Gehrig, M. Haeni, A. Rigling, I. Brunner und A. Thimonier. 2021b. Verfrühter Fruchtabwurf in Schweizer Buchenbeständen im Hitze- und Trockensommer 2018. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 172, 166-175, doi: 10.3188/szf.2021.0166.

Pluess, A., S. Augustin und P. Brang. 2016. Wald im Klimawandel, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 438 p.

SR 0.814.32. 1979. Übereinkommen vom 13. November 1979 über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung. Systematische Rechtssammlung des Bundes, Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 9 p.

Stillhard, J., M. Abegg, P. Brang und M. Hobi. 2022. Entwicklung im Buchenurwald Uholka-Schyrokyi Luh über 9 Jahre. Bündner Wald 75, 18–21.

Thimonier, A., E. Graf Pannatier, M. Schmitt, P. Waldner, L. Walthert, P. Schleppi, M. Dobbertin und N. Kräuchi. 2010. Does exceeding the critical loads for nitrogen alter nitrate leaching, the nutrient status of trees and their crown condition at Swiss Long-term Forest Ecosystem Research (LWF) sites? European Journal of Forest Research 129, 443–461, doi: 10.1007/s10342-009-0328-9.

Thimonier, A., Z. Kosonen, S. Braun, B. Rihm, P. Schleppi, M. Schmitt, E. Seitler, P. Waldner und L. Thöni. 2019. Total deposition of nitrogen in Swiss forests: Comparison of assessment methods and evaluation of changes over two decades. Atmospheric Environment 198, 335–350, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.10.051.

Ulrich, B., R. Mayer und P. K. Khanna. 1979. Ökosystemare Wirkungsketten beim Wald- und Baumsterben. Schriftenreihe Forstliche Fakultät Universität Göttingen, Göttingen, 279 p.

Waldner, P., A. Marchetto, A. Thimonier, M. Schmitt, M. Rogora, O. Granke, V. Mues, K. Hansen, G. Pihl Karlsson, D. Žlindra, N. Clarke, A. Verstraeten, A. Lazdins, C. Schimming, C. Iacoban, A.-J. Lindroos, E. Vanguelova, S. Benham, H. Meesenburg, M. Nicolas, A. Kowalska, V. Apuhtin, U. Napa, Z. Lachmanová, F. Kristoefel, A. Bleeker, M. Ingerslev, L. Vesterdal, J. Molina, U. Fischer, W. Seidling, M. Jonard, P. O'Dea, J. Johnson, R. Fischer und M. Lorenz. 2014. Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. Atmospheric Environment 95, 363-374, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.054.

Waldner, P., M. Schmitt, M. Schaub, E. Graf Pannatier und A. Thimonier. 2009. Stickstoffeintrag und Ozonbelastung im Schweizer Wald aus der Sicht der Langfristigen Waldökosystem-Forschung. Langzeitforschung für eine nachhaltige Waldnutzung. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf, 113–124.

Waldner, P., A. Thimonier, E. Graf Pannatier, S. Etzold, M. Schmitt, A. Marchetto, P. Rautio, K. Derome, T. M. Nieminen, S. Nevalainen, A. J. Lindroos, P. Merilä, G. Kindermann, M. Neumann, N. Cools, B. de Vos, P. Roskams, A. Verstraeten, K. Hansen, G. Pihl Karlsson, H.-P. Dietrich, S. Raspe, R. Fischer, M. Lorenz, S. Iost, O. Granke, T. G. M. Sanders, A. Michel, H. D. Nagel, T. Scheuschner, P. Simoncic, K. von Wilpert, H. Meesenburg, S. Fleck, S. Benham, E. Vanguelova, N. Clarke, M. Ingerslev, L. Vesterdal, P. Gundersen, I. Stupak, M. Jonard, N. Potočić und M. Minaya. 2015. Exceedance of critical loads and of critical limits impacts tree nutrition across Europe. Annals of Forest Science 72, 929–939, doi: 10.1007/s13595-015-0489-2.

Walthert, L., P. Blaser, P. Lüscher, J. Luster und S. Zimmermann. 2003. Langfristige Waldökosystem-Forschung LWF in der Schweiz. Kernprojekt Bodenmatrix. Ergebnisse der ersten Erhebung 1994–1999. E-Collection, http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=276, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 340 p.

Zischg, A. P., M. Frehner, P. Gubelmann, S. Augustin, P. Brang und B. Huber. 2021. Participatory modelling of upward shifts of altitudinal vegetation belts for assessing site type transformation in Swiss forests due to climate change. Applied Vegetation Science 24, 1–18.