

Waldleistungen und Störungsanfälligkeit: eine modellbasierte Multikriterienanalyse

Christian Temperli^{1,*}, Clemens Blattert^{1,2}

¹ Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

² Universität Jyväskylä (FI)

Abstract

Der Schweizer Wald erbringt verschiedene Leistungen: Insbesondere dient er der Holzproduktion und dem Schutz gegen Naturgefahren, speichert Kohlenstoff und beherbergt eine vielfältige Tier- und Pflanzenwelt. Die gleichzeitige Erbringung dieser Waldleistungen kann jedoch zu Zielkonflikten führen. Zusätzlich beeinflussen Störungsereignisse wie Windwurf und Borkenkäferbefall die nachhaltige und langfristige Bereitstellung der Waldleistungen. Hier stellen wir eine Arbeit vor, die mithilfe von Simulationen des Modells MASSIMO Waldleistungen und Störungsanfälligkeit anhand von Indikatoren in die Zukunft projiziert und potenzielle Zielkonflikte und Synergien mittels einer Multikriterienanalyse bewertet. Dazu wurde die Waldentwicklung ausgehend von Daten des Landesforstinventars (LFI) unter vier Bewirtschaftungsszenarien für die Jahre 2016 bis 2106 unter konstantem Klima simuliert. Über alle Waldleistungen und die ganze Schweiz gesehen schnitt das Business-as-usual-Szenario am besten ab. Jedoch wurden dabei die möglichen Holznutzungspotenziale nicht ausgeschöpft, und es bestanden Zielkonflikte zwischen Biodiversitätsförderung und Kohlenstoffspeicherung. Am meisten Kohlenstoff konnte mit einem Szenario gespeichert werden, unter dem Nadelbäume gefördert und viel Holz geerntet wurde. Dies, weil so viel Kohlenstoff in Holzprodukten gebunden und erdölbasierte Materialien ersetzt werden konnten. Allerdings führte der höhere Nadelholzanteil (vor allem Fichten) zu einer höheren Störungsanfälligkeit gegenüber dem Borkenkäfer. Generell sank die Anfälligkeit gegenüber Sturm und Borkenkäfer bei Szenarien mit verstärkter Holznutzung. Dies führte jedoch aufgrund von weniger Tot- und Altholz zu einem Zielkonflikt mit der Biodiversitätsförderung. Die Störungsanfälligkeit war in LFI-Probeflächen mit hoher Schutzwirkung gegenüber Lawinen und Steinschlag leicht erhöht. Der gewählte Ansatz brachte neue Erkenntnisse zu den Wechselwirkungen zwischen Waldleistungen und Störungsanfälligkeit und bietet Grundlagen für die Entscheidungsunterstützung in der Waldplanung und der Waldpolitik auf regionaler und nationaler Ebene.

Keywords: carbon sequestration, disturbance, ecosystem services, empirical forest development model, forest management scenario

doi: 10.3188/szf.2021.0300

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail christian.temperli@wsl.ch

Die Schweizer Wälder liefern Holz, speichern Kohlenstoff, schützen vor Naturgefahren und spielen eine bedeutende Rolle für die Biodiversität, die Erholung und den Tourismus sowie für die Speicherung und Filterung von Trinkwasser. Zur Erhaltung dieser hier gesamthaft als Waldleistungen bezeichneten Funktionen und Rollen des Waldes ist eine Bewirtschaftung mit gezielten Eingriffen und manchmal auch mit bewussten Verzicht nötig. Durch Pflegeeingriffe kann die Baumartendiversität erhöht (Ninove et al 2015) oder durch das Ausscheiden von Habitatbäumen die Vogel-, Insekten- und Kleinsäugervielfalt gefördert werden (Niedermann-Meier et al 2010). Durch Restriktionen in der Holzernte kann Kohlenstoff im Wald gespeichert werden. Er wird aber auch in langlebi-

gen Holzprodukten gespeichert, die ausserdem CO₂-intensive Materialien wie Beton und Stahl ersetzen. Diese sogenannte Ex-situ-Speicherleistung kann durch eine Verkürzung der Umtriebszeiten und mit produktiveren Baumarten gefördert werden (Naburs et al 2018, Werner et al 2010). Im Schutzwald sind regelmässige Eingriffe nötig, um die Bestandesdichte und die Stabilität auf hohem Niveau zu halten (Brang et al 2006). Bei der Waldplanung und der Waldbewirtschaftung müssen die Waldleistungen daher ausbalanciert werden (Bollmann & Braunisch 2013).

Störungen wie Windwurf und Borkenkäferbefall können die angestrebte Balance zwischen Bewirtschaftungszielen beeinflussen, indem sie ökonomisch wertvolle Holzressourcen oder ökologisch

wertvolle Altholzbestände beschädigen. Gleichzeitig können Störungen die Waldbiodiversität durch die Schaffung von Lebensraumvielfalt (diverse Sukzessionsstadien, Totholz) aber auch fördern (Thom & Seidl 2016). Die Schutzwaldbewirtschaftung wiederum hat zum Ziel, Störungen vorzubeugen, um so eine kontinuierliche Schutzwirkung zu garantieren (Brang et al 2008). Neben potenziellen Zielkonflikten bei der langfristigen Optimierung von Waldleistungen müssen somit auch Konflikte bei der Minimierung von Störungsrisiken einbezogen werden (Albrich et al 2018).

Um die Entscheidungsfindung in Waldpolitik und Waldplanung bestmöglich zu unterstützen, müssen Bewirtschaftungsszenarien, die mögliche zukünftige Herausforderungen der Waldwirtschaft abbilden, diesen Konflikten Rechnung tragen. Auf nationaler Ebene sind besonders Szenario-Simulationen interessant, die auf Daten des Landesforstinventars (LFI) beruhen und die Waldfläche grossräumig repräsentieren (Gutsch et al 2018, Jandl et al 2018). Die bisherigen Simulationsstudien berücksichtigten allerdings weder die Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung noch die Holzerntekosten und -erlöse. Studien, die Störungen berücksichtigten, waren meist auf einzelne Bestände oder kleine Talschaften beschränkt (z.B. Irauschek et al 2017).

In diesem Artikel präsentieren wir zusammenfassend die Resultate eines Projekts des LFI (Laufzeit 2016–2018), das zum Ziel hatte abzuschätzen, wie sich politisch relevante Waldbewirtschaftungsszenarien auf die Entwicklung zentraler Leistungen des Schweizer Waldes und dessen Störungsanfälligkeit für die nächsten Jahrzehnte auswirken. Insbesondere sollte unter Annahme eines konstanten Klimas der Effekt der Szenarien auf die folgenden Punkte ermittelt werden: Holznutzung, Kohlenstoffspeicherung, Schutzwirkung, Biodiversität und Anfälligkeit gegenüber Windwurf und Borkenkäferkalamitäten. Darauf aufbauend sollte aufgezeigt werden, unter welchen Szenarien Konflikte zwischen Waldleistungen entstehen und ob es Zielkonflikte zwischen Waldleistungen und Störungsanfälligkeit gibt. Eine detailliertere Zusammenstellung ist in zwei kürzlich erschienenen Publikationen verfügbar (Blatter et al 2020, Temperli et al 2020).

Methoden

Zusammengefasst verfolgten wir folgenden methodischen Ansatz: Ausgehend von LFI-Daten wurde mit dem Modell MASSIMO (Stadelmann et al 2019) die Waldentwicklung unter verschiedenen Bewirtschaftungsszenarien simuliert. Die Simulationsresultate umfassten Baum- und Bestandesmerkmale auf den LFI-Probeflächen (z.B. Baumart, Brusthöhendurchmesser, Schaftholzvolumen, stehendes

und liegendes Totholz) und wurden gemeinsam mit den Standorteigenschaften (z.B. Topografie, Hangneigung, Bodentiefe, Boden-pH) verwendet, um Indikatoren zu Waldleistungen und Störungsanfälligkeit zu berechnen. Mittels der Indikatoren wurde anschliessend jedes Szenario hinsichtlich seiner Multifunktionalität sowie der Zielkonflikte zwischen den Waldleistungen und der Störungsprädisposition bewertet.

MASSIMO-Szenarien mit LFI-Daten

MASSIMO ist ein empirisches Einzelbaummodell, mit dem das Wachstum, die Mortalität und die Verjüngung von Bäumen auf dem 5-Aren-Kreis der LFI-Probeflächen in 10-Jahres-Schritten simuliert werden kann. Anhand von regionalen Eingriffstärken und Nadelholzanteilen in der Verjüngung können Modellanwendende flexibel Bewirtschaftungsszenarien definieren. Unabhängig von den definierten Szenarien werden im Schutzwald (SilvaProtect-Perimeter mit den Prozessen Sturz und Lawine: 9% von total 5086 LFI-Probeflächen im zugänglichen, produktiven Wald LFI2/LFI3) zur Sicherstellung einer kontinuierlich hohen Schutzleistung keine Schirmschläge simuliert. Hingegen werden in hiebsreifen Probeflächen alle 20 Jahre 40% der zu Verjüngungsbeginn vorhandenen Oberschichtbäume entnommen. In strikten Reservaten wie dem Nationalpark oder den Naturwaldreservaten wird keine Nutzung simuliert.

Für die Studie wurden die Szenarien aus dem Holznutzungspotenzial-Projekt verwendet (Stadelmann et al 2016). Dabei wurden die Szenarien mit einer Version von MASSIMO gerechnet, die noch keine Klimaeinflüsse auf Wachstum, Mortalität und Verjüngung der Bäume berücksichtigte. Klimasensitive Wachstums-, Mortalitäts- und Verjüngungsfunktionen werden zurzeit in MASSIMO implementiert (Rohner et al 2018, Zell et al 2019). Die Ausgangsdaten für die Szenario-Simulationen stammten aus dem dritten LFI (LFI3; Erhebung 2004–2006), da diese zur Zeit des Projekts die aktuellste vollständige Inventur war. Diese Daten wurden anschliessend bis zum eigentlichen Simulationsstart im Jahr 2016 so fortgeschrieben, dass der simulierte Vorrat mit demjenigen aus der ersten Hälfte der Erhebungen des LFI4 (LFI4b: 2009–2013) übereinstimmte. Anschliessend wurde von 2016 bis 2106 die Waldentwicklung gesamthaft unter fünf Bewirtschaftungsszenarien simuliert, wovon wir hier vier vorstellen (siehe Stadelmann et al 2016 für Details):

1. **Konstanter Vorrat:** Mittels verstärkter Nutzung in Bergregionen und geringerer Nutzung im Mittelland wird der Vorrat konstant auf dem Niveau des LFI4b gehalten.
2. **Business-as-usual (BAU):** Die Nutzung wird in allen Regionen auf dem Niveau zwischen LFI3 und LFI4b gehalten, was mit einem Vorratsabbau im

Mittelland und einem Vorratsaufbau in den Bergregionen einhergeht.

3. Nadelholz: Der Vorrat wird bis 2046 auf 250 m³/ha abgesenkt, danach lässt man ihn je nach Region wieder auf 300–330 m³/ha ansteigen. In der Verjüngung wird der Nadelholzanteil gemäss der Wegleitung «Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald» (NaiS; Frehner et al 2005) dem pflanzensoziologisch und waldbaulich «maximal zulässigen» Anteil angepasst.

4. Energieholz: Der Vorrat wird bis 2046 abgesenkt – auf 200 m³/ha im Mittelland, auf 250 m³/ha im Jura, in den Voralpen, im Wallis und auf der Alpensüdseite sowie auf 300 m³/ha in den Alpen ohne Wallis. Danach wird der Vorrat in allen Regionen konstant gehalten. Als Kompensation werden Reserverate ohne Bewirtschaftung geschaffen.

Indikatoren

Die Waldleistungen unter den vier Bewirtschaftungsszenarien wurden mit insgesamt elf Indi-

| Waldleistung | Indikator | Einheit | Gewicht |
|--------------------------------------|---|--------------------------|---------|
| Holzproduktion | Nutzung | m ³ /(ha × J) | 0.30 |
| | Vorrat | m ³ /ha | 0.15 |
| | Zuwachs | m ³ /(ha × J) | 0.15 |
| | Erntekostenfreier Erlös | CHF/(ha × J) | 0.40 |
| Kohlenstoffspeicherung | Kohlenstoffbilanz | tC/(ha × J) | 1.00 |
| Schutz gegen Lawinen und Steinschlag | Lawinenschutzindex (LSI) | % | 0.50 |
| | Steinschlagschutzindex (SSI) | % | 0.50 |
| Biodiversität | Baumartendiversität, Shannon-Index | – | 0.15 |
| | Strukturvielfalt, Shannon-Index (BHD-Klassen) | – | 0.15 |
| | Giganten (Bäume >80 cm BHD) | n/ha | 0.35 |
| | Totholzvolumen | m ³ /ha | 0.35 |

Tab 1 Indikatoren zur Beurteilung der Waldleistungen. BHD: Brusthöhendurchmesser

| Störung | Kategorie | Indikator | Einheit | Gewicht |
|--------------------------|-------------------|---------------------|------------------|---------|
| Windwurf | Bestandesstruktur | Fichtenanteil | – | 0.6 |
| | | Oberhöhe (Hdom) | m | 1 |
| | Topografie | Exponiertheit | – | 1 |
| | | Hangneigung | ° | 0.4 |
| | Boden | Skelettanteil >2 mm | % | 0.4 |
| | | pH | – | 0.4 |
| Borkenkäfer | Bestandesstruktur | Fichtenanteil | – | 1 |
| | | Fichtenoberhöhe | cm | 1 |
| | Prädisposition | Windwurf | – | 0.8 |
| | Topografie | Strahlung | W/m ² | 1 |
| | | Kuppenlage | – | 0.4 |
| | Boden | Skelettanteil | % | 0.2 |
| | | Bodentiefe | cm | 0.2 |
| | Klima | Wasserverfügbarkeit | – | 0.8 |
| Anzahl Käfergenerationen | | – | 1 | |

Tab 2 Indikatoren zur Beurteilung der Störungsanfälligkeit

katoren erfasst (Tab 1), die sich an die Basisindikatoren zur Nachhaltigkeitskontrolle im Wald (Bernasconi et al 2014) anlehnten. Die Holzproduktion wurde mit der jährlich simulierten Nutzung, dem Vorrat, dem Zuwachs und dem erntekostenfreien Erlös gemessen. Letzterer wurde unter Verwendung des Holzernteproduktivitätsmodells HeProMo (Holm et al 2021) berechnet, wobei keine Subventionen berücksichtigt wurden. Die Biodiversität wurde indirekt mit der Baumarten- und der Strukturvielfalt, der Anzahl grosser alter Bäume (Giganten) und dem Totholzvolumen beurteilt. Die Kohlenstoffspeicherung wurde als Veränderung des Kohlenstoffvorrats in lebenden Bäumen, im Totholz sowie in dem zu Holzprodukten verarbeiteten Erntevolumen berücksichtigt. Ausserdem wurde die Substitution von Nichtholzprodukten (z.B. Beton, Stahl) und fossilen Energieträgern bilanziert. Für das Totholz wurden spezifische Konstanten für den exponentiellen Abbau von Reisig (<7 cm) und Derbholz und für Laub- und Nadelholz verwendet (Blattert et al 2020). Für die Lebensdauer von Holzprodukten und für das Energieholz wurden die Konstanten von Würdehoff (2016) übernommen. Der Substitution von Nichtholzprodukten liegt die Annahme zugrunde, dass mit einem zusätzlich geernteten Kubikmeter Holz 0.19 t Kohlenstoff eingespart werden. Für die Substitution von fossilen Energieträgern wurde eine Einsparung von 0.16 t unterstellt (Taverna et al 2007). Die Schutzwirkung des Waldes wurde mit einem Lawinenschutzindex (LSI) und einem Steinschlagschutzindex (SSI) quantifiziert (Cordonnier et al 2014). Der LSI berücksichtigt den mittleren BHD, die Grundfläche, den Nadelholzanteil und die Hangneigung. Der SSI beruht auf dem Modell Rockfor.net (Berger & Dorren 2007) und wird aufgrund von Stammzahl, Grundflächenmittelstamm, Grundfläche, Nadelholzanteil, Hangneigung und Annahmen zu Dichte und Volumen von potenziell vom Wald zurückgehaltenen Gesteinsbrocken berechnet. LSI und SSI wurden nur für LFI-Probeflächen gerechnet, die innerhalb des SilvaProtect-Perimeters für die Prozesse Sturz (z.B. Steinschlag) und Lawinen liegen (Losey & Wehrli 2013).

Mit Ausnahme der auf der Ebene der Produktionsregionen des LFI (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite) ermittelten Baumarten- und der Strukturvielfalt wurden alle Indikatoren für jede Probefläche berechnet. Zur Hochrechnung auf die Produktionsregionen wurden die Indikatorwerte gemittelt. Die Verteilungen des LSI und des SSI waren linksschief. Daher bewerteten wir die Schutzwirkung auf regionaler Ebene als den Anteil Probeflächen mit LSI und SSI >0.95 (hohe Schutzwirkung auf Probeflächenebene).

Die auf die Produktionsregionen hochgerechneten Indikatoren wurden mit den in den Simulationsszenarien realisierten Minimal- und Maximal-

werten je Region zwischen 0 und 1 skaliert und dann mittels eines Gewichtungsfaktors zu einem Teilnutzen kombiniert (Tabelle 1; Manning et al 2018). Der Teilnutzen widerspiegelt die jeweilige Waldleistung, die unter einem Bewirtschaftungsszenario erreicht werden kann. Zur Herleitung der Gewichtungsfaktoren wurden die Indikatoren nach ihrer Wichtigkeit zur Beschreibung der jeweiligen Waldleistung rangiert und die Ränge dann durch die Rangsumme dividiert. Die resultierenden Gewichte und die Indikatorauswahl wurden von einer Begleitgruppe aus Mitarbeitenden vom Bundesamt für Umwelt und von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft begutachtet.

Zur Berechnung der Indikatoren zur Windwurf- und zur Borkenkäferanfälligkeit passten wir das Predisposition Assessment System (PAS) von Netherer & Nopp-Mayr (2005) an die LFI-Daten an. Das in Österreich entwickelte PAS wurde schon in früheren Arbeiten in der Schweiz angewendet (Jakoby et al 2015, Temperli & Bugmann 2020) und berücksichtigt neben Bestandesparametern auch Topografie, Bodeneigenschaften und Klima (Tab 2). Topografische Daten lieferte das digitale Höhenmodell von Swisstopo (dhm25© 2018, 5704 000000). Die Daten zu den Bodeneigenschaften wurden der digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz¹ entnommen. Zur Abschätzung der Wasserverfügbarkeit verwendeten wir einen Trockenheitsindex, der die Wasserbilanz aus Niederschlag und Evapotranspiration abbildet. Die Bestandes- und Umweltparameter wurden zwischen 0 und 1 skaliert und mit expertenbasierten Gewichten (Tab 2) gemittelt, um einen Gesamtwert für die Windwurf- und die Borkenkäferanfälligkeit zu erhalten. Das PAS wurde anhand von Erhebungen der Sturmflächen von Vivian (1990) und Lothar (1999) sowie mit den Beobachtungen zu Insektenschäden aus den Inventaren LFI2, LFI3 und LFI4 validiert (siehe Anhang in Temperli et al 2020).

Datenanalyse

Die Datenanalyse wurde in zwei separaten Teilen durchgeführt. Im ersten Teil wurden die Entwicklung der Waldleistungsindikatoren und die potenziellen Zielkonflikte zwischen Waldleistungen untersucht (Blatter et al 2020). Aus den Teilnutzen der Waldleistungen wurde für jedes Bewirtschaftungsszenario ein Gesamtnutzen berechnet, der als ein Mass für die Multifunktionalität eines Szenarios angesehen werden kann. Dazu wurde für jedes Szenario, jeden Zeitschritt (2016, 2026, ..., 2106) und jede Produktionsregion über die Teilnutzen gemittelt. Dieses Vorgehen unterstellt, dass Holzproduktion, Biodiversität, Kohlenstoffspeicherung und Schutz gegen Lawinen und Steinschlag gleich gewichtet werden. Ein alternatives Gewichtungsszenario beruhend auf den in der LFI-Umfrage genannten Vorrangfunktionen wird in Blatter et al (2020) be-

schrieben. Zielkonflikte zwischen zwei Waldleistungen wurden einerseits grafisch und andererseits rechnerisch mit der sogenannten Root-mean-squared-error-Methode (RMSE) analysiert. Für die grafische Bewertung wurden die über die Zeit gemittelten Teilnutzen eines Waldleistungspaares in einem zweidimensionalen Diagramm gegeneinander aufgetragen. Um für ein Szenario die Zielkonflikte über alle Waldleistungspaare zu erfassen, wurden die Distanzen von der 1:1-Linie mit der RMSE-Methode gemittelt.

Im zweiten Teil fokussierten wir auf Zielkonflikte zwischen Waldleistungen und Störungsanfälligkeit (Temperli et al 2020). Dabei beschränkten wir uns auf die Waldleistungen Holzproduktion, Biodiversität und Schutz gegen Lawinen und Steinschlag. Die Holzproduktion wurde nur mit dem Indikator Holzernte und die Biodiversität nur mit der Strukturvielfalt, den Baumgiganten und dem Totholz gemessen. Zur Darstellung von Zielkonflikten und Synergien zwischen Waldleistungen und Störungsanfälligkeit nutzten wir ebenfalls eine grafische Methode. Dazu zeichneten wir die proportionalen Veränderungen gegenüber dem Jahr 2016 der über den Simulationszeitraum (2026–2106) gemittelten Teilnutzen der Waldleistungen auf der x-Achse und die proportionalen Veränderungen der Störungsanfälligkeiten auf der y-Achse ein. Falls sowohl der Nutzen der Waldleistung als auch die Störungsanfälligkeit ansteigen oder umgekehrt beide sinken, sprechen wir von einem Zielkonflikt. Falls jedoch die Waldleistung ansteigt und die Störungsanfälligkeit sinkt, liegt eine Synergie vor.

Resultate

Entwicklung der Waldleistungen unter den Szenarien

Unter dem BAU-Szenario wurden schweizweit die höchsten Teilnutzen für Holzproduktion, Biodiversität und Schutz und folglich auch der höchste Gesamtnutzen erzielt (Abbildung 1). Dies ergab sich vor allem durch die steigenden Vorräte in den Bergregionen, was die Teilnutzen Biodiversität und Schutz begünstigte. Der Teilnutzen Holzproduktion war unter dem BAU-Szenario trotz vergleichsweise geringer Holzernte am höchsten, weil der Vorrat hoch gewichtet wurde und der erntekostenfreie Erlös im Alpenraum im Vergleich zu den anderen Szenarien weniger negativ war (Blatter et al 2020). Das Nadelholzscenario bewirkte wegen der deutlich höheren Holzernte zumindest bis 2046 einen größeren Teilnutzen für die Holzproduktion als das BAU-Szenario. Dagegen war der Teilnutzen für die Biodi-

¹ <https://data.geo.admin.ch/ch.blw.bodeneignung-kulturtyp/> (15.3.2021)

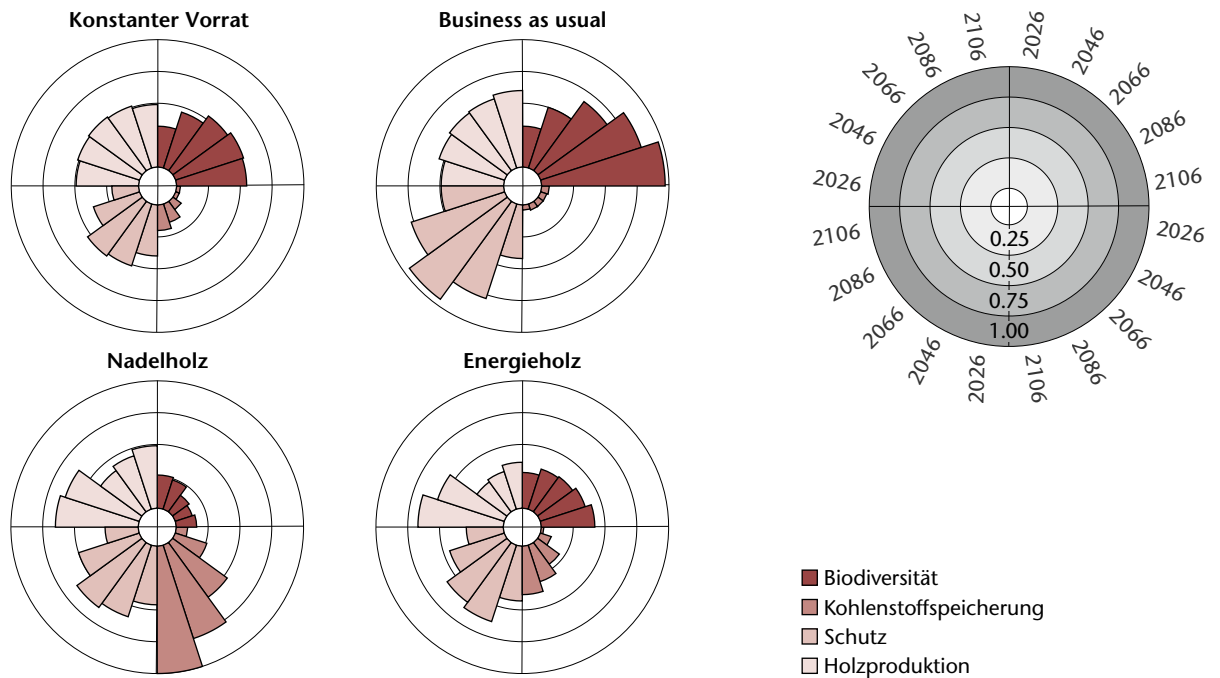


Abb 1 Schweizweite Teilnutzen der Waldleistungen Biodiversität, Kohlenstoffspeicherung, Schutz gegen Steinschlag und Lawinen und Holzproduktion unter den vier Bewirtschaftungsszenarien. Die zeitliche Entwicklung zeigen Segmente für die Jahre 2026, 2046, 2066, 2086 und 2106 (siehe Blattert et al 2020 für regionale Resultate).

versität geringer, weil das Totholzvolumen, die Zahl der Giganten und die Baumartendiversität zurückgingen. Bei den Energieholz- und Nadelholz-szenarien reduzierte die hohe Holzernte den im Wald gespeicherten Kohlenstoff. Gleichzeitig erhöhen sie den in Holzprodukten gespeicherten

Kohlenstoff sowie die Substitution von CO₂-intensiven Produkten und fossilen Energieträgern (Abbildung 2). Gesamthaft führte das zu einer höheren Kohlenstoffspeicherung als unter dem BAU- und dem Konstanter-Vorrat-Szenario.

Die Wirkung der Szenarien im Mittelland unterschied sich von derjenigen in den Bergregionen (Jura, Voralpen, Alpen, Alpensüdseite; Blattert et al 2020). Unter dem BAU-Szenario wurde der im Mittelland in den letzten Jahrzehnten beobachtete Vorratsabbau weitergeführt, was in dieser Region langfristig zu geringeren Teilnutzen für Holzproduktion und Biodiversität führte. Der höchste Gesamtnutzen wird im Mittelland wegen der hohen Holzernte unter dem Nadelholz-szenario erzielt. Unter dem Konstanter-Vorrat-Szenario resultierte ein ähnlich hoher Gesamtnutzen, jedoch aufgrund der relativ hohen Biodiversität.

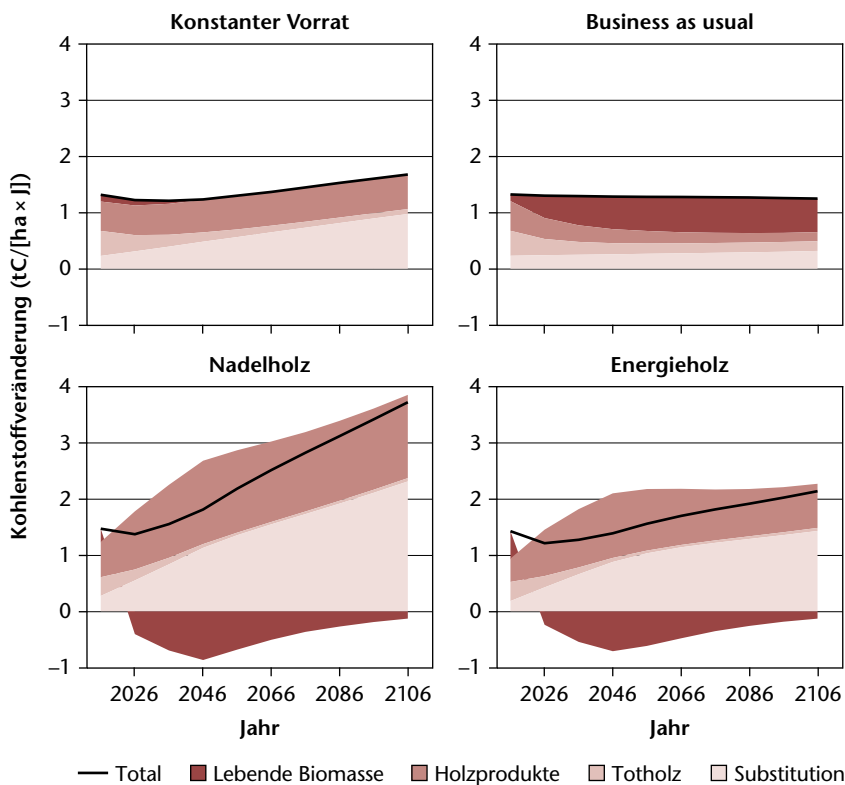


Abb 2 Entwicklung der jährlichen Kohlenstoffbilanz unter den vier Bewirtschaftungsszenarien. Dargestellt sind die Veränderungen im total gespeicherten Kohlenstoff (schwarze Linie) sowie in den Kompartimenten lebende Biomasse, Holzprodukte, Totholz sowie Substitution von CO₂-intensiven Materialien und fossilen Energieträgern.

Zielkonflikte zwischen Waldleistungen

Die kleinsten Zielkonflikte kamen zwischen Holzproduktion und Schutz gegen Lawinen und Steinschlag zustande, was durch die positive Korrelation beider Teilnutzen mit ansteigendem Vorrat erklärt werden kann (Abbildung 3). Unter dem BAU-, dem Energieholz- und dem Konstanter-Vorrat-Szenario konnte die Biodiversität gut mit dem Schutz und der Holzproduktion zusammen erbracht werden, die Zielkonflikte waren klein. Der Miteinbezug der Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung bewirkte, dass insbesondere zwischen der Biodiversität und der Kohlenstoffspeicherung starke Zielkonflikte auftraten. So führte die Erhöhung der Holzernte im Nadelholz-szenario dazu, dass die Kohlenstoffspeiche-

rung in Holzprodukten und die Substitution von CO₂-intensiven Materialien und fossilen Energieträgern stark zunahm, aber gleichzeitig die Baumartendiversität, die Anzahl Giganten und das Totholzvolumen zurückgingen. Im BAU-Szenario profitierten die Biodiversität und «nur» die In-situ-Kohlenstoffspeicherung in der lebenden Biomasse vom Vorratsaufbau in den Bergregionen, nicht aber die Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung. Wenn die Zielkonflikte aufsummiert werden, zeigt sich, dass sie generell mit dem Gesamtnutzen zunehmen (Blattert et al 2020). Je mehr Waldleistungen also bezogen werden, desto eher ist mit Zielkonflikten zu rechnen.

Zielkonflikte zwischen Waldleistungen und Störungsanfälligkeit

Die Sturmanfälligkeit stieg unter dem BAU-Szenario schweizweit leicht (+4%) an (Abbildung 4). Dies ist auf die Vorratszunahme in den Bergregionen und die damit einhergehende Zunahme der Oberhöhe (Hdom) zurückzuführen. Im Energieholz-szenario sank dagegen die Sturmanfälligkeit bis 2066 (-6%) und nahm dann bis gegen Ende des Jahrhunderts wieder zu. Ähnlich verhielt sich das Nadelholz-szenario. Unter Letzterem nahm gleichzeitig die Käferanfälligkeit aufgrund des zunehmenden Fich-

tenanteils schweizweit um 13% zu (Abbildung 4). Im Gegensatz dazu sank die Käferanfälligkeit unter dem Energieholz-szenario um 11%.

Die Szenarien «Konstanter Vorrat», «Nadelholz» und «Energieholz» reduzierten durch die Erhöhung der Holzernte die Oberhöhe, was zu einer Synergie zwischen der Holzproduktion und der Reduktion der Sturmanfälligkeit führte (Abbildung 5). Die erhöhte Holzernte unter dem Nadelholz- und dem Energieholz-szenario bewirkte jedoch einen Zielkonflikt zwischen der Biodiversität und der Reduktion der Sturmanfälligkeit. Ein offensichtlicher Zielkonflikt ergab sich unter dem Nadelholz-szenario, mit dem die Nadelholzernte, aber auch die Käferanfälligkeit anstieg. Die vermehrte Ernte von grossen Fichten unter den Szenarien «Konstanter Vorrat» und «Energieholz» reduzierte die Käferanfälligkeit. Eine weitere Synergie war unter dem BAU-Szenario zu verzeichnen, indem die Verringerung des Nadelholzanteils die Käferanfälligkeit reduzierte und die Biodiversität erhöhte. Demgegenüber ergab sich ein Zielkonflikt im Energieholz-szenario, das sowohl die Käferanfälligkeit als auch die Biodiversität reduzierte. Aufgrund der von den Szenarien unabhängigen Schutzwaldbewirtschaftung hatten die Szenarien einen sehr geringen Einfluss auf die

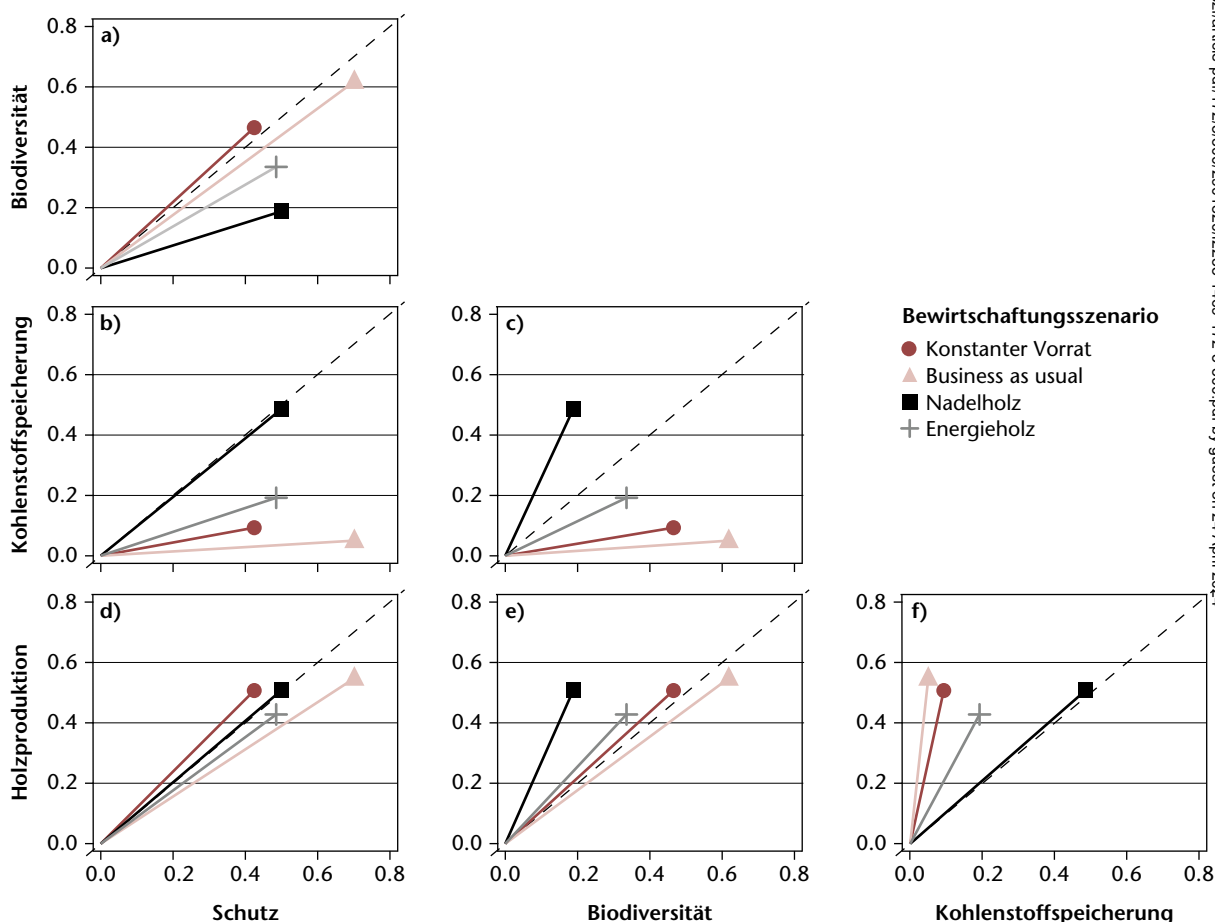


Abb 3 Paarweise Darstellung von Waldleistungen, um Zielkonflikte zu ermitteln. Die Position der Symbole repräsentiert über die Simulationsperiode gemittelte Teilnutzen. Je grösser der Abstand von der 1:1-Linie (gestrichelt) ist, desto grösser ist der Zielkonflikt zwischen den zwei Waldleistungen. Der Abstand vom Ursprung (durchgezogene Linie) steht für den kombinierten Nutzen der beiden Waldleistungen.

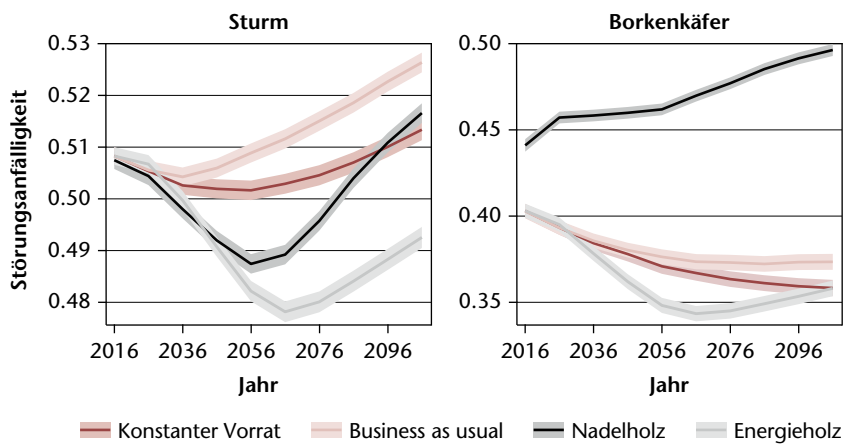


Abb 4 Entwicklung der Störungsanfälligkeit gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall. Die Fehlerbänder stehen für die Standardfehler, die durch die Varianz zwischen den LFI-Probestflächen und den einzelnen Simulationsläufen zustande kommen.

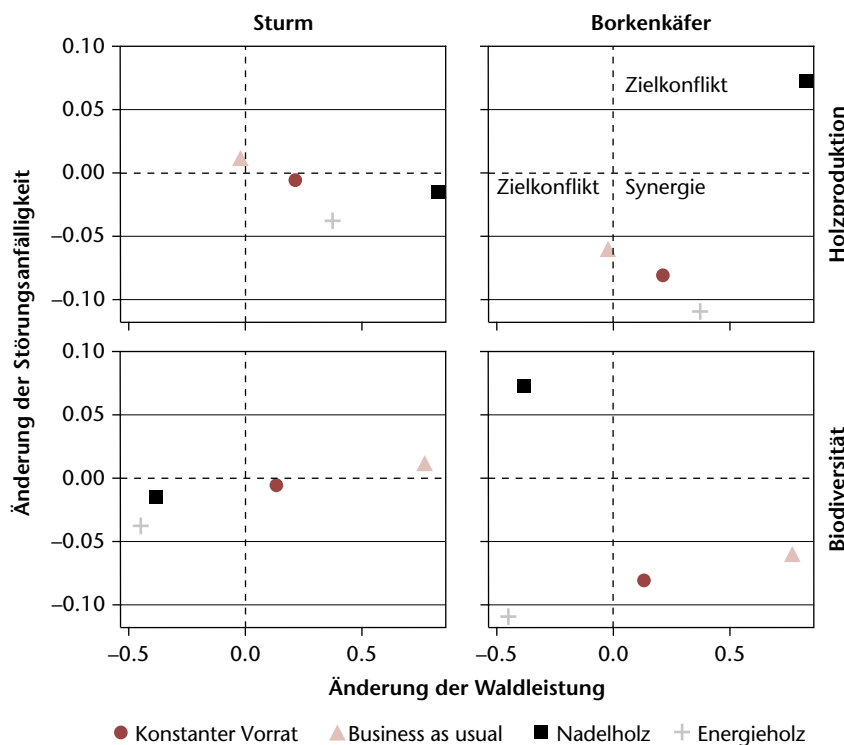


Abb 5 Zielkonflikte und Synergien zwischen Waldleistungen (Holzproduktion, Biodiversität) und Störungsanfälligkeit (Sturm, Borkenkäferbefall). Die Achsenwerte zeigen die proportionalen Veränderungen gegenüber dem Jahr 2016, die über die Jahre 2026–2106 gemittelt wurden.

Schutzwirkung (Stadelmann et al 2016, Temperli et al 2020). In den Wäldern mit hoher Schutzwirkung war allerdings auch die Anfälligkeit gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall hoch, was auf einen Zielkonflikt hinweist (Abbildung 6). Dies kann damit erklärt werden, dass die Grundfläche als Faktor für die Schutzindikatoren LSI und SSI mit der Oberhöhe als Faktor für die Störungsanfälligkeit korreliert.

Diskussion

Die hier vorgestellte Arbeit zeigt einen Ansatz zur möglichst ganzheitlichen Beurteilung von landesweiten Bewirtschaftungsszenarien. Damit kön-

nen Beziehungen zwischen Waldleistungen und Störungsanfälligkeit explizit dargestellt werden. Diese Beurteilung mit Indikatoren und einem multikriteriellen Bewertungssystem bietet eine Ergänzung zu bisherigen Analysen auf nationaler Ebene, zum Beispiel den Holznutzungspotenzialstudien (Hofer et al 2011, Stadelmann et al 2016, Taverna et al 2016).

Gemäss unseren Resultaten schnitt das BAU-Szenario punkto Holzproduktion am besten ab, obwohl unter dem Nadelholzscenario am meisten Holz geerntet wurde (Blatter et al 2020). Das hat zwei Gründe: Erstens wurde neben der Holzernte auch der Vorrat berücksichtigt. Dieser nimmt im BAU-Szenario zu und im Nadelholzscenario langfristig ab. Zweitens wurden im BAU-Szenario durch die geringere Holznutzung teure Erntemassnahmen vermieden. So entwickelte sich der holzerntefreie Erlös vor allem im Alpenraum weniger negativ als unter den anderen Szenarien. Unter dem Nadelholz- und dem Energieholzscenario wurden zudem vor allem in der zweiten Simulationshälfte vermehrt schwächere Sortimente geerntet, die auf dem Holzmarkt einen geringen Erlös erzielen. Die Berücksichtigung der erntekostenfreien Erlöse stellt eine wesentliche Neuerung gegenüber ähnlichen Studien in Mitteleuropa dar (Fürstenau et al 2006, Seidl et al 2007).

Als weitere Neuerung wurden hier auch die Effekte von Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten und von Substitution miteinbezogen. Dies hatte zur Folge, dass mit der Erhöhung der Holzernte wie unter dem Nadelholzscenario mehr Kohlenstoff in langfristigen Holzprodukten gespeichert und mehr CO₂-intensive Materialien und fossile Energieträger substituiert wurden als mit dem BAU-Szenario. In ähnlichen Studien, die nur den Kohlenstoffvorrat im Bestand bilanzierten (Mina et al 2017, Thürig & Kaufmann 2010), führte die Reduktion der Holzernte zu einer höheren Kohlenstoffspeicherung. Die Abschätzung der Kohlenstoffbilanz basiert jedoch auf einigen Annahmen, weshalb die Resultate nicht als absolute Werte interpretiert werden sollten. Wichtig ist jedoch die Erkenntnis, dass die Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung berücksichtigt werden muss, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung der Szenarien hat.

Der Einfluss der Indikatoren Strukturvielfalt, Totholz und Anzahl Giganten führte zu einem zunehmenden Teilnutzen der Biodiversität, wenn die Holzernte reduziert wurde (BAU-Szenario im Berggebiet). Dies, weil die gewählten Biodiversitätsindikatoren die Diversität an Pflanzen- und Tierarten abbilden, die mit späten Bestandesentwicklungsphasen assoziiert sind (Müller et al 2012). Mit den stichprobenbasierten LFI-Daten sind weitere wichtige Aspekte wie lichte Wälder, Landschaftsheterogenität (z.B. durch Störungen) und Lebensraumvernetzung leider nur schwierig zu erfassen (Thom & Seidl 2016).

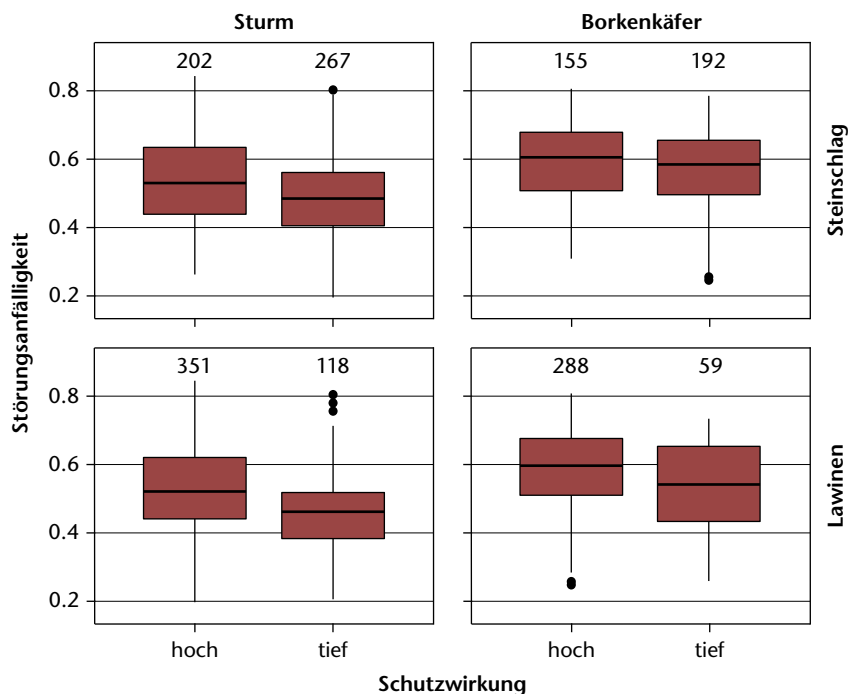


Abb 6 Störungsanfälligkeit der Waldleistung Schutz (Steinschlag, Lawinen) gegenüber Sturm und Borkenkäferbefall auf den Probeflächen des LF3 im Schutzwaldperimeter mit hoher (>0.95) und tiefer Schutzwirkung. Für die Berechnung der Käferanfälligkeit wurden nur diejenigen 347 von 469 Probeflächen berücksichtigt, auf denen Fichten vorhanden waren.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden MAS-SIMO-Simulationen gehen von einem konstanten Klima aus. Mit dem Klimawandel werden sich jedoch die Wuchsbedingungen für viele Baumarten grundlegend ändern (Zimmermann et al 2016). Diese Veränderungen machen ein Nadelholzscenario mit Fichtenförderung in tiefen Lagen, wie wir es simuliert haben, höchst unwahrscheinlich. Wir müssen davon ausgehen, dass mit dem Klimawandel der Borkenkäferbefall deutlich zunehmen wird, weil sich der Trockenstress für die Fichten erhöht und die steigenden Temperaturen die Vermehrung der Borkenkäfer begünstigen (Jakoby et al 2015, Temperli & Bugmann 2020). Allerdings verdeutlichte dieses unrealistische Szenario, wie mit einer (extremen) Steigerung der Nadelholzproduktion die Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung gefördert werden kann, aber gleichzeitig auch das Borkenkäferisiko steigt. An gewissen Standorten haben Gastbaumarten wie die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) oder die Grosse Küstentanne (*Abies grandis*) das Potenzial, auch unter dem zukünftigen Klima wertvolles Nadelholz zu liefern und zur Kohlenstoffspeicherung beizutragen (Brang et al 2016a).

Schlussfolgerungen

Im Hinblick auf die hier betrachteten Waldleistungen (Holzproduktion, Schutz gegen Steinschlag und Lawinen, Biodiversität und Kohlenstoffspeicherung) hat das BAU-Szenario gesamtschweizerisch am besten abgeschnitten, jedoch mit regionalen Unterschieden. Dies kam mehrheitlich durch die hohen

Werte für die Biodiversität und die Schutzleistung unter diesem Szenario zustande. Jedoch wurde beim BAU-Szenario das Holzerntepotenzial nicht mobilisiert, was nicht den Zielen der Waldpolitik 2020 (BAFU 2013) entspricht, die Schweizer Holzindustrie und die Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung durch eine nachhaltige Holzernte zu fördern. Um dies zu erreichen, stellt das Szenario «Konstanter Vorrat» einen möglichen Weg dar, da es eine relativ hohe Holzernte mit anderen Waldleistungen kombiniert. Aus diesen Resultaten schliessen wir, dass keine einzelne Strategie allein alle Waldleistungen gleichzeitig auf regionaler oder gar nationaler Ebene optimieren kann. Um eine möglichst hohe Multifunktionalität des Waldes auf regionaler Ebene zu erreichen, könnte eine Segregationsstrategie zielführend sein, die Biodiversitätsförderung und Holzproduktion (und Ex-situ-Kohlenstoffspeicherung) auf möglichst geeignete Standorte konzentriert (Blatter et al 2018). Dies könnte aber zu vermehrten Konflikten zwischen den öffentlichen Interessen und den Interessen der Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer auf Bestandes- und Betriebsebene führen.

Eine weitere Herausforderung besteht in der Minimierung der Störungsanfälligkeit und der Anpassung an den Klimawandel. Eine verstärkte Holznutzung wie in unserem Energieholzscenario hat in störungsgefährdeten Gebieten den Vorteil, dass allfällige Schäden vermieden werden und die Verjüngung mit besser an den Klimawandel angepassten Baumarten unterstützt wird. Diese setzt jedoch die Verfügbarkeit von Samenbäumen oder Pflanzungen und geeignete Bedingungen für eine rasche Verjüngung von klimaresistenten Baumarten voraus (Brang et al 2016b). Angesichts der Zunahme von Trockenheit und Borkenkäferbefall sollte die Überführung von Fichtenbeständen ausserhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets höchste Priorität haben (Yousefpour & Hanewinkel 2014). Es bleibt eine Herausforderung, an den Klimawandel angepasste Baumartenmischungen zu finden, mit denen effizient Holz produziert und Kohlenstoff gebunden werden kann. Für abgelegene und schlecht erschlossene Wälder ohne Schutzfunktion kann ein bewusster Nutzungsverzicht und ein Akzeptieren von Störungen ein realistisches Szenario sein. In vielen Gebieten in den Alpen und auf der Alpensüdseite wird dies schon so praktiziert (Portier et al 2020).

Mit dem hier vorgestellten Ansatz zur Quantifizierung von Waldleistungen und Störungsanfälligkeit können Bewirtschaftungsziele und Bewirtschaftungsrestriktionen sowie deren Auswirkungen über lange Zeiträume betrachtet werden. Damit können potenzielle Zielkonflikte und prioritäre Gebiete für die Störungsprävention ausfindig gemacht und waldpolitische Entscheidungen auf regionaler bis nationaler Ebene untermauert werden.

Eingereicht: 27. Oktober 2020, akzeptiert (mit Review): 19. April 2021

Literatur

- ALBRICH K, RAMMER W, THOM D, SEIDL R (2018)** Trade-offs between temporal stability and level of forest ecosystem services provisioning under climate change. *Ecol Appl* 28: 1884–1896.
- BAFU, EDITOR (2013)** Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt. 66 p.
- BERGER F, DORREN LKA (2007)** Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. *Schweiz Z Forstwes* 158: 157–165. doi: 10.3188/szf.2007.0157.
- BERNASCONI A, GUBSCH M, HASSPACHER B, ISELI R, STILLHARD J (2014)** Präzisierung Basis-Indikatoren Nachhaltigkeitskontrolle Wald. Bern: Bundesamt Umwelt. 57 p.
- BLATTERT C, LEMM R, THEES O, HANSEN J, LEXER MJ ET AL (2018)** Segregated versus integrated biodiversity conservation: Value-based ecosystem service assessment under varying forest management strategies in a Swiss case study. *Ecol Indic* 95: 751–764.
- BLATTERT C, LEMM R, THÜRIG E, STADELMANN G, BRÄNDLI UB ET AL (2020)** Long-term impacts of increased timber harvests on ecosystem services and biodiversity: A scenario study based on national forest inventory data. *Ecosyst Serv* 45: 101150.
- BOLLMANN K, BRAUNISCH V (2013)** To integrate or to segregate: balancing commodity production and biodiversity conservation in European forests. In: Kraus D, Krumm F, editors. Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity. Joensuu: European Forest Institute. pp. 18–31.
- BRANG P, SCHÖNENBERGER W, FREHNER M, SCHWITTER R, THORMANN JJ ET AL (2006)** Management of protection forests in the European Alps: an overview. *For Snow Landsc Res* 80: 23–44.
- BRANG P, SCHÖNENBERGER W, OTT E, GARDNER B (2008)** Forests as protection from natural hazards. In: Evans J, editor. The forests handbook. Oxford: Blackwell Science Ltd. pp. 53–81.
- BRANG P, PLUESS AR, BÜRGI A, BORN J (2016A)** Potenzial von Gastbaumarten bei der Anpassung an den Klimawandel. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bern: Haupt. pp. 385–405.
- BRANG P, KÜCHLI C, SCHWITTER R, BURMANN H, AMMANN P (2016B)** Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bern: Haupt. pp. 341–367.
- CORDONNIER T, BERGER F, ELKIN CM, LĂMĂS T, MARTINEZ M (2014)** ARANGE Deliverable D2.2: Models and linker functions (indicators) for ecosystem services. www.arange-project.eu/wp-content/uploads/ARANGE-D2.2_Models-and-linker-functions.pdf. 96 p. (zuletzt eingesehen am 12.8.2021)
- FREHNER M, WASSER B, SCHWITTER R (2005)** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, 564 p.
- FÜRSTENAU C, BADECK FW, LASCH P, LEXER MJ, LINDNER M ET AL (2006)** Multiple-use forest management in consideration of climate change and the interests of stakeholder groups. *Eur J Forest Res* 126: 225–239.
- GUTSCH M, LASCH-BORN P, KOLLAS C, SUCKOW F, REYER CPO (2018)** Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change. *Environ Res Lett* 13: 045012.
- HOFER P, ALTWEGG J, HÄSSIG J, RÜEGG R, KAUFMANN E ET AL (2011)** Holznutzungspotentiale im Schweizer Wald. Auswertung der Nutzungsszenarien und Waldwachstumsentwicklung. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen. 80 p.
- HOLM S, FRUTIG F, LEMM R, THEES O, SCHWEIER J (2021)** HeProMo: A decision support tool to estimate wood harvesting productivities. *PLoS One*. 15: e0244289.
- IRAUSCHEK F, RAMMER W, LEXER MJ (2017)** Can current management maintain forest landscape multifunctionality in the Eastern Alps in Austria under climate change? *Reg Environ Change* 17: 33–48.
- JAKOBY O, WERMELINGER B, STADELMANN G, LISCHKE H (2015)** Borkenkäfer im Klimawandel – Modellierung des künftigen Befallsrisikos durch den Buchdrucker (*Ips typographus*). Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 45 p.
- JANDL R, LEDERMANN T, KINDERMANN G, FREUDENSCHUSS A, GSCHWANTNER T ET AL (2018)** Strategies for climate-smart forest management in Austria. *Forests* 9: 592.
- LOSEY S, WEHRLI A (2013)** Schutzwald in der Schweiz: Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bern: Bundesamt Umwelt. 29 p.
- MANNING P, VAN DER PLAS F, SOLIVERES S, ALLAN E, MAESTRE FT ET AL (2018)** Redefining ecosystem multifunctionality. *Nat Ecol Evol* 2: 427–436.
- MINA M, BUGMANN H, CORDONNIER T, IRAUSCHEK F, KLOPCIC M ET AL (2017)** Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. *J Appl Ecol* 54: 389–401.
- MÜLLER M, LACHAT T, BÜTLER R (2012)** Wie gross sollen Altholzinseln sein? *Schweiz Z Forstwes* 163: 49–56. doi: 10.3188/szf.2012.0049.
- NABUURS GJ, VERKERK PJ, SCHELHAAS MJ, GONZÁLEZ-OLABARRIA JR, TRASOBARES A ET AL (2018)** Climate-smart forestry: mitigation impacts in three European regions. Joensuu: European Forest Institute, From Science to Policy 6. 32 p.
- NETHERER S, NOPP-MAYR U (2005)** Predisposition assessment systems (PAS) as supportive tools in forest management. Rating of site and stand-related hazards of bark beetle infestation in the High Tatra Mountains as an example for system application and verification. *For Ecol Manage* 207: 99–107.
- NIEDERMANN-MEIER S, MORDINI M, BÜTLER R, ROTACH P (2010)** Habitatbäume im Wirtschaftswald: ökologisches Potenzial und finanzielle Folgen für den Betrieb. *Schweiz Z Forstwes* 161: 391–400. doi: 10.3188/szf.2010.0391.
- NINOVE C, NIKOLOVA P, BÜRGI A, ZELL J, BRANG P (2015)** Jungwaldpflegeverfahren auf der Lothar-Sturmfläche Diessenhofen TG. Schlussbericht mit den Ergebnissen der bisherigen Inventuren. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. 40 p.
- PORTEIR J, WUNDER J, STADELMANN G, ZELL J, ABEGG M ET AL (2020)** 'Latent reserves': a hidden treasure in National Forest Inventories. *J Ecol* 109: 369–383.
- ROHNER B, WALDNER P, LISCHKE H, FERRETTI M, THÜRIG E (2018)** Predicting individual-tree growth of central European tree species as a function of site, stand, management, nutrient, and climate effects. *Eur J For Res* 137: 29–44.
- SEIDL R, RAMMER W, JÄGER D, CURRIE WS, LEXER MJ (2007)** Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *For Ecol Manage* 248: 64–79.
- STADELMANN G, HEROLD A, DIDION M, VIDONDO B, GOMEZ A ET AL. (2016)** Holzerntepotenzial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien. *Schweiz Z Forstwes* 167: 152–161, <https://doi.org/10.3188/szf.2016.0152>.
- STADELMANN G, TEMPERLI C, ROHNER B, DIDION M, HEROLD A ET AL (2019)** Presenting MASSIMO: A management scenario simulation model to project growth, harvests and carbon dynamics of Swiss forests. *Forests* 10: 94.
- TAVERNA R, HOFER P, WERNER F, KAUFMANN E, THÜRIG E (2007)** CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0739. 104 p.
- TAVERNA R, GAUTSCHI M, HOFER P (2016)** Das nachhaltig verfügbare Holznutzungspotenzial im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 167: 162–171. doi: 10.3188/szf.2016.0162.
- TEMPERLI C, BUGMANN H (2020)** Borkenkäferdynamik im Klimawandel: die Bedeutung der Landschaftsebene. *Schweiz Z Forstwes* 171: 142–150. doi: 10.3188/szf.2020.0142.

- TEMPERLI C, BLATTERT C, STADELMANN G, BRÄNDLI UB, THÜRIG E (2020) Trade-offs between ecosystem service provision and the predisposition to disturbances: a NFI-based scenario analysis. *For Ecosyst* 7: 27.
- THOM D, SEIDL R (2016) Natural disturbance impacts on ecosystem services and biodiversity in temperate and boreal forests. *Biol Rev* 91: 760–781.
- THÜRIG E, KAUFMANN E (2010) Increasing carbon sinks through forest management: a model-based comparison for Switzerland with its Eastern Plateau and Eastern Alps. *Eur J For Res* 129: 563–572.
- WERNER F, TAVERNA R, HOFER P, THÜRIG E, KAUFMANN E (2010) National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environ Sci Policy* 13: 72–85.
- WÖRDEHOFF R (2016) Kohlenstoffspeicherung als Teilziel der strategischen Waldbauplanung. Göttingen: Georg-August-Univ, Dissertation. 208 p.
- YOUSSEFPOUR R, HANEWINKEL M (2014) Balancing decisions for adaptive and multipurpose conversion of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) monocultures in the Black Forest area of Germany. *For Sci* 60: 73–84.
- ZELL J, ROHNER B, THÜRIG E, STADELMANN G (2019) Modeling ingrowth for empirical forest prediction systems. *For Ecol Manage* 433: 771–779.
- ZIMMERMANN NE, SCHMATZ DR, GALLIEN L, KÖRNER C, HUBER B ET AL (2016) Baumartenverbreitung und Standorteignung. In: Pluess AR, Augustin S, Brang P, editors. *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern: Haupt. pp. 199–221.

Une analyse multicritère des données modélisées pour les prestations forestières et la sensibilité aux perturbations

La forêt suisse fournit différentes prestations; elle sert en particulier à la production de bois et à la protection contre les dangers naturels, elle stocke le carbone et héberge une faune et une flore diversifiées. La fourniture simultanée de ces prestations forestières peut entraîner des conflits d'objectifs et des perturbations comme les chablis et les attaques de scolytes qui peuvent influencer la mise à disposition durable et à long terme des prestations forestières. Nous présentons ici une analyse multicritère qui va évaluer, à l'aide de simulations du modèle MASSIMO, une projection future des indicateurs de prestations forestières et de sensibilité aux perturbations ainsi que les conflits et synergies potentielles qui en découlent. Sur la base des données de l'Inventaire forestier national (IFN), nous avons simulé l'évolution de la forêt avec quatre scénarios de gestion pour les années 2016 à 2106, sous un climat constant. Le scénario «business as usual» s'en sort le mieux pour toute la Suisse et toutes les prestations forestières. Cependant, il ne permet pas d'exploiter entièrement le potentiel de bois et des conflits apparaissent entre la promotion de la biodiversité et le stockage du carbone. Le scénario qui maximise le stockage de carbone prévoit de favoriser les résineux et de récolter beaucoup de bois, permettant de lier autant de carbone dans les produits en bois et de remplacer des matériaux issus du pétrole. Cependant la plus forte proportion de résineux (surtout d'épicéas) va entraîner une plus grande sensibilité aux perturbations liées aux attaques de scolytes. En général, la sensibilité à l'égard des ouragans et des attaques de scolytes baisse avec les scénarios qui exploitent plus de bois, ce qui entraîne toutefois un conflit avec la promotion de la biodiversité en raison de la diminution des vieux bois et du bois mort. La sensibilité aux perturbations est légèrement augmentée dans les placettes IFN présentant un effet protecteur élevé contre les avalanches et les chutes de pierres. L'approche choisie a amené de nouveaux enseignements relatifs aux interactions entre les prestations forestières et la sensibilité aux perturbations et fournit des bases pour soutenir les décisions dans la planification et la politique forestière, aux niveaux régional et national.

Forest ecosystem services and disturbance susceptibility: a model-based multi-criteria analysis

Swiss forests provide various ecosystem services, in particular supplying wood, providing protection against natural hazards, acting as a carbon sink and harbouring diverse fauna and flora. Providing all of these services at the same time, however, can lead to trade-offs. Moreover, disturbances such as windthrow and bark beetle infestations affect the sustainable provision of these services in the long term. In this paper, we describe how we used simulations with the MASSIMO model to project forest ecosystem services and forests' susceptibility to disturbance with the help of indicators, and how we evaluated trade-offs and synergies in a multi-criteria analysis. This involved projecting the future development of the forest from 2016 to 2106 using data from the National Forest Inventory (NFI) under four management scenarios assuming a constant climate. For all forest ecosystem services, as well as for Switzerland as a whole, the business-as-usual scenario performed best. However, it does not fully exploit the wood harvesting potential and it also involved trade-offs between biodiversity promotion and carbon storage. The scenario in which the most carbon could be stored involved promoting conifers and harvesting large quantities of wood because it enables large quantities of carbon to be bound in wood products and petroleum-based materials to be replaced. However, having a higher proportion of conifers (especially spruce) would make forests more susceptible to bark beetle disturbance. In general, forests' susceptibility to storms and bark beetles decreased under scenarios with more wood harvesting, but these result in less dead and old wood, and thus in a trade-off with biodiversity promotion. Susceptibility to disturbance was slightly increased on those NFI sample plots that provide considerable protection against avalanches and rockfall. Our approach allowed us to obtain new insights into the interactions between forest ecosystem services and the forests' susceptibility to disturbance, and provides a basis for supporting decision-making in forest planning and forest policy on both the regional and national level.