

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 171 (2020)

Heft: 3

Artikel: SwissStandSim : ein klimasensitives, einzelbaumbasiertes Waldwachstumsmodell

Autor: Zell, Jürgen / Nitzsche, Jens / Stadelmann, Golo

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097286>

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: 01.05.2026

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

SwissStandSim: ein klimasensitives, einzelbaum-basiertes Waldwachstumsmodell

Jürgen Zell

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

Jens Nitzsche

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

Golo Stadelmann

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

Esther Thürig

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

SwissStandSim: ein klimasensitives, einzelbaum-basiertes Waldwachstumsmodell

Die Entwicklung unserer Waldbestände unter dem Klimawandel und die Beeinflussung der zukünftigen Waldleistungen durch heutiges Handeln sind zu wichtigen waldbaulichen Fragen geworden. Daher braucht es modellgestützte Hilfsmittel für die forstliche Planung und die Optimierung von Behandlungen. In diesem Artikel wird das neue, wissenschaftlich abgestützte Waldwachstumsmodell SwissStandSim vorgestellt, das Teil eines zukünftigen Entscheidungsunterstützungssystems für die schweizerische Forstwirtschaft werden soll. SwissStandSim basiert auf den Daten der langfristigen ertragskundlichen Versuchsflächen der Schweiz. Diese werden verwendet, um ein klimasensitives, einzelbaum-basiertes Waldwachstumsmodell zu erstellen. Die Daten wurden mit möglichst vielen Umweltvariablen kombiniert, um die demografischen Prozesse Bewirtschaftung, Wachstum, Mortalität und Einwuchs zu modellieren. Die Klimavariablen zeigten ökologisch interessante Wechselwirkungen, so besonders zwischen Niederschlag und Temperatur, und zwar für das Wachstum wie auch die Mortalität. Eine weitere Wechselwirkung zeigte sich zwischen der Stärke der Bewirtschaftung und der Mortalität. Je stärker die Bewirtschaftung, desto höher war die Mortalität in den darauffolgenden Jahren. Dies lässt Interpretationen zu bezüglich Vulnerabilität von Beständen nach starken Eingriffen. Beispielhafte Simulationen mit SwissStandSim für drei ertragskundliche Versuchsflächen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Daten und Modell, wobei der Häufigkeit und der Intensität von Störungsereignissen eine Schlüsselrolle zukommt. Die Herleitung von SwissStandSim beruhte auf einem mittleren Störungsregime, was je nach lokaler Situation zu einer Über- oder einer Unterschätzung der Mortalität führen kann. Mit SwissStandSim kann die Bewirtschaftung von Beständen flexibel simuliert werden. Damit ist SwissStandSim dazu prädestiniert, im Rahmen eines an der WSL laufenden Projektes (SessFor, NFP73) Teil eines praxistauglichen Werkzeugs für die Entscheidungsunterstützung für waldbauliche Fragen auf der Bestandesebene zu werden.

Keywords: climate sensitive, single-tree growth model, stand model, Switzerland
doi: 10.3188/szf.2020.0116

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail juergen.zell@wsl.ch

Wie sich die Schweizer Waldbestände unter dem Klimawandel entwickeln und wie eingegriffen werden kann, um die gewünschten Waldleistungen weiterhin zu erbringen, beschäftigt sowohl die Forschung als auch die Praxis. Für die Beantwortung dieser Fragen werden Waldwachstumsmodelle benötigt, die klimasensitiv sind und mit denen verschiedene Bewirtschaftungsformen abgebildet werden können. An der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) wird mit SwissStandSim derzeit ein solches Waldwachstumsmodell erarbeitet. Es beruht wie die Ertragstafeln von Badoux (1983) auf den Daten der ertragskundlichen Versuchsflächen der WSL («Experimental Forest Management Project»,

kurz «EFM-Projekt»; Forrester et al 2019). Die Ertragstafeln können als einfachste Form von Waldwachstumsmodellen betrachtet werden. Sie stellen vom Bestandesalter abhängige Zustände dar und gehen von einer einzigen Bewirtschaftungsform sowie konstanter Bonität (Wuchsleistung) und damit von gleichbleibenden Standortbedingungen aus.

SwissStandSim beruht auf dem Wachstum und der Mortalität der einzelnen Bäume, weshalb es als einzelbaum-basiertes Waldwachstumsmodell bezeichnet wird. Auf diese Weise können Verteilungen von Baumeigenschaften (z.B. Durchmesser) innerhalb eines Bestandes betrachtet werden. Im Gegensatz dazu arbeiten Modelle wie 3-PG (Landsberg & Waring 1997) oder SiWaWa (Rosset et al 2013) auf der Bestan-

desebene, womit sie für mehrschichtige Bestände und Mischbestände aus mehreren Arten nur wenig geeignet sind (vgl. aber die kürzlich erfolgte Weiterentwicklung von 3-PG, Forrester et al 2020, dieses Heft).

Die Auswirkungen von forstlichen Eingriffen (Baumentnahmen) auf die Entwicklung des verbleibenden Bestandes sind eine weitere Eigenschaft, die in empirischen einzelbaumbasierten Waldwachstumsmodellen realitätsnah abgebildet werden kann. Dies ist möglich, weil auf den EFM-Versuchsflächen der Zeitpunkt des Eingriffs und die nachfolgende Wachstumsreaktion für jeden einzelnen Baum erfasst werden. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass mit solchen Modellen die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsformen auf verschiedenste Waldleistungen miteinander verglichen werden können.

In den traditionellen empirischen Waldwachstumsmodellen werden die Auswirkungen des Klimas auf die Walddynamik nicht explizit abgebildet, sondern fliessen über Variablen wie die Meereshöhe, die Bonität oder einen Klimaindex indirekt ein (z.B. BWinPro, Nagel & Schmidt 2006; PrognAus, Ledermann 2006; SiWaWa, Rosset et al 2013). In verschiedenen Modellen wurde versucht, die Bonität anhand von expliziten Standortvariablen wie den Bodeneigenschaften, der Temperatur, der Bodenfeuchte oder der Stickstoffdeposition zu modellieren, womit die Klimasensitivität der Walddynamik viel realistischer wiedergegeben werden kann (z.B. Silva, Pretzsch et al 2002).

Die detaillierteste Wiedergabe von Klimaeinflüssen ist möglich mit ökophysiologischen Modellen (z.B. 3-PG, siehe Forrester et al 2020, dieses Heft). Solche Modelle beruhen auf grundlegenden ökologischen Prozessen wie Fotosynthese, Atmung oder der Effizienz der Strahlungsausnutzung. Sie weisen einen grossen allgemeinen Gültigkeitsbereich auf, dies geschieht jedoch meist auf Kosten der Präzision in der Vorhersage eines konkreten Bestandes.

Bei der Entwicklung von SwissStandSim sind wir einen anderen Weg gegangen: Weil die Modellierung der sich im Lauf der Zeit verändernden Bonität (als Ausdruck von Standort- und Klimateigenschaften) äusserst komplex ist und stark vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen, wurden für SwissStandSim die historischen Daten zu Klima, Stickstoffeinträgen und Standort als unmittelbar erklärende Grössen für den Zuwachs und die Mortalität verwendet.

Im vorliegenden Artikel wird beschrieben, auf welchen Daten und Prozessen SwissStandSim beruht, wie die Prozesse empirisch-statistisch angepasst wurden und wo die Grenzen dieses Waldwachstumsmodells liegen. Zudem wird die laufende Weiterentwicklung von SwissStandSim hin zu einem praxistauglichen Entscheidungsunterstützungsinstrument für Forstbetriebe aufgezeigt und wird dargestellt, wie es für Szenarienanalysen unter verändertem Klima eingesetzt werden könnte. Details zu den (Teil-)Modellen und alle geschätzten Parameter finden sich im technischen Projektbericht in Zell (2018a). Weiterführende Angaben zu den klimasensitiven Wachstumsmodellen sind in Zell (2018b) enthalten.

Material und Methoden

Daten

SwissStandSim ist ein empirisches einzelbaumbasiertes Waldwachstumsmodell, das anhand der EFM-Daten entwickelt wurde. Das EFM-Projekt umfasst derzeit 495 Flächen mit einer Gesamtfläche von 154 ha, bei einer Standardgrösse der Einzelfläche von 2500 m². Für SwissStandSim wurden alle Flächen verwendet, die 1) seit mehr als 15 Jahren beobachtet werden, 2) mit in der Schweiz häufigen Baumarten bestockt sind und 3) gleichförmigen oder ungleich-

Gruppe	Anzahl Beobachtungen	Arten, mit Anteil an den Beobachtungen
Fichte	190 047	100% <i>Picea abies</i>
Tanne	139 977	100% <i>Abies alba</i>
Lärche	24 807	100% <i>Larix decidua</i>
Föhre	13 452	100% <i>Pinus sylvestris</i>
Douglasie	9 759	100% <i>Pseudotsuga menziesii</i>
Anderer Nadelbäume	33 505	50% <i>Pinus strobus</i> , 28% <i>Pinus mugo</i> , 20% <i>Pinus cembra</i> , 1% <i>Picea sitchensis</i>
Buche	149 009	100% <i>Fagus sylvatica</i>
Eiche	44 799	100% <i>Quercus</i> sp.
Ahorn	2 450	100% <i>Acer</i> sp.
Anderer Laubbäume – mit hoher Lebenserwartung	5 706	51% <i>Fraxinus</i> sp., 41% <i>Carpinus betulus</i> , 5% <i>Ulmus</i> sp., 2% <i>Tilia</i> sp., 1% <i>Juglans regia</i>
Anderer Laubbäume – mit tiefer Lebenserwartung	1 415	40% <i>Sorbus</i> sp., 21% <i>Prunus avium</i> , 18% <i>Betulus</i> sp., 13% <i>Alnus</i> sp., 7% <i>Salix</i> sp., 2% <i>Populus tremula</i>

Tab 1 Definition der verwendeten Baumartengruppen und Anzahl Beobachtungen pro Gruppe.

förmigen Hochwald, nicht aber plenterartigen Hochwald aufweisen. So standen für die Erstellung des Waldwachstumsmodells 574 000 Einzelbaumbeobachtungen auf 374 Flächen und Zeitreihen von 15 bis zu 112 Jahren zur Verfügung.

Bis in die 1970er-Jahre wurden im EFM-Projekt die Baumkoordinaten nicht aufgenommen, was es unmöglich macht, für die älteren Daten Nachbarschaftsbeziehungen zu analysieren. Um SwissStandSim mit einem möglichst grossen Datensatz entwickeln zu können, wurde auf die Abbildung von Nachbarschaftsbeziehungen verzichtet.

Die Daten wurden nach Baumarten getrennt. Für acht Arten lagen genügend Beobachtungen vor, um sie einzeln führen zu können. Die anderen Baumarten wurden einer der drei folgenden Gruppen zugewiesen: 1) «andere Nadelbäume», 2) «andere Laubbäume – mit hoher Lebenserwartung» und 3) «andere Laubbäume – mit niedriger Lebenserwartung» (Tabelle 1).

Um die am Standort herrschenden Umweltbedingungen abzubilden, wurden Daten zum Klima (Temperatur, Niederschlag; Remund et al 2014), zu den Stickstoffeinträgen (Rihm 1996) und Informationen aus der Bodeneignungskarte der Schweiz aus dem Jahr 2000¹ verwendet.

Modellierung

Für SwissStandSim wurden die Prozesse Bewirtschaftung, Wachstum, Mortalität und Einwuchs modelliert. Dabei erfolgte die Modellierung der drei letztgenannten Prozesse spezifisch für die Baumartengruppen (Tabelle 1). Je mehr Einzelbaumbeobachtungen für eine Baumart zur Verfügung standen, desto komplexer konnte das Modell werden. Da es unmöglich ist, alle Modellkombinationen durchzurechnen, wurden die erklärenden Variablen nach Ähnlichkeiten gruppiert (z.B. Variablen, die den Standort oder das Klima charakterisieren). Dieses Vorgehen erlaubt es, möglichst verschiedene (logisch unabhängige), aber jeweils interpretierbare Effekte darzustellen. Vorzugsweise wurde im finalen Modell nur eine Variable pro Gruppe (nämlich jene mit der grössten Varianzreduktion) verwendet. Bei Nichtlinearität der erklärenden Variablen oder bei Wechselwirkungen zwischen den Variablen wurden allerdings auch mehrere Variablen der gleichen Gruppe ins finale Modell aufgenommen.

Für die Evaluation wurden die einzelnen Modelle mit der Statistiksoftware R zu einem Gesamtmodell zusammengefügt. Zur Initialisierung braucht dieses einen EFM-Bestand. Dazu gehören die Einzelbaumbeobachtungen mit Brusthöhendurchmesser (BHD), Höhe und Baumart sowie die erwähnten Umweltvariablen. Der Programmfluss orientiert sich an der Abfolge einer EFM-Aufnahme, die jeweils mit der Bewirtschaftung beginnt. Danach folgen Zuwachs, Mortalität und Einwuchs, die in SwissStandSim für

den neuen Zustand fünf Jahre später vorhergesagt werden. Im Folgenden werden die demografischen Prozesse in der Reihenfolge des Programmflusses vorgestellt.

Bewirtschaftung

Die Bewirtschaftung besteht aus Durchforstung und Endnutzung, wobei bei der Durchforstung zwischen Hoch- und Niederdurchforstung gewählt werden kann. Hochdurchforstung steht dabei für alle Durchforstungssysteme, die die herrschenden Bäume fördern. Beginn, Ende, Turnus und Stärke (Grundflächenentnahme in Prozent) der Eingriffe können frei gewählt werden. Um die zu entnehmenden Bäume zu selektieren, wurde die Entnahmewahrscheinlichkeit als eine Funktion des relativen BHD² und von Bestandescharakteristiken (Stammzahl, Grundflächenentnahme, Baumart und vorherrschende Baumart) modelliert.

Wachstum

Zur Modellierung des Wachstums der elf Baumarten(gruppen) wurden 47 erklärende Variablen geprüft, die sich zu acht thematischen Gruppen zusammenfassen lassen: Zustand des Einzelbaums (basierend auf dem BHD), Konkurrenz, Bestandesentwicklung, Bestandesdichte, Durchforstungseffekte, Baumartenmischung, Standort und Klima. Bei den Klimaeffekten wurden Jahreswerte und saisonale Effekte geprüft. Die Feuchte bzw. Trockenheit wurde aus dem Verhältnis zwischen Niederschlag und Temperatur abgeleitet.

Der Einfluss des BHD auf das Grundflächenwachstum wurde mit einer nicht linearen Grundgleichung mit einem sigmoiden Verlauf über dem Durchmesser modelliert. Diese Grundgleichung wurde in Quicke et al (1994) vorgestellt und in der Schweiz bereits von Kaufmann (2001) und Rohner et al (2018) verwendet. Die anderen erklärenden Variablen beeinflussen die Form der Grundgleichung. Weil das Wachstum von besonderer Bedeutung ist, wurden die finalen Wachstumsmodelle Kreuzvalidiert, um ihre Vorhersagekraft für unabhängige Daten zu bestimmen.

Mortalität

Für jede Baumart(en) wurde die Einzelbaummortalität für die Fünf-Jahres-Periode mit einem empirischen Wahrscheinlichkeitsmodell mithilfe von logistischer Regression beschrieben. Auch hier wurden thematische Gruppen von Variablen definiert, die inhaltlich interpretiert werden können, nämlich: Vitalität, Grösse sowie Alter der Bäume, Bestandesdichte, Konkurrenz, Durchforstung, Baumartenmischung, Klima und Standort.

1 <https://is.gd/gjpNcb> (25.2.2020)

2 $BHD_{rel} = (BHD - BHD_{min}) / (BHD_{max} - BHD_{min})$

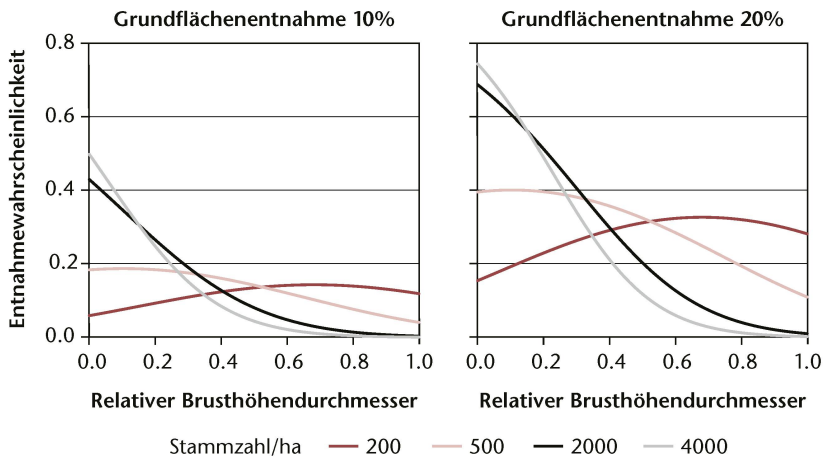


Abb 1 Entnahmewahrscheinlichkeit in der Hochdurchforstung in Abhängigkeit von relativem Brusthöhendurchmesser, Eingriffsstärke (Grundflächenentnahme 10% oder 20%) und Stammzahl.

Einwuchs

Aufgrund variierender Kluppschwellen im EFM-Projekt wurden für die Modellierung jene Bäume als Einwuchs betrachtet, die bei einer bestimmten Inventur erstmals einen BHD von mindestens 7.5 cm aufgewiesen hatten. Die Simulation des Einwuchses erfolgt in drei Schritten: Im ersten wird auf der Ebene einer Probefläche die Wahrscheinlichkeit von Einwuchs modelliert. Kommt es zu Einwuchs, wird im zweiten Schritt die Anzahl der einwachsenden Bäume modelliert. Im dritten Schritt

Ergebnisse

Bewirtschaftung

Die Entnahmewahrscheinlichkeit eines Baumes hängt direkt mit der relativen Grundflächenentnahme zusammen (Abbildung 1). Bei hoher Stammzahl (und folglich vielen relativ dünnen Bäumen) sinkt die Entnahmewahrscheinlichkeit mit zunehmendem relativem BHD. Bei tiefer Stammzahl, wie sie in älteren Beständen anzutreffen ist, ist die Ent-

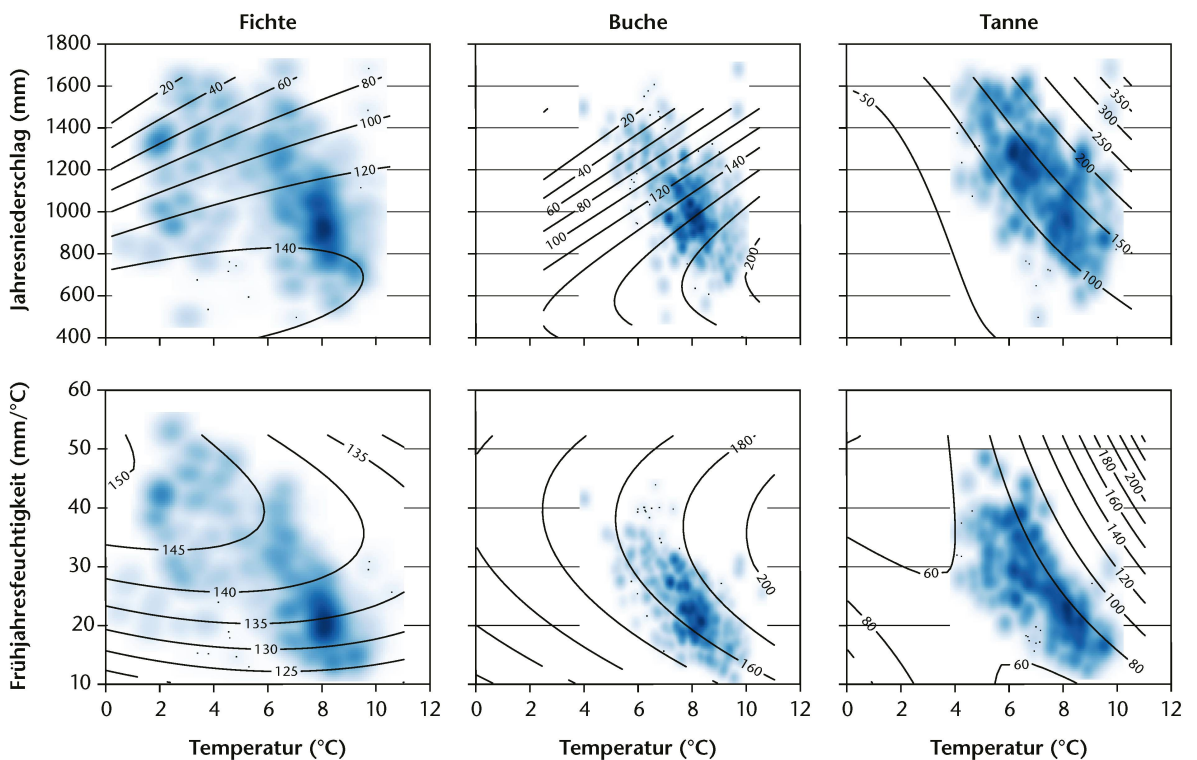


Abb 2 Grundflächenzuwachs (cm^2/Jahre) in Abhängigkeit von Jahresniederschlag (oben) bzw. Frühjahresfeuchtigkeit (unten) und Jahresmitteltemperatur für die Baumarten Fichte, Buche und Tanne. Der blaue Hintergrund markiert die Häufigkeit der Beobachtungen: Je dunkler, desto mehr Bestände sind bei den jeweiligen Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen verfügbar. Die Isolinen geben an, wie sich der Grundflächenzuwachs nach dem Modell verhält, wenn alle anderen erklärenden Variablen auf den Mittelwert der Beobachtung gesetzt sind.

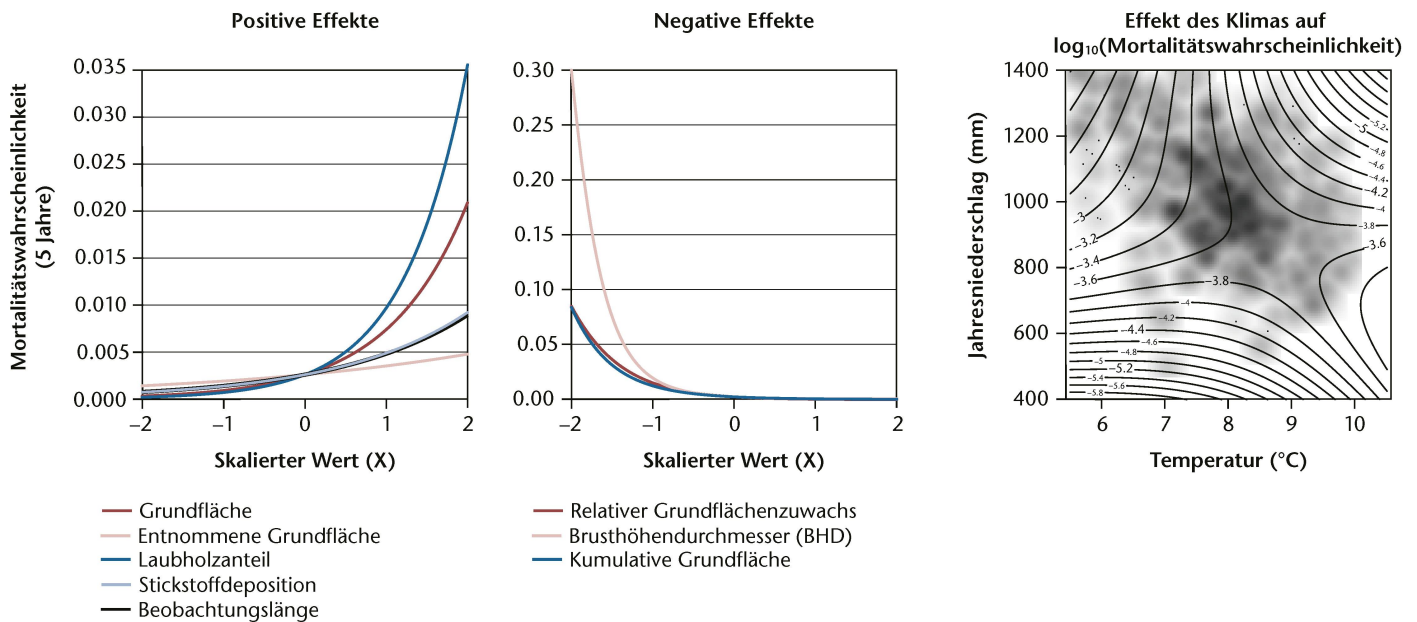


Abb 3 Relative Effektstärken für die Buchenmortalität in 5 Jahren.

nahmewahrscheinlichkeit für jene Bäume am grössten, die wenig dünner als die dicksten Bäume sind.

Wachstum

Aus dem strukturierten Vorgehen bei der Modellierung ergaben sich für das Wachstum Modelle mit bis zu 24 erklärenden Variablen, wobei die erklärte Varianz für die Beobachtungen mit 62% (Fichte), 74% (Buche) und 68% (Tanne) sehr gut ausfiel. Für jede Baumart wurde aus allen Variablengruppen mindestens eine erklärende Variable selektiert. Folglich ist der Zuwachs der Bäume von allen Variablengruppen abhängig. Für die Klimavariablen wurden Wechselwirkungen und nicht lineare Terme gefunden (Abbildung 2). Die Fichte wächst gut bei kühl-trockenen Bedingungen (Abbildung 2, oben), während die Tanne von Temperaturen über 9 °C und hohen Niederschlägen profitiert. Der Zuwachs von Fichte und Tanne steigt mit zunehmender Frühjahrsfeuchtigkeit an, während die Buche bei mittlerer Feuchtigkeit und höheren Temperaturen besser wächst (Abbildung 2, unten).

Mortalität

Die Mortalitätsmodelle weisen eine ähnlich hohe Komplexität wie die Wachstumsmodelle auf. Daher werden die Ergebnisse hier beispielhaft für die Buche gezeigt. Die Mortalitätswahrscheinlichkeit steigt bei der Buche an, wenn der Laubholzanteil, die Grundfläche, die Stickstoffdeposition und die entnommene Grundfläche zunehmen (Abbildung 3). Sie nimmt hingegen ab, wenn der BHD, der relative Grundflächenzuwachs und die kumulative Grundfläche zunehmen. Die Effekte von Temperatur und Niederschlag zeigten eine Wechselwirkung mit zunehmender Mortalität sowohl an kühl-nassen als auch an warm-trockenen Standorten.

Gesamtmodell

Drei Beispiele langer Zeitreihen für Buchen-, Fichten- und Tannenbestände zeigten, dass SwissStandSim die (mittleren) Durchmesser präzise vorhersagen kann (Abbildung 4). Die Abweichung bei der Tanne ist mutmasslich auf eine stärkere Störung im Alter 80 zurückzuführen. Da die Mortalitätsmodelle die Vulnerabilität der Bestände (gemessen an der Eingriffsstärke in der Variablengruppe «Durchforstung») berücksichtigen, bilden sie eine mittlere Mortalität ab. Wird ein Bestand von einer starken Störung, zum Beispiel einem Sturm, getroffen, unterschätzt das Modell die Mortalität. Treten in einem Bestand jedoch keine Störungen auf, überschätzt das Modell die Mortalität.

Diskussion und Ausblick

Im Vergleich zu den Waldwachstumsmodellen BWINPro (Hansen & Nagel 2014), Silva (Pretzsch et al 2002) oder Siwawa (Rosset et al 2013) werden die Prozesse in SwissStandSim mit deutlich mehr erklärenden Variablen beschrieben. So wird in Siwawa angenommen, dass der BHD-Zuwachs lediglich von der Grundfläche und einem Klimaindex abhängt. Während dies plausible summarische Ergebnisse ermöglicht, können Zuwachsreaktionen und zum Beispiel Baumartenmischungen nicht untersucht werden. Ein wichtiger Vorzug von SwissStandSim ist die grosse Flexibilität in dieser Hinsicht.

Bei der Entwicklung von SwissStandSim wurde darauf geachtet, dass möglichst wenige Versuchsflächen ausgeschlossen wurden. Das ermöglichte einen grossen Datensatz, hatte aber auch zur Folge, dass das Modell komplex ist und die einzelnen erklärenden Variablen bzw. Variablengruppen eine vergleichs-

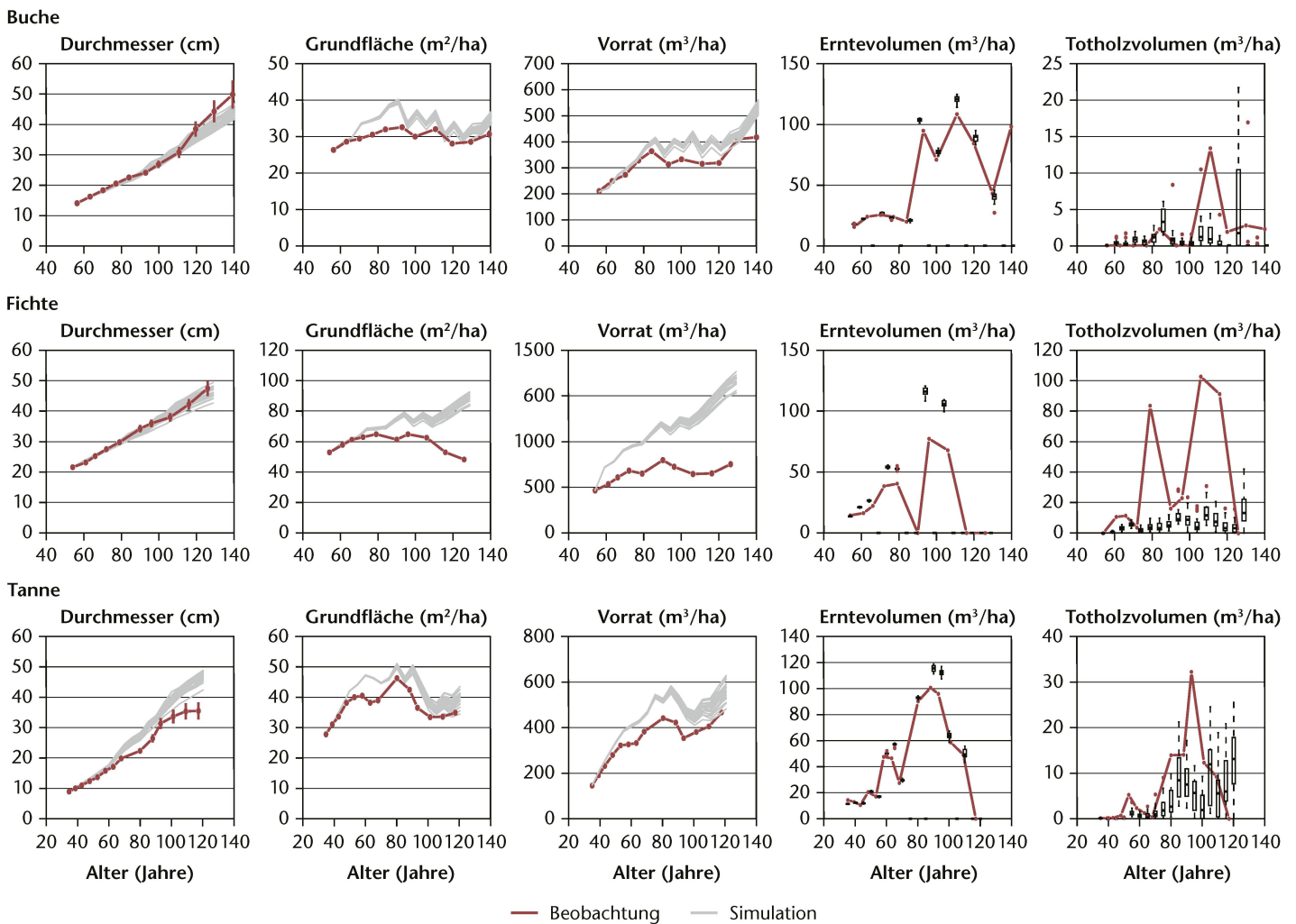


Abb 4 Simulation (graue Linien) und Beobachtung (rote Linien mit Punkten) der Bestandesentwicklung (mittlerer quadratischer Durchmesser, Grundfläche, Vorrat, Ernte- und Totholzvolumen) für je einen beispielhaften Buchen-, Fichten- und Tannenbestand. Buchenbestand: Baan am Kohlerweg, Zofingen, Produktionsregion Mittelland, 560 m ü.M., Beobachtungen 1890–2001; Fichtenbestand: Käppelistein, Hospental, Produktionsregion Alpen, 1475 m ü.M., Beobachtungen 1933–2005; Tannenbestand: Ob dem Neuhaus, Biel, Produktionsregion Jura, 670 m ü.M., Beobachtungen 1921–2008.

weise geringe Effektstärke aufweisen. Dennoch eignet sich SwissStandSim für vielseitige Fragestellungen. Dazu gehören die Effekte der Bestandesdichte und der Konkurrenz auf die Waldentwicklung oder die Frage, wie die Eingriffsstärke und die Stickstoffdeposition den Zuwachs und die Mortalität verändern. Anstelle einer konstanten Bonität werden Klima-, Stickstoff- und Standortdaten verwendet, weshalb für Zukunftsprognosen unterschiedliche Klimaszenarien einbezogen werden können und deren Einfluss auf die demografischen Prozesse betrachtet werden kann.

Die einzelnen Teilmodelle von SwissStandSim sind im statistischen Sinn nicht überparametrisiert. Sie enthalten aber auf jeden Fall sehr viele erklärende Variablen, was die Interpretation der Modelle erschwert. Die zugrunde liegende Idee war, dass die Teilmodelle die Beobachtungen auf den EFM-Flächen möglichst gut wiedergeben. Damit ergeben sich – je nach Stand der Information zu einer Baumartengruppe – unterschiedlich viele erklärende Va-

riablen in der Regression. Funktionale ökologische Zusammenhänge, wie sie zum Beispiel Silva (Pretsch 2002), Picus (Lexer & Honninger 2001) und ForClim (Bugmann 1996) zugrunde gelegt wurden, sind in SwissStandSim nicht implementiert. Es ist daher unklar, wie sich das Wachstumsmodell ausserhalb der Beobachtungen verhalten wird. Aufgrund der breiten Abstützung mit erklärenden Grössen, Daten und der interaktiven Formulierung der Modelle kann man aber erwarten, dass Vorhersagen in der Nähe der Beobachtungen stabil und von guter Qualität sind. Hinweise auf die (Un-)Plausibilität im Wachstum ergeben sich aus Abbildung 2. Man erkennt dort zum Beispiel im Extrapolationsbereich der Tanne bei hohen Temperaturen und hoher Frühjahrsfeuchtigkeit eine sich beschleunigende Zunahme des Wachstums. Diese Zunahme wird jedoch in der Realität nicht unendlich weitergehen, so, wie es das Modell andeutet. Auch eine Verbesserung des Wachstums im gegensätzlichen Fall bei geringer Temperatur und geringer Frühjahrsfeuchte ist nicht plausibel. Der Ur-

sprung dieses Problems liegt in der Anpassung der Wachstumsfunktion an das Klima mit nicht linear verlaufenden erklärenden Variablen. Würde man eine Linearität erzwingen, dann wäre das – über einen weiten Datenbereich hinweg – aber auch eine sehr starke Annahme.

Die Formulierung der Bewirtschaftung in SwissStandSim erlaubt eine flexible Anpassung des Eingriffsturnus, der Eingriffsstärke und der Durchforstungsart. Bei der Evaluierung mit Ertragskundendaten zeigte sich, dass auch ändernde Turnusse und Eingriffsstärken abgebildet werden können. Um zu bestimmen, welche Bäume bei einem Eingriff entfernt werden, wurden Entnahmewahrscheinlichkeiten formuliert, und mittels Zufallszahlen wurden damit einzelne Bäume selektiert. Die bestandesspezifischen Entnahmewahrscheinlichkeiten sind empirisch aus den EFM-Daten abgeleitet. Bei tiefen Stammzahlen entsprechen diese einer Hochdurchforstung, wie sie zum Beispiel in WEHAM (Bösch 2012) beschrieben wird. Bei hohen Stammzahlen entsprechen diese eher dem typischen Verlauf einer Niederdurchforstung.

Mit SwissStandSim kann als Durchforstung keine distanzabhängige Einzelbaumförderung (Z-Baum-Durchforstung, Auslesedurchforstung) simuliert werden. Hierfür müssten räumlich explizite Baumdaten vorliegen (Pretzsch 2001), die im EFM-Projekt aber erst seit den späten 1970er-Jahren erhoben werden. Man könnte mit einer uniformen Verteilung von Baumkoordinaten räumlich explizite Einzelbaumdaten annähern, wobei dann aber angenommen werden müsste, dass 1) sich die uniforme Verteilung – im Unterschied zur tatsächlichen Verteilung – kaum auf die abgebildeten Prozesse im Simulator auswirkt und 2) das Wachstum nur von den summarischen Statistiken basierend auf der BHD-Verteilung und nicht von der unmittelbaren Nachbarschaftsbeziehung der Bäume abhängt. Hinsichtlich einer möglichst generellen Anwendbarkeit des Modells wurde für SwissStandSim daher bewusst auf eine räumlich explizite Implementation verzichtet.

SwissStandSim benötigt zahlreiche Umweltdaten, was die Nutzung des Modells in der Praxis erschwert. Auf dem Stichprobennetz des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) sind Informationen zum Standort und zur Stickstoffdeposition sowie verschiedene Klimaszenarien verfügbar. Es ist geplant, diese der zukünftigen Modellanwendung zur Verfügung zu stellen. Allerdings beziehen sich die LFI-Daten auf kleine Probestandflächen, SwissStandSim hingegen bezieht sich auf ganze Bestände. Um aus der Stichprobe eines LFI-Plots einen vollständigen Bestand zu generieren, werden im Projekt «Ökosystemleistungen von Wäldern» (SessFor)³ des Nationalen

Forschungsprogramms «Nachhaltige Wirtschaft» (NFP73) Modelle für die Durchmesser- und die Artenzusammensetzung entwickelt. Die Durchmesser- und Artenzusammensetzung kann überdies für die Generierung von typischen Beständen (Straten von LFI-Probestandflächen) verwendet werden.

In einem weiteren Teilprojekt von SessFor werden neue Bewirtschaftungsformen in SwissStandSim implementiert, zum Beispiel eine summarische (d.h. räumlich nicht explizite) Auslesedurchforstung mit Z-Baum-Ernte. Beabsichtigt ist zudem, SwissStandSim mit einem System aus gewichteten Indikatoren zur Bewertung von Waldleistungen zu verknüpfen. Hierfür sollen zusammen mit Wald- und Holzfachleuten aus Praxis und Forschung Waldentwicklungsziele für verschiedene Waldtypen definiert, deren waldbauwirtschaftliche Umsetzungen diskutiert und Bewirtschaftungsszenarien simuliert werden. Als Letztes soll SwissStandSim als Teil eines IT-basierten Entscheidungsunterstützungssystems anhand von konkreten Beständen in der Praxis getestet werden. ■

Eingereicht: 3. Oktober 2019, akzeptiert (mit Review): 7. April 2020

Literatur

- BADOUX E (1983)** Ertragstabellen für die Fichte in der Schweiz. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL.
- BÖSCH B (2012)** WEHAM: Modelle und Algorithmen. Freiburg i.Br.: Forstliche Versuchs- Forschungsanstalt. 77 p.
- BUGMANN H (1996)** A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.
- FORRESTER DI, NITZSCHE J, SCHMID H (2019)** The Experimental Forest Management project: an overview and methodology of the long-term growth and yield plot network. Birmensdorf: Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Research WSL. 77 p.
- FORRESTER DI, TROTSIUK V, MATHYS AS (2020)** 3-PG: ein physiologisches Waldwachstumsmodell. *Schweiz Z Forstwes* 171: 158–164. doi: 10.3188/szf.2020.0158
- HANSEN J, NAGEL J (2014)** Waldwachstumskundliche Software-systeme auf Basis von TreeGrOSS. Göttingen: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Beiträge Band 11. 243 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: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL. pp. 162–196.
- LANDSBERG JJ, WARING RH (1997)** A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For Ecol Manage* 95: 209–228.
- LEDERMANN T (2006)** Description of PrognAus for Windows 2.2. In: Hasenauer H, editor. *Sustainable forest management*. Berlin: Springer. pp. 71–78.
- LEXER MJ, HÖNNINGER K (2001)** A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. *For Ecol Manage* 144: 43–65.
- NAGEL J, SCHMIDT M (2006)** The silvicultural decision support system BWINPro. In: Hasenauer H, editor. *Sustainable forest management*. Berlin: Springer. pp. 59–63.
- PRETZSCH H (2001)** Modellierung des Waldwachstums. Berlin: Parey. 341 p.
- PRETZSCH H, BIBER P, DURSKEY J (2002)** The single tree-based stand simulator SILVA – construction, application and evaluation. *For Ecol Manage* 162: 3–21.

³ www.nfp73.ch/de/projekte/forstwirtschaft/oekosystemleistungen-von-waeldern (25.2.2020)

- QUICKE H, MELDAHL R, KUSH J (1994) Basal area growth of individual trees: a model derived from a regional longleaf pine growth study. *For Sci* 40: 528–542.
- REMUND J, RIHM B, HUGUENIN-LANDL B (2014) Klimadaten für die Waldmodellierung für das 20. und 21. Jahrhundert: Schlussbericht des Projektes im Forschungsprogramm Wald und Klimawandel. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 39 p.
- RIHM B (1996) Critical loads of nitrogen and their exceedances: Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Bern: Federal Office for the Environment. 78 p.
- 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.
- ROSSET C, SCHÜTZ JP, LANZ A, MENK J, GOLLUT C ET AL (2013) SiWaWa: Waldwachstumssimulationsmodell der neuen Generation. Das Waldwachstum für den Praktiker leicht gemacht. Zollikofen: Hochschule Agrar- Forst- Lebensmittelwissenschaften. 56 p.
- ZELL J (2018A) SwissStandSim: a climate sensitive single-tree stand simulator for Switzerland. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 122 p.
- ZELL J (2018B) Climate sensitive tree growth functions and the role of transformations. *Forests* 9: 382.

SwissStandSim: un modèle de croissance forestière par arbre individuel, sensible au climat

Le développement de nos peuplements forestiers sous l'effet du changement climatique et l'influence des mesures prises aujourd'hui sur les prestations forestières futures sont devenus des questions sylvicoles importantes. C'est pourquoi des aides basées sur des modèles sont nécessaires pour la planification forestière et l'optimisation des interventions. Cet article présente le nouveau modèle de croissance forestière SwissStandSim, basé sur des données scientifiques, qui devrait faire partie d'un futur système d'aide à la décision pour la sylviculture suisse. SwissStandSim est basé sur les données des parcelles d'observations à long terme en Suisse. Elles sont utilisées pour créer un modèle de croissance forestière basé sur des arbres individuels et sensible au climat. Les données ont été combinées avec autant de variables environnementales que possible afin de modéliser les processus démographiques de gestion, de croissance, de mortalité et de passage au seuil d'inventaire. Les variables climatiques ont montré des interactions écologiquement intéressantes, en particulier entre les précipitations et la température, tant pour la croissance que pour la mortalité. Une autre interaction a été trouvée entre l'intensité des interventions et la mortalité. Plus les interventions sont fortes, plus la mortalité est élevée dans les années suivantes. Cela permet des interprétations concernant la vulnérabilité des peuplements après des interventions majeures. Des exemples de simulation avec SwissStandSim pour trois parcelles montrent une bonne concordance entre les données et le modèle. La fréquence et l'intensité des événements perturbateurs y jouent un rôle-clé. La base de calcul de SwissStandSim est un régime de perturbation moyen, qui peut conduire à une sur- ou sous-estimation de la mortalité selon la situation locale. Avec SwissStandSim, la gestion des peuplements peut être simulée de manière flexible. Ainsi, SwissStandSim est prédestiné à devenir un outil pratique d'aide à la décision pour les questions de sylviculture au niveau des peuplements dans le cadre d'un projet en cours au WSL (SessFor, NFP73).

SwissStandSim: a climate sensitive single-tree based forest growth model

The development of our forests under climate change and the influence of today's actions on future ecosystem services in forests have become important silvicultural issues. Therefore, model-based tools are needed for forest planning and the optimization of interventions. In this article the new, scientifically based forest growth model SwissStandSim is presented, which shall become part of a future decision support system for the Swiss forestry. SwissStandSim is based on the data of the long-term experimental growth and yield plots in Switzerland. These data are used to create a climate sensitive single-tree based forest growth model. The tree data were combined with many environmental variables to model the demographic processes of management, growth, mortality and ingrowth. The climate variables showed ecologically interesting interactions, especially between precipitation and temperature, both for growth and mortality. A further interaction was found between the intensity of forest management and mortality. The stronger the management, the higher the mortality in the following years. This allows interpretations regarding the vulnerability of stands after major interventions. Simulations with SwissStandSim for three exemplary growth and yield plots show a good agreement between data and model, with the frequency and intensity of natural disturbances playing a key role. The calibration of SwissStandSim was based on a mean disturbance regime, which can lead to an over- or underestimation of mortality depending on the local situation. With SwissStandSim the management of forest stands can be simulated flexibly. Thus, SwissStandSim is very suitable to become part of a practical tool for decision support in silvicultural questions at the stand level developed in the WSL project SessFor (NFP73).