

Quantifizierung der Waldbiomasse und des Holznutzungspotenzials in der Schweiz

Golo Stadelmann Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)*

Quantifizierung der Waldbiomasse und des Holznutzungspotenzials in der Schweiz

Zahlreiche Länder entwickelten auf Basis der vorhandenen nationalen Waldinventur und deren Netz Modelle, um den Waldzustand in die Zukunft zu projizieren. Mit solchen Modellen können Bewirtschaftungsszenarien simuliert werden, um Holznutzungspotenziale oder Kohlenstoffbilanzen im Wald zu schätzen, die als Entscheidungsgrundlage für die Waldpolitik oder als Basis für den «Forest Reference Level» (FRL) dienen, dessen Bestimmung aufgrund von internationalen Verpflichtungen wie dem Pariser Abkommen erforderlich ist. In diesem Artikel wird der distanzunabhängige Einzelbaumsimulator Massimo vorgestellt, und seine Anwendung wird in einem Szenario mit konstanter Vorratshaltung demonstriert. Massimo basiert auf dem schweizerischen Landesforstinventar (LFI), wobei die demografischen Prozesse (Regeneration, Wachstum, Nutzung und Mortalität) empirisch an dessen Daten angepasst wurden. Durch die Initialisierung und Simulation auf dem Netz des LFI sind die Modellvorhersagen statistisch repräsentativ für die Schweiz, was zuverlässige Schätzungen zur Waldentwicklung auf regionaler (Wirtschaftsregion, Produktionsregion) und nationaler Ebene (Schweiz) ermöglicht. Eine konstante Vorratshaltung in allen Wirtschaftsregionen der Schweiz unter der Annahme des heutigen Klimas würde in den nächsten 50 Jahren dazu führen, dass sich die Nutzung vom gut erschlossenen Mittelland in weniger dicht erschlossene Gebiete des Alpenraumes verlagern müsste. Trotz konstanter Vorratshaltung würde dabei die Biomasse weiter ansteigen, da der Laubholzanteil zunimmt und Laubbäume mehr Astderholz und eine höhere Holzdichte aufweisen. Eine Nutzungsverlagerung in den Alpenraum würde zu höheren Erntekosten führen, die bei den gegenwärtigen Marktpreisen nur mit Subventionen gedeckt werden könnten. Während verschiedene Bewirtschaftungsformen Teil der Szenariodefinition sind, werden in Massimo keine Annahmen über soziale und wirtschaftliche Entwicklungen berücksichtigt. Hingegen werden die Prozesse Wachstum, Mortalität und Regeneration gegenwärtig klimasensitiv implementiert, wodurch das sich verändernde Klima zukünftig berücksichtigt werden kann. Durch die zusätzliche Implementation von Indikatoren zur Wirtschaftlichkeit, zur Schutzwirkung und zur Biodiversität bietet Massimo Potenzial für Anwendungen mit Fokus auf weitere Waldleistungen auch unter dem Aspekt des Klimawandels.

Keywords: forest model, Massimo, National forest inventory (NFI), forest reference level (FRL), forest management, individual tree growth

doi: 10.3188/szf.2020.0124

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail golo.stadelmann@wsl.ch

Der Staat interessiert sich für die nationalen Holznutzungspotenziale, da diese als Entscheidungsgrundlage für die Waldpolitik dienen (siehe BAFU 2013). Zudem erfordern internationale Verpflichtungen wie das Pariser Abkommen (UNFCCC 2015) länderspezifische Schätzungen der aktuellen und zukünftigen Kohlenstoffbilanz der Wald- und Holzwirtschaft. Diese Schätzungen müssen national repräsentativ sein für alle Waldtypen (Forsell et al 2018). Doch wie lassen sich zukünftige

Kohlenstoffbilanzen und Holznutzungspotenziale im Wald schnell und zuverlässig abschätzen? Sofern der Ausgangszustand von reinen, gleichaltrigen Beständen bekannt ist und man ihre heutige und gegebenenfalls auch ihre zukünftige Bonität kennt, reichen Ertragstafeln für eine schnelle Ertragsschätzung. Ertragstafeln basieren auf langfristigen Beobachtungen unter der Annahme, dass sowohl die Bewirtschaftung als auch das Klima konstant bleiben (Pretzsch et al 2008). Obwohl diese Annahmen nicht



Abb 1 Mischbestand in Illnau (ZH). Foto: Barbara Allgaier Leuch

realistisch sind, eignen sich Ertragstabellen und davon abgeleitete einfache Modelle auf Betriebsebene für grobe Abschätzungen weiterhin. Auf nationaler Ebene gibt es jedoch vielfältige Wälder mit unterschiedlichen Baumarten (Mischungen) (Abbildung 1), und es ist unklar, wie vom Bestand zur Region oder zur ganzen Schweiz hochgerechnet werden könnte.

Nationale Waldinventuren erheben systematische Stichproben wiederholt, um den Waldzustand und die Waldentwicklung auf regionaler bis nationaler Ebene zu schätzen. So werden in der Schweiz ungefähr alle zehn Jahre detaillierte Ergebnisse des Landesforstinventars (LFI) publiziert, die jeweils den aktuellen Waldzustand sowie die Änderungen seit der letzten Inventur aufzeigen (Brändli et al 2020, Brändli 2010, Brassel & Brändli 1999). Zahlreiche Länder entwickeln Modelle, die es ermöglichen, gleichsam ihre nationalen Waldinventuren vorher-

zusagen (Barreiro et al 2016). Zu diesem Zweck wurde in der Schweiz das **Managementszenario-Simulationsmodell Massimo** entwickelt (Kaufmann 2001, Stadelmann et al 2019a). Massimo ist ein distanzunabhängiger Einzelbaumsimulator, der demografische Prozesse (Regeneration bzw. Einwuchs, Wachstum bzw. Zuwachs, Nutzung und Mortalität) mit empirischen Modellen darstellt, die mit Daten des LFI angepasst wurden. Massimo enthält stochastische Komponenten in der Simulation von Abgängen (Nutzung und Mortalität), wobei die Entnahmewahrscheinlichkeiten empirisch hergeleitet wurden. Da Veränderungen im Zustand einzelner Bäume und Plots verfolgt werden und diese Veränderungen das Wachstum und die Mortalität beeinflussen, ist Massimo dynamisch, d.h., der aktuelle Zustand des Waldes beeinflusst seine weitere Entwicklung.

Mit einer früheren Version des Modells (siehe Stadelmann et al 2019a) wurden nationale Holznutzungspotenziale (Stadelmann et al 2016) und Optionen für die zukünftige Kohlenstoffbindung der Schweizer Wälder (Thürig & Kaufmann 2008) hergeleitet. Seit 2016 wird Massimo weiterentwickelt, um künftigen Anforderungen (neue Bewirtschaftungsformen, änderndes Klima, ändernde Störungsregime) besser gerecht zu werden. In diesem Artikel sollen der aktuelle Entwicklungsstand des Modells vorgestellt und zukünftige Weiterentwicklungen diskutiert werden. Mit der neuen Verpflichtungsperiode gemäss UNFCCC muss die Schweiz für die Periode 2021–2030 den sogenannten «Forest Reference Level» (FRL), d.h. einen Referenzwert für die jährliche Waldbewirtschaftung (Zuwachs, Nutzung, Mortalität und Abbau von Biomasse) festlegen. Die beobachtete Bewirtschaftung wird mit diesem Referenzwert verglichen. Nur die Differenz zwischen dem Referenzwert und der Waldbilanz gemäss nationalem Reporting wird am Schluss der Verpflichtungsperiode angerechnet. Als Anwendungsbeispiel wird in dieser Studie die zukünftige Kohlenstoffbilanz der Schweizer Wälder bei konstantem Vorrat simuliert. Dies wäre ein mögliches Szenario für Holznutzungspotenziale oder für den FRL der Schweiz. Welches Szenario als Basis für den FRL oder für die Berechnung des Holznutzungspotenzials verwendet wird, wird das Bundesamt für Umwelt voraussichtlich bis im Sommer 2020 entscheiden und dem Sekretariat der UNFCCC mitteilen.

Modellbeschreibung

Massimo wurde ursprünglich entwickelt, um die Waldentwicklung auf den gemeinsamen Probeflächen (Plots) im produktiven Wald (ohne Gebüschwald, Selven, Plantagen) zweier Schweizer LFI zu simulieren. Zur Initialisierung werden derzeit Daten aus dem LFI2 (1993–1995) und dem LFI3 (2004–2006)

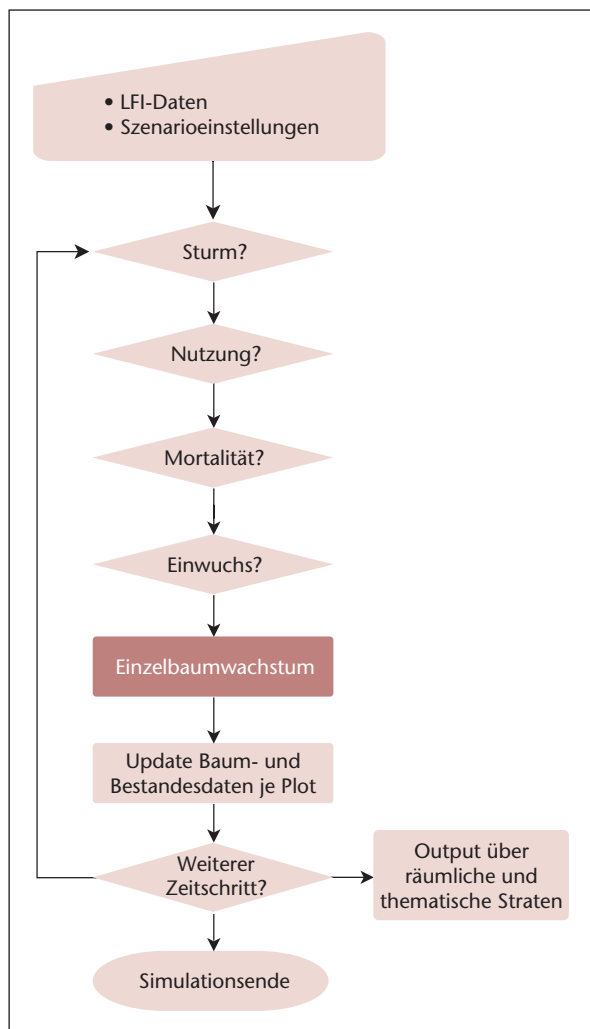


Abb 2 Flussdiagramm des Einzelbaum-simulators Massimo.

verwendet, was zu einem Netz von über 5000 Plots mit ungefähr 60 000 Bäumen über der Kluppschwelle (12 cm Brusthöhendurchmesser, BHD) führt. Die einzelnen Plots sind mit einer Fläche von 500 m² zu klein, um als Bestand interpretiert zu werden, weshalb der Simulator distanzunabhängig entwickelt wurde. Das bedeutet, dass die Konkurrenz zwischen den Bäumen eines Plots nicht räumlich explizit, sondern mit summarischen Statistiken abgebildet wird. Wegen der kleinen Plotflächen eignet sich Massimo im Gegensatz zu SwissStandSim (Zell et al 2020, dieses Heft) nicht, um Aussagen auf Ebene Bestand oder Betrieb zu treffen. Die Plots werden typischerweise zu Straten (also Gruppen von Plots), zum Beispiel den 14 Wirtschaftsregionen zusammengefasst, die sich zu 5 biogeografischen Produktionsregionen gruppieren lassen. Damit eignet sich Massimo für räumlich repräsentative Aussagen auf regionaler (Wirtschafts- oder Produktionsregion) bis nationaler Ebene, um den Holzvorrat, den Kohlenstoffvorrat des Schweizer Waldes sowie die Holznutzungspotenziale zu schätzen.

Simulationen von Massimo bilden gleichsam eine Prognose des LFI für bis zu 10 Zeitschritte à 10 Jahren in die Zukunft. Ausgehend vom LFI3 können also bis ins Jahr 2106 Aussagen getroffen wer-

den. Auf einen längeren Simulationszeitraum wird verzichtet, weil dies aus politischer Sicht, zum Beispiel für die Schätzung von Holznutzungspotenzialen und zukünftigen Kohlenstoffbilanzen, nicht relevant ist. Zudem nehmen die Unsicherheiten eines Modells mit jedem Zeitschritt zu, einerseits weil unser Wissen über die zukünftige Bewirtschaftung viele Annahmen beinhaltet, die wir als Szenario formulieren müssen, und andererseits, weil Massimo stochastische Komponenten in den Modulen Sturm, Nutzung, Mortalität und Einwuchs enthält, die zu einer gewissen Variation führen. Diese Unsicherheiten werden berücksichtigt, indem die statistischen Fehler der einzelnen Prozesse (z.B. Wachstum) in die Simulation integriert werden. Zudem können die Simulationen beliebig oft repliziert (wiederholt) werden, was jeweils zu einer anderen Realisierung des stochastischen Prozesses führt. Basierend auf diesen Replikaten werden zahlreiche Zielgrößen und deren statistische Fehler als Mass für die Variation berechnet. Frühere Simulationen haben gezeigt, dass 20 bis 30 Replikate ausreichen, bis die Zielgrößen auf Ebene Wirtschaftsregion konvergieren.

Das Flussdiagramm von Massimo (Abbildung 2) zeigt, wie eine Simulation abläuft, nachdem das Szenario definiert und der Simulator mit Daten aus dem LFI initialisiert worden ist. Da in Inventuren der genaue Zeitpunkt der Nutzung oder der Mortalität eines Baumes unbekannt ist, wird üblicherweise angenommen, dass die Abgänge uniform über die Zeit verteilt sind. Dies bedeutet, dass in Massimo jeder abgehende Baum noch einen halben Zeitschritt weiterwächst. Deshalb werden in Massimo die Prozesse Sturm, Nutzung und Mortalität simuliert, bevor die Bäume für einen (bzw. einen halben) Zeitschritt wachsen. Im Folgenden werden diese Prozesse in jener Reihenfolge vorgestellt, wie sie im Simulator aufgerufen werden. Anhand der Ergebnisse aus Massimo kann der Kohlenstoffvorrat mit dem Bodenkohlenstoffmodell Yasso abgeleitet werden (siehe Didion & Zell 2019).

Sturmschäden

In der Schweiz wurde die Wiederkehrperiode für schwere Winterstürme mit Windwurf auf 15 Jahre geschätzt (Pfister 1999), wobei der Sturmperimeter im Mittel eine Fläche von ungefähr 20 000 km² umfasst (Thürig et al 2005a). Dem entsprechend ist in Massimo das Standardintervall für schwere Sturmschäden auf 15 Jahre festgelegt. Der Sturmperimeter wird zufällig aus neun möglichen Perimetern gezogen, und das Schadenausmass liegt im Bereich bisheriger Sturmereignisse (für Details siehe Stadelmann et al 2019a). Die Szenarioeinstellungen erlauben es, die Wiederkehrholungsperiode auf 10 Jahre zu verkürzen oder die Simulation von Sturmschäden zu deaktivieren. Für Plots innerhalb

des Sturmperimeters werden die Wahrscheinlichkeiten für Flächen- und Streuschäden basierend auf der Waldstruktur, dem Nadelholzanteil und dem dominanten BHD berechnet. Anschliessend wird mit der Ziehung einer gleichverteilten Zufallszahl geprüft, ob und was für ein Schaden eintritt. In der Szenariodefinition kann eingestellt werden, ob und zu welchem Prozentsatz Sturmschäden geräumt werden. In Naturwaldreservaten werden Sturmschäden nie geräumt.

Nutzung

In Massimo werden die wichtigsten Bewirtschaftungsformen (Naturwaldreservate, Schutzwald, gleichförmiger und ungleichförmiger Hochwald, Niederwald) berücksichtigt. Ausser in Naturwaldreservaten, in denen überhaupt keine Nutzung simuliert wird, werden in allen Wäldern Durchforstungen simuliert. Zur Verjüngung am Ende der Umtriebszeit werden im gleichförmigen Hochwald Schirmhiebe und im Niederwald Kahlhiebe nachgebildet. Im Schutzwald hingegen werden keine Endnutzungen simuliert, weil in Anlehnung an das neue Anforderungsprofil für Steinschlag (Dorren et al 2015) dauerhaft eine minimale Grundfläche von 28 m²/ha aufrechterhalten wird. Dabei wird angenommen, dass die minimale Grundfläche in Lawenschutzwäldern bis 5 m²/ha und jene in Schutzwäldern gegen Erdbeben und Erosion bis 10 m²/ha tiefer liegen darf als in Steinschlagschutzwäldern.

Eine Durchforstung im gleichförmigen Hochwald wird standardmässig durchgeführt, sobald die Grundfläche 110% (Grundflächenbereich für Szenarioanpassungen: 90% bis beliebig) des Wertes unmittelbar vor der letzten Durchforstung erreicht hat, d.h. 10% höher ist. Das Intervall zwischen zwei Durchforstungen hängt folglich direkt vom Zuwachs ab. Für die Initialisierung von Massimo wird der Basiswert der Grundfläche aus dem LFI übernommen, wobei der Zeitpunkt des letzten Eingriffs und die damalige Grundfläche bekannt sind. Im ungleichförmigen Hochwald liegt der diesbezügliche Standard bei 105% der Grundfläche, und der mögliche Bereich für szenariospezifische Anpassungen bewegt sich zwischen 95 und 125%. Der Bereich ist eingeschränkt, damit eine ungleichförmige Struktur aufrechterhalten wird. Typischerweise werden bei einer Durchforstung im gleichförmigen Wald 30%, im ungleichförmigen Wald 25% der Grundfläche geerntet, wobei im Prinzip beliebige Intensitäten vorgegeben werden können. Bei den Schirmhieben zur Verjüngung von gleichförmigem Hochwald werden typischerweise 80% der Bäume gefällt. Die verbleibenden Bäume werden als Überhälter stehen gelassen, bis sie im Durchforstungsmodell genutzt werden. Damit zuerst die ältesten Bestände eines Stratums (Gruppe von Plots aus der gleichen Wirtschaftsregion mit gleicher Umtriebszeit) geerntet

werden, werden diese nach dem Alter geordnet (für Details siehe Stadelmann et al 2019a).

Für die Simulation von Szenarien (z.B. konstanter Holzvorrat in allen Wirtschaftsregionen) kann es nötig sein, dass die Nutzung oder der Vorrat gesteuert wird. Diese Steuerung funktioniert iterativ, indem für jede Wirtschaftsregion und jeden Zeitschritt ein Zielwert vorgegeben wird. Innerhalb der Simulation wird der erreichte Wert mit dem Zielwert verglichen, und danach werden die Durchforstungsintervalle und Umtriebszeiten so angepasst, dass die Differenz zwischen erreichtem Wert und Zielwert kleiner wird (für Details siehe Stadelmann et al 2019a). Bis das System konvergiert, muss diese Annäherung in der Regel fünf- bis zehnmal wiederholt werden. Die angepassten Werte werden für die weiteren Berechnungen verwendet.

Einzelbaummortalität

Zusätzlich zu den Sturmschäden wird in Massimo die Mortalität von einzelnen Bäumen simuliert, die aufgrund von biotischen und abiotischen Störungsereignissen, aber auch wegen Konkurrenz eintreten kann. Das Modell basiert auf den Beobachtungen des LFI und berücksichtigt für diese Modellierung die Produktionsregion, die Grundfläche, die Baumart und den BHD des Baumes. Mit zunehmender Grundfläche eines Plots steigt die Mortalitätswahrscheinlichkeit eines Baumes. Der Einfluss des BHD auf die Mortalität hat eine U-Form, sodass besonders dünne wie auch besonders dicke Bäume eine höhere Mortalität aufweisen als solche mit mittleren Durchmessern.

Einwuchs

Obwohl es im LFI Verjüngungsaufnahmen (d.h. Daten zu den Bäumen mit BHD <12 cm) gibt, fehlen Informationen zum Wachstum dieser kleinen Bäume, da sie nicht nummeriert und somit auch nicht wiederholt gemessen werden. Hingegen ist bekannt, ob und wie viele Bäume je Plot zwischen zwei Zeitschritten über die Kluppschwelle (12 cm) gewachsen sind (Abbildung 3, links). Diese Bäume werden im LFI als Einwuchs bezeichnet. Neben der Anzahl neuer Bäume werden in Massimo auch deren BHD und die (Haupt-)Baumart simuliert, wobei die Modelle auf Beobachtungen des LFI basieren (Abbildung 3, rechts). Beim Einwuchs handelt es sich um Zählraten, die grundsätzlich Poisson-verteilt sind. Da aber häufig kein Einwuchs beobachtet wird, ergeben sich übermässig viele Nullwerte, sodass ein «zero-inflated»-Poisson-Prozess verwendet wird, um den Einwuchs zu simulieren (siehe Zell et al 2019).

Die klimasensitiv simulierte Anzahl Einwüchse sinkt mit zunehmender Entwicklungsstufe eines Bestandes und zunehmender Grundfläche. Im Jungwald und im Stangenholz werden folglich mehr Einwüchse vorhergesagt als im Baumholz. Hingegen

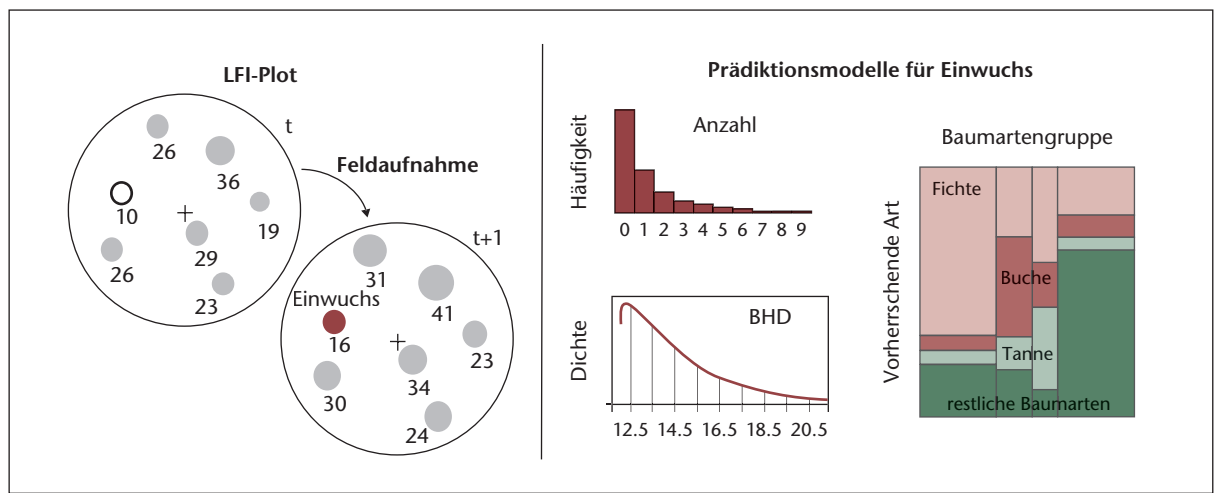


Abb 3 Schema zur Simulation von Einwuchs in Massimo (Abbildung aus Zell et al 2019). Links: schematische Darstellung zweier Erhebungen eines LFI-Plots. Ein Baum unter der Kluppschwelle (schwarzer Kreis) wird erst in der zweiten Inventur gemessen (roter Kreis) und dann als Einwuchs bezeichnet. Rechts: Für jeden LFI-Plot wird die Anzahl der Einwüchse simuliert. Danach werden für die einwachsenden Bäume der Durchmesser und die Hauptbaumart bestimmt.

steigt die Anzahl Einwüchse mit steigender Stickstoffdeposition und Wasserkapazität, was bedeutet, dass an produktiven Standorten mehr Einwuchs erwartet werden darf (Zell et al 2019). Zur Simulation des BHD wird eine zufällig erzeugte Zahl aus einer Weibull-Funktion verwendet, sodass eine erwartungstreue Vorhersage möglich ist. Der BHD der Einwüchse steigt mit der Produktivität des Standorts und sinkt bei zunehmender Bestandesdichte. Die Hauptbaumart wird mit einem multinomialen Regressionsmodell vorhergesagt, das eine deutliche Ab-

hängigkeit vom Klima zeigt: Die Wahrscheinlichkeit des Einwachsens von Fichte und Lärche nimmt mit steigender Temperatur deutlich ab, während alle anderen Baumarten von wärmeren Bedingungen profitieren. Die Wahrscheinlichkeit des Einwachsens von Tanne, Buche und Esche steigt mit zunehmender Grundfläche, was mit der Schattentoleranz erklärt werden kann. Insgesamt ist jedoch die bereits vorherrschende Baumart der wichtigste Prädiktor zur Vorhersage der einwachsenden Baumart auf einem Plot. Dies bedeutet zum Beispiel, dass der einwachsende Baum höchstwahrscheinlich wieder eine Fichte ist, wenn die Fichte bereits die vorherrschende Baumart auf einem Plot ist (Zell et al 2019).

Einstellung	Erlaubte Werte
Dauer eines Zeitschritts	5, 10 Jahre (s: 10 Jahre)
Anzahl Zeitschritte	1–10
Anzahl Replikate	1–1000 (s: 30)
Anzahl Iterationen zur Szenarioeinstellung	1–50 (s: 10)
Waldreservate	keine, bestehende, weitere Definitionen möglich
Schutzwaldbewirtschaftung	an/aus
Durchforstungsintensität im gleichförmigen Hochwald	1–100% der Grundfläche (s: 30)
Durchforstungsintensität im ungleichförmigen Hochwald	1–100% der Grundfläche (s: 25)
Durchforstungsintensität im Niederwald	1–100% der Grundfläche (s: 40)
Nutzungsintensität im Schirmhieb	1–100% der Bäume (s: 80)
Ernte Schaftholz in Rinde	0–100% (s: 100)
Ernte Schaftderbholz	0–100% (s: 100)
Ernte Astderbholz	0–100% (s: 100)
Ernte Reisig	0–100% (s: 0)
Erntekostenberechnung (HeProMo)	an/aus
Klimaszenario	diverse (vgl. www.klimaszenarien.ch)
Simulation von Sturmschäden	aus, 10-, 15-jährlich (s: 15)
Zwangsnutzungsanteil bei Sturmschäden	0–100% (s: 80)

Tab 1 Einstellungen zur Definition eines Szenarios in Massimo; s: Standardwert.

Wachstum

Das Baumwachstum wird mit einem artspezifischen Modell für den Grundflächenzuwachs der einzelnen Bäume über einen Zeitraum von 10 Jahren simuliert. Der BHD zu Beginn des Zeitschritts und der geschätzte Zuwachs werden verwendet, um den BHD zu Beginn des nächsten Zeitschritts abzuleiten. Das nicht lineare Zuwachsmodell orientiert sich an Teck & Hilt (1991). Dabei wird der potenzielle Zuwachs durch folgende Variablen beeinflusst: Grundfläche, Grundfläche aller Bäume mit höherer Grundfläche als der betroffene Baum, Gesamtwachstumleistung (Keller 1978), Höhe über Meer, Bestandesalter in gleichförmigen Beständen bzw. dominanter BHD bei ungleichförmigen Beständen (für Details siehe Stadelmann et al 2019a, Thürig et al 2005b). Basierend auf dem BHD wird das Schaftholzvolumen in Rinde mittels Tariffunktionen hergeleitet (siehe Herold et al 2019, Kaufmann 2000). Aufgrund des BHD und des Schaftholzvolumens in Rinde lassen sich zahlreiche Baum- und Bestandesgrößen berechnen.

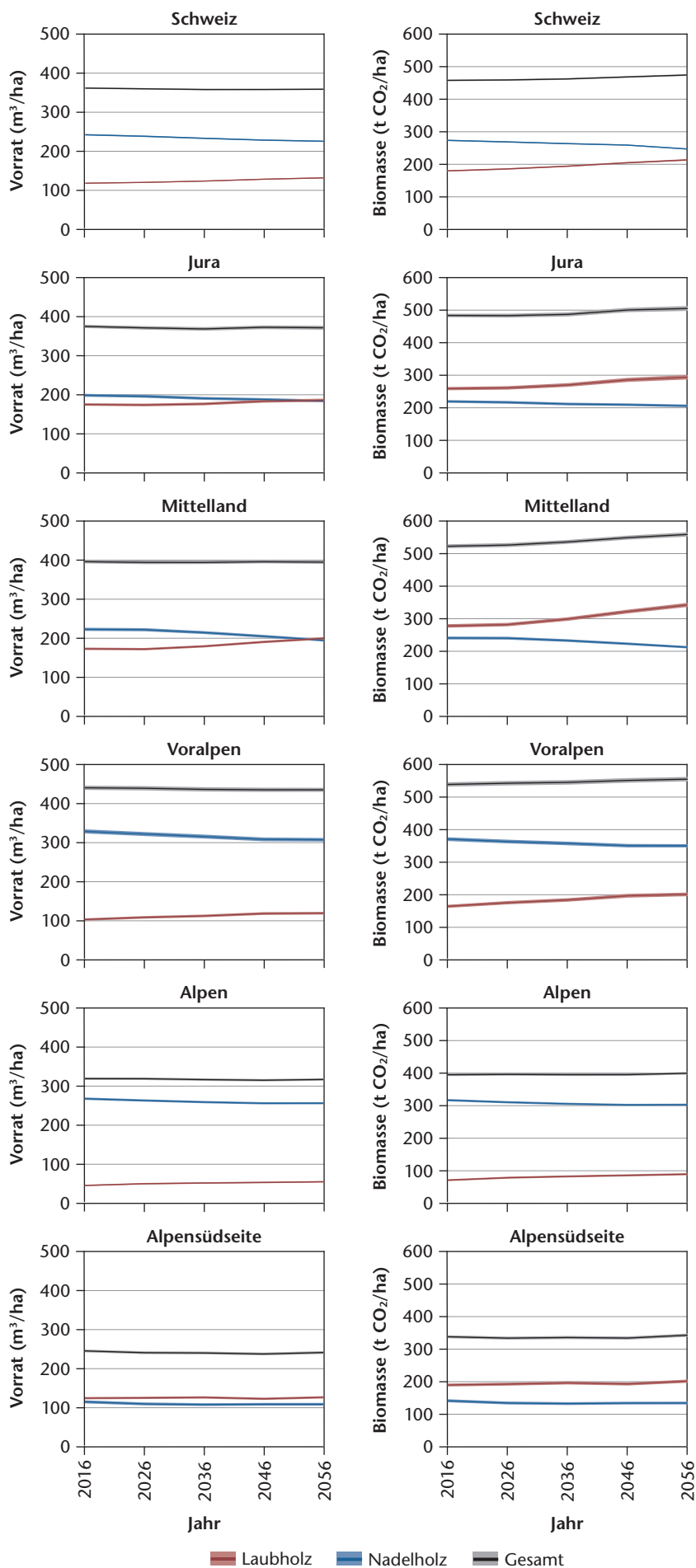


Abb 4 Entwicklung von Vorrat (Schaftholz in Rinde; links) und Biomasse (Schaft, Wurzeln, Äste, Nadeln/Blätter; rechts) der lebenden Bäume für die Schweiz und je Produktionsregion. Dargestellt sind Mittelwert und Fehlerbereich (was die Kurven unscharf erscheinen lässt).

Anwendungsbeispiel

Szenarioeinstellungen

Um mit Massimo mögliche Waldzustände auf regionaler oder nationaler Ebene vorhersagen zu können, werden Szenarien definiert und über den gewünschten Zeitraum (in der Regel 10 bis 100 Jahre) simuliert. Fragestellungen können zum Beispiel sein: Wie lange könnte die Holznutzung im Mittelland auf der aktuellen Höhe gehalten werden, bis der Zuwachs einbricht? Wie stark müsste die Nutzung in den Alpen gesteigert werden, um den Vorrat nicht mehr weiter ansteigen zu lassen? Dank der Integration der Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo (Frutig et al 2009) können dabei auch die potenziellen Kosten der Holznutzung geschätzt werden.

Neben der Vorgabe von Vorrats- oder Nutzungszielen wird ein Szenario über zahlreiche Einstellungen definiert (Tabelle 1). Als Anwendungsbeispiel von Massimo wurde angenommen, dass der Vorrat in allen Wirtschaftsregionen auf dem Level des LFI3 konstant gehalten werden soll, was auch zu einem konstanten Vorrat in den Produktionsregionen führt. Ein solches Szenario könnte als Bewirtschaftungsszenario für die Berechnung des FRL dienen. Die Einstellung der Mortalität in Massimo wurde in Übereinstimmung mit den Anrechnungsmodalitäten im Rahmen des Kyoto-Protokolls und des Pariser Klimaabkommen festgelegt: Aussergewöhnliche natürliche Störungen können aus dem CO₂-Buchhaltung ausgeschlossen werden, wenn diese eine bestimmte «durchschnittliche Mortalität» (sogenannte Hintergrundmortalität) übersteigen (UNFCCC 2015). In einem iterativen Prozess basierend auf den LFI-Daten 1990–2009 wurde diese Hintergrundmortalität auf 16.39% aller Abgänge (Nutzung und Mortalität) geschätzt (FOEN 2016). Das empirische Mortalitätsmodul von Massimo simuliert jedoch etwas nach unten abweichende Mortalitätsraten, da die Mortalität nicht direkt von der Nutzung abhängt. Trotzdem muss im FRL die simulierte Hintergrundmortalität bei 16.39% liegen. Deswegen wurden im Mortalitätsmodul zusätzliche Ernteverluste simuliert. Diese werden in Biomasse umgerechnet und verbleiben als Totholz (bzw. Mortalität) im Wald und fliessen ins Bodenkohlenstoffmodell Yasso ein (Didion et al 2014, Stadelmann et al 2019b). Bis auf die Steuerung der Ernteverluste wurde die Simulation mit den Standardwerten gemäss Tabelle 1 ausgeführt. Entsprechend wurden nur 95% des Schaftholzes in Rinde und 75% des Astderbholzes gerundet, um die Mortalität auf 16.39% ansteigen zu lassen.

Ergebnisse

Um den Vorrat in allen Produktionsregionen der Schweiz konstant zu halten, müsste die Nutzung von Schaftholz in Rinde im Simulationszeitraum (2007–2056) insgesamt um 9% gesteigert werden,

von durchschnittlich 6.5 m³/(ha × Jahr) im LFI3 auf 7.1 m³/(ha × Jahr). Im Mittelland, woher sowohl gemäss LFI3 (Brändli 2010) als auch gemäss LFI4b (Abegg et al 2014) 44% des in der Schweiz geernteten Holzes stammten, müsste die Nutzung von 13.7 m³/(ha × Jahr) im LFI3 auf durchschnittlich 9.95 m³/(ha × Jahr) gesenkt werden. Die Nutzung in dieser Produktionsregion würde so nur noch 29% der gesamten Holznutzung ausmachen. In allen anderen Regionen müsste die Nutzung hingegen gesteigert werden. Aufgrund der angepassten Nutzung könnte der Vorrat in allen Wirtschaftsregionen und damit auch in allen Produktionsregionen konstant gehalten werden, wobei der Laubholzanteil im Vorrat von 33% auf 37%, im Zuwachs von 39% auf 41% und in der Nutzung von 34% auf 39% anstiege. Besonders stark würde der Laubholzanteil in den Produktionsregionen Jura und Mittelland steigen (bis auf 50%; Abbildung 4). Die Biomasse (und damit auch der Kohlenstoffvorrat) der lebenden Bäume, von den Wurzeln bis zu den Nadeln/Blättern, würde in allen Regionen mit steigendem Laubholzanteil weiter zunehmen, besonders ausgeprägt im Jura und im Mittelland, wo Laubholz ungefähr 60% zur Biomasse beitrug. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass Laubbäume im Vergleich zu Nadelbäumen einen grösseren Anteil an Astderholz aufweisen, aber auch an der typischerweise höheren Holzdichte von Laubbäumen.

Diskussion und Ausblick

Aussagekraft der Ergebnisse

Um den Vorrat in der Schweiz konstant zu halten, wären gezielte Massnahmen erforderlich, weil die Nutzung um 9% auf 7.8 Mio. m³ pro Jahr gesteigert werden müsste. Ziel 1 der Waldpolitik 2020 des Bundes (BAFU 2013) strebt sogar eine Nutzungssteigerung um rund 14% auf 8.2 Mio. m³ pro Jahr an. Die Umsetzung des simulierten Szenarios würde langfristig eine hohe Verfügbarkeit von Holz ermöglichen, wobei sowohl die heutigen Bestandesstrukturen als auch die Wald- und Holzindustrie erhalten blieben und andere Waldleistungen wie die Biodiversität, die Schutzfunktion oder die Kohlenstoffspeicherung nicht gefährdet werden. Es wurde jedoch eine Verlagerung der Nutzung aus dem gut erschlossenen Mittelland zu schlechter erschlossenen Regionen mit steilerem Gelände simuliert, was zu steigenden Erntekosten führen würde (Stadelmann et al 2016). Durch strukturelle Anpassungen (z.B. verbesserte Erschliessung), optimierte Ernteverfahren sowie koordinierte Planung und Ausführung könnte ein Teil dieser Mehrkosten eingespart werden (Holm et al 2018, Olschewski et al 2015). Weil jedoch auch die Holzerlöse aufgrund schlechterer Qualitäten und höherer Stärkeklassen tiefer ausfallen dürften, erscheint bei der aktuellen Marktsitua-

tion eine grössere Nutzungsverlagerung aus dem Mittelland in die Voralpen und Alpen ohne staatliche Unterstützung wenig plausibel. Dazu müsste die Nachfrage nach Holz in diversen Stärkeklassen und Qualitäten steigen. Aufgrund der aktuellen Gegebenheiten und ohne zusätzliche staatliche Unterstützung eignet sich das hier untersuchte Szenario eines konstanten Vorrats deshalb eher weniger als Bewirtschaftungsszenario für die Bemessung des FRL unter dem Pariser Klimaabkommen. Das BAFU prüft gegenwärtig geeignetere Szenarien, die sich beispielsweise an den heutigen Bewirtschaftungsgrundsätzen oder der erwarteten Holznachfrage orientieren. Zudem könnten regional differenzierte Zielvorräte definiert werden, die zum Beispiel einen leichten Vorratsanstieg in schlecht erschlossenen Regionen und dafür einen Vorratsabbau in gut erschlossenen Regionen ermöglichen.

Stärken und Schwächen von Massimo

Mit 500 m² sind einzelne Massimo- bzw. LFI-Plots zu klein, um als Bestand betrachtet zu werden, weshalb Zielvorräte nur für Straten definiert werden können. Das Aggregieren der Plots ermöglicht es, die statistische Unsicherheit (Stichprobenfehler) darzustellen. Zusätzlich bildet Massimo die Unsicherheiten der einzelnen demografischen Prozesse (z.B. den Vorhersagefehler der Wachstumsmodelle) und die Varianz zwischen den Replikaten der Simulation ab. Da Massimo die Waldentwicklung auf dem regulären Raster des LFI simuliert, sind die Vorhersagen statistisch repräsentativ und umfassen alle Regionen der Schweiz, mit vielseitigen Baumartenmischungen und variabler Struktur. Somit eignet sich das Modell ausgezeichnet zur Vorhersage der regionalen (Temperli et al 2017) und nationalen (Stadelmann et al 2016) Entwicklung von Waldzuständen und Erntemengen, wobei geerntete Sortimente, Erntekosten (Schnittstelle zu HeProMo, siehe Frutig et al 2009) und der Kohlenstoffvorrat (Schnittstelle zum Bodenkohlenstoffmodell Yasso (Didion & Zell 2019) berechnet werden können. Da Szenarien jeweils auf Annahmen bezüglich Vorrats- oder Nutzungsentwicklung basieren, lohnt es sich trotz Angabe der Unsicherheiten, jeweils mehrere Szenarien zu definieren und miteinander zu vergleichen. Obwohl in Massimo wirtschaftliche und soziale Veränderungen nur indirekt über die Szenarienannahmen abgebildet werden, kann so auf die mögliche zukünftige Waldentwicklung und deren Auswirkungen geschlossen werden.

Geplante Weiterentwicklungen

Die Waldentwicklung wird nicht nur durch die Bewirtschaftung, sondern auch durch das Klima beeinflusst. Daher werden die Prozesse Wachstum (Rohner et al 2018) und Mortalität gegenwärtig klimasensitiv implementiert, für Regeneration ist dies bereits umgesetzt (Zell et al 2019). Aufgrund der em-

pirischen Modellstruktur können diese Prozesse jedoch nur für Baumarten oder Gruppen von Baumarten angepasst werden, die heute im LFI vorkommen. Zurzeit kann Massimo weder Pflanzungen noch das Wachstum fremder Baumarten abbilden. Dennoch führt die klimasensitive Entwicklung von Massimo dazu, dass die Bandbreite der Umweltbedingungen zunimmt, unter denen das Modell angewendet werden kann. Die Implementation verschiedener Indikatoren zur Wirtschaftlichkeit, zur Schutzwirkung und zur Biodiversität (Temperli et al 2020) wird es ermöglichen, Waldleistungen als Teil der Szenarien zu berücksichtigen und die Szenarien hinsichtlich der erbrachten Waldleistungen zu bewerten.

Massimo ist ein leistungsfähiges Instrument für die regionale bis nationale Massstabsebene, mit dem wald- und klimapolitisch relevante Fragestellungen wie die Analyse von Holznutzungspotenzialen oder Kohlenstoffbilanzen beantwortet werden können. Durch die geplanten Weiterentwicklungen bietet das Modell Potenzial für Anwendungen mit Fokus auf weitere Waldleistungen sowie auch unter dem Aspekt des Klimawandels. ■

Eingereicht: 10. Oktober 2020, akzeptiert (mit Review): 23. März 2020

Dank

Ich möchte Edgar Kaufmann danken, der frühere Versionen von Massimo entwickelte. Zahlreiche Mitarbeiter der Gruppe Ressourcenanalyse der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL haben zur Dokumentation früherer Versionen und zur Erarbeitung der aktuellen Modellversion beigetragen.

Literatur

BAFU (2013) Waldpolitik 2020. Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt. 66 p.

BARREIRO S, SCHELHAAS MJ, KÄNDLER G, ANTÓN-FERNÁNDEZ C, COLIN A ET AL (2016) Overview of methods and tools for evaluating future woody biomass availability in European countries. *Ann For Sci* 73: 823–837.

BRÄNDLI UB, EDITOR (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 312 p.

BRÄNDLI UB, ABEGG M, ALLGAIER LEUCH B, EDITORS (2020) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. Im Druck.

BRASSEL P, BRÄNDLI UB, EDITORS (1999) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 442 p.

DIDION M, FREY B, ROGIERS N, THÜRIG E (2014) Validating tree litter decomposition in the Yasso07 carbon model. *Ecol Model* 291: 58–68.

DIDION M, ZELL J (2019) Model of carbon cycling in dead organic matter and soil (Yasso07). In: Fischer C, Traub B, editors. *Swiss National Forest Inventory – methods and models of the fourth assessment*. Cham: Springer. pp. 281–284.

DORREN L, BERGER F, FREHNER M, HUBER M, KÜHNE K ET AL (2015) Das neue NaiS-Anforderungsprofil Steinschlag. *Schweiz Z Forstwes* 166: 16–23. doi:10.3188/szf.2015.0016.

FOEN (2016) Switzerland's second initial report under the Kyoto Protocol. Report to facilitate the calculation of the assigned amount pursuant to Article 3, paragraphs 7bis, 8 and 8bis, of the Kyoto Protocol for the second commitment period 2013–2020. Bern: Federal Office for the Environment. 20 p.

FORSELL N, KOROSUO A, FEDERICI S, GUSTI M, RINCÓN-CRISTÓBAL JJ ET AL (2018) Guidance on developing and reporting Forest Reference Levels in accordance with Regulation (EU) 2018/841. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 120 p.

FRUTIG F, THEES O, LEMM R, KOSTADINOV F (2009) Holzernteproduktivitätsmodelle HeProMo – Konzeption, Realisierung, Nutzung und Weiterentwicklung. In: Thees O, Lemm R, editors. *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente*. Zürich: VDF. pp. 441–466.

HEROLD A, ZELL J, ROHNER B, DIDION M, THÜRIG E ET AL (2019) State and change of forest resources. In: Fischer C, Traub B, editors. *Swiss National Forest Inventory – methods and models of the fourth assessment*. Cham: Springer. pp. 205–230.

HOLM S, THEES O, LEMM R, OLSCHIEWSKI R, HILTY LM (2018) Agent-based model of wood markets: Scenario analysis. *For Pol Econ* 95: 26–36.

KAUFMANN E (2000) Tarife für Schaftholz in Rinde und Rundholz-Sortimente. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 53 p.

KAUFMANN E (2001) Estimation of standing timber, growth and cut. In: Brassel P, Lischke H, editors. *Swiss National forest inventory: methods and models of the second assessment*. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL. pp. 162–196.

KELLER W (1978) Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Mitteilungen 54 (1). 96 p.

OLSCHEWSKI R, SCHALLER M, DITTGEN A, LEMM R, KIMMICH C ET AL (2015) Marktverhalten öffentlicher Forstbetriebe in Graubünden und im Aargau. *Schweiz Z Forstwes*. 166: 282–290. doi: 10.3188/szf.2015.0282

PFISTER C (1999) Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995). Bern: Haupt. 304 p.

PRETZSCH H, GROTE R, REINEKING B, ROTZER T, SEIFERT S (2008) Models for forest ecosystem management: A European perspective. *Ann Bot* 101: 1065–1087.

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.

STADELMANN G, TEMPERLI C, ROHNER B, DIDION M, HEROLD A ET AL (2019A) Presenting MASSIMO: A management scenario simulation model to project growth, harvests and carbon dynamics of Swiss forests. *Forests* 10: 94.

STADELMANN G, DIDION M, THÜRIG E (2019B) Scenario simulations. In: Fischer C, Traub B, editors. *Swiss National Forest Inventory – methods and models of the fourth assessment*. Cham: Springer. pp. 285–296.

STADELMANN G, HEROLD A, DIDION M, VIDONDO B, GÓMEZ A ET AL (2016) Holzerntepotenzial im Schweizer Wald: Simulation von Bewirtschaftungsszenarien. *Schweiz Z Forstwes* 167: 152–161. doi: 10.3188/szf.2016.0152

TECK R, HILT D (1991) Individual-tree diameter growth model for the Northeastern United States. Radnor/PA: US Department Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 11 p.

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*. doi: 10.1186/s40663-020-00236-1

- TEMPERLI C, STADELMANN G, THÜRIG E, BRANG P (2017) Silvicultural strategies for increased timber harvesting in a Central European mountain landscape. *Eur J For Res* 136: 493–509.
- THÜRIG E, KAUFMANN E (2008) Waldbewirtschaftung zur Senkerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. *Schweiz Z Forstwes* 159: 281–287. doi: 10.3188/szf.2008.0281
- THÜRIG E, PALOSUO T, BUCHER J, KAUFMANN E (2005A) The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: a model-based assessment. *For Ecol Manage* 210: 337–350.
- THÜRIG E, KAUFMANN E, FRISULLO R, BUGMANN H (2005B) Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model. *For Ecol Manage* 204: 53–68.
- UNFCCC (2015) Adoption of the Paris Agreement. Paris: United Nations, Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1

- ZELL J, ROHNER B, THÜRIG E, STADELMANN G (2019) Modeling ingrowth for empirical forest prediction systems. *For Ecol Manage* 433: 771–779.
- ZELL J, NITZSCHE J, STADELMANN G, THÜRIG E (2020) Swiss-StandSim: ein klimasensitives, einzelbaumbasiertes Waldwachstumsmodell. *Schweiz Z Forstwes* 171: 116–123. doi: 10.3188/szf.2020.0116

Quellen

- ABEGG M, BRÄNDLI UB, CIOLDI F, FISCHER C, HEROLD-BONARDI A ET AL (2014) Viertes Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009–2013 (LFI4b). doi: 10.21258/1000001

Quantification de la biomasse forestière et du potentiel d'exploitation du bois en Suisse

De nombreux pays ont développé des modèles basés sur l'inventaire forestier national existant et son réseau afin de faire des projections de l'état futur des forêts. Ces modèles peuvent être utilisés pour simuler des scénarios de gestion afin d'estimer les potentiels d'exploitation du bois ou les bilans de carbone en forêt, qui servent de base à la prise de décision en matière de politique forestière ou de base pour le «niveau de référence des forêts» (NRF), dont la détermination est requise par des engagements internationaux tels que la Convention de Paris. Dans cet article, le simulateur d'arbre individuel indépendant de la distance Massimo est présenté et son application est démontrée dans un scénario de volume sur pied constant. Massimo est basé sur l'Inventaire forestier national suisse (IFN), avec des processus démographiques (régénération, croissance, exploitation et mortalité) ajustés empiriquement à ses données. En raison de l'initialisation et de la simulation sur le réseau LFI, les prévisions du modèle sont statistiquement représentatives pour la Suisse, ce qui permet des estimations fiables du développement forestier au niveau régional (région économique, région de production) et national (Suisse). Le maintien d'un volume sur pied constant dans toutes les régions économiques de la Suisse sur la base du climat actuel entraînerait un déplacement de l'exploitation du Plateau suisse bien desservi vers la région alpine moins densément desservie au cours des 50 prochaines années. Malgré un volume sur pied constant, la biomasse continuerait d'augmenter à mesure que la proportion de feuillus augmenterait, car ils ont plus de branches et un bois plus dense. Un déplacement de l'exploitation vers la région alpine entraînerait une augmentation des coûts de récolte, qui, aux prix des bois actuels, ne pourraient être couverts que par des subventions. Bien que différentes formes de gestion fassent partie de la définition du scénario, Massimo ne tient pas compte d'une éventuelle évolution sociale et économique. Par contre, les processus de croissance, de mortalité et de régénération tiennent compte du climat, ce qui permet de prendre en compte le changement climatique à l'avenir. Grâce à la mise en œuvre d'indicateurs complémentaires pour l'efficacité économique, la protection contre des dangers naturels et la biodiversité, Massimo permet des simulations pour d'autres services forestiers, tout en tenant compte de l'aspect du changement climatique.

Quantification of forest biomass and timber harvesting potential in Switzerland

Numerous countries developed models based on their existing national forest inventory and its grid to project the state of the forest into the future. Such models can be used to simulate management scenarios in order to estimate timber harvesting potentials or carbon balances in the forest, which serve as a basis for decision-making in forest policy or as a basis for the «Forest Reference Level» (FRL), the determination of which is required by international commitments such as the Paris Agreement. In this article, the distance-independent single tree simulator Massimo is presented and its application is demonstrated in a scenario with constant growing stock. Massimo is based on the Swiss National Forest Inventory (LFI), with demographic processes (regeneration, growth, harvest and mortality) being empirically fitted to its data. Due to the initialization and simulation on the LFI grid, the model predictions are statistically representative for Switzerland, which allows reliable estimates of forest development at regional (economic region, production region) and national level (Switzerland). Under the assumption of the current climate, a constant growing stock in all economic regions of Switzerland over the next 50 years would lead to a shift in harvest from the well accessible Central Plateau to less accessible areas in the Alpine regions. Despite constant growing stock, the biomass would increase as the proportion of deciduous trees increases as they have a higher amount of coarse branchwood and a higher wood density. A harvesting shift to the Alpine regions would lead to higher harvesting costs, which at current market prices could only be covered by subsidies. While different forms of management are part of the scenario definition, Massimo does not take into account assumptions about social and economic developments. However, the processes of growth, mortality and regeneration are currently implemented in a climate-sensitive manner, which allows to respect climate change in the future. By additionally implementing indicators for economic efficiency, protection and biodiversity, Massimo offers potential for applications with a focus on further forest services also under the aspect of climate change.