

3-PG: ein physiologisches Waldwachstumsmodell

David I. Forrester
Volodymyr Trotsiuk

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)*
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH) und
Tschechische Agraruniversität Prag (CZ)

Amanda S. Mathys

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

3-PG: ein physiologisches Waldwachstumsmodell

Ertragstabellen waren die ersten Waldwachstumsmodelle, die in Europa entwickelt wurden. Diese empirischen Modelle sind für die Anwendung unter zukünftigen klimatischen Bedingungen, für Mischbestände oder für die Abschätzung der Effekte neuer waldbaulicher Systeme ungeeignet. In den letzten Jahrzehnten wurden zunehmend Alternativen zu Ertragstabellen entwickelt, unter anderem prozessbasierte Modelle, die auch Zustände ausserhalb der Beobachtungsdaten abbilden können. Solche Modelle berücksichtigen Wachstumsdaten, aber ihre Formulierungen basieren meist auf physiologischen und allometrischen Prinzipien des Pflanzenwachstums. Zu dieser Modellfamilie gehört 3-PG (Physiological Processes Predicting Growth), das in Australien und Nordamerika für gleichaltrige Reinbestände von immergrünen Laub- und Nadelbäumen entwickelt wurde. In einer kürzlich erfolgten Weiterentwicklung (Version 3-PG_{mix}) können auch Wechselwirkungen zwischen Bäumen verschiedener Grösse, verschiedenen Alters und verschiedener Arten simuliert werden. Der Artikel beschreibt das Modell, das aus sechs Untermodellen besteht und trotz seiner physiologischen Grundlagen Kenngrössen liefert, die für die praktische Forstwirtschaft von grosser Bedeutung sind. Zwei Beispiele von Anwendungen von 3-PG für die Schweiz werden vorgestellt. Im ersten Beispiel wird die Veränderung des Wachstums in Mischbeständen aus Waldföhre (*Pinus sylvestris*) und Buche (*Fagus sylvatica*) aufgrund des Klimawandels dargestellt. Dabei wird gezeigt, dass das Wachstum der Buche durch erhöhte Trockenheit wesentlich stärker eingeschränkt wird als jenes der Waldföhre, die zwar ebenfalls durch die Trockenheit stärker limitiert wird, aber gleichzeitig vom geringeren Konkurrenzdruck durch die Buche profitiert. Im zweiten Beispiel wird 3-PG angewendet, um den klimatischen Stress für die Buche als Funktion der Standorteigenschaften schweizweit zu quantifizieren. Beide Beispiele zeigen, dass 3-PG standortspezifische Informationen liefert, wie die Waldwachstumsdynamik durch Klima, Artenzusammensetzung und Waldbau beeinflusst wird.

Keywords: climate change, mixed forest stands, species distribution, 3-PG model

doi: 10.3188/szf.2020.0158

* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail david.forrester@wsl.ch

Die ersten Waldwachstumsmodelle, die in Europa entwickelt wurden, waren empirischer Natur, was bedeutet, dass der Verlauf des Wachstums aus Daten von Versuchsbeständen anhand von grafischen und später statistischen Methoden abgeleitet wurde. Ein Beispiel dafür sind die Ertragstabellen (Badoux 1983). Sie dienten als Orientierungshilfe in der Bewirtschaftung und basieren auf ertragskundlichen Beobachtungen gleichförmiger Bestände einer einzigen Art, die konsequent einer spezifischen Bewirtschaftungsform unterliegen. Für die Anwendung unter zukünftigen klimatischen Bedingungen, für Mischbestände oder für die Abschätzung der Effekte neuer waldbaulicher Systeme sind sie aber ungeeignet, da die dafür erforderlichen Beobachtungsdaten nicht existieren. Daher wurden in den letzten Jahrzehnten zunehmend prozessba-

sierte Modelle entwickelt, die auch Zustände ausserhalb der Beobachtungsdaten abbilden können (Battaglia et al 2004, Duursma & Medlyn 2012). Solche Modelle berücksichtigen Wachstumsdaten, aber ihre Formulierungen basieren auf physiologischen und allometrischen Prinzipien des Pflanzenwachstums.

In diesem Artikel stellen wir das prozessbasierte Modell 3-PG (Physiological Processes Predicting Growth) vor, das von Landsberg & Waring (1997) für gleichaltrige Reinbestände von immergrünen Laub- oder Nadelbäumen in Australien und Nordamerika entwickelt worden war und das dank einer kürzlich erfolgten Weiterentwicklung (Modellversion 3-PG_{mix}; Forrester & Tang 2016) auch grosses Anwendungspotenzial in Mitteleuropa hat. Mit zwei Fallbeispielen illustrieren wir das Anwendungspotenzial von 3-PG in der Schweiz.

Modellbeschreibung

Wie von Thürig & Bugmann (2020, dieses Heft) dargelegt, ist das einfachste Modell, das alle Benutzerkriterien erfüllt und zur Lösung einer Aufgabe verwendet werden kann, gleichzeitig auch das geeignetste Modell für diese Aufgabe. Eine grössere Komplexität würde das Fehlerpotenzial erhöhen, eine stärkere Vereinfachung hingegen die Vorhersagemöglichkeiten reduzieren. Dieser Grundsatz wurde auch bei der Entwicklung von 3-PG befolgt. So wurden die detaillierten Prozessmodelle, die wegen ihrer Komplexität oft nur in der Forschung Verwendung finden, stark vereinfacht, ohne aber die Essenz der Beziehungen zwischen den abiotischen treibenden Variablen und den Prozessen der Wald-dynamik zu tangieren. Die Entwickler von 3-PG erkannten, dass viele Prozesse, die das Waldwachstum beeinflussen, auf Bestandesebene (pro Hektare) statt auf Bauebene (pro Baum) modelliert werden können (Landsberg & Waring 1997, Pretzsch et al 2015). Daher ist 3-PG – anders als zum Beispiel SwissStandSim (Zell et al 2020, dieses Heft) oder ForClim (Bugmann & Huber 2020, dieses Heft) – ein Bestandes- und kein Einzelbaummodell. Die Prozesse werden mit einer monatlichen Auflösung simuliert, womit die saisonalen Auswirkungen der Witterung auf das

Wachstum analysiert werden können, was mit jährlichen Klimadaten, die saisonale Extreme mitteln, nicht möglich wäre (Landsberg & Sands 2011).

3-PG besteht aus sechs Untermodellen (Abbildung 1). Das erste Untermodell berechnet, wie viel von der einfallenden Strahlung durch die Blätter im Bestand absorbiert wird und somit für die Fotosynthese zur Verfügung steht. Im zweiten Untermodell wird zunächst aufgrund der baumartenspezifischen maximalen (potenziellen) Lichtausnutzungseffizienz, weiteren baumartenspezifischen Parametern und den herrschenden Umweltbedingungen (Temperatur, Frost, Dampfdruckdefizit, Bodenfeuchte, Bodenfruchtbarkeit, atmosphärischer CO₂-Gehalt) die tatsächliche Lichtausnutzungseffizienz berechnet (Landsberg & Waring 1997, Sands & Landsberg 2002). Anschliessend wird anhand der absorbierten Strahlung und der tatsächlichen Lichtausnutzungseffizienz die Bruttoprimärproduktion (BPP) ermittelt. Das dritte Untermodell berechnet die Nettoprimärproduktion (NPP) unter der Annahme, dass das Verhältnis von NPP zu BPP konstant ist (Waring et al 1998). Die NPP wird anschliessend auf Laub, Stamm und Wurzeln verteilt (Biomasseallokation). Dabei hängt der Anteil, der den Wurzeln zugeschlagen wird, von der Bodenfruchtbarkeit, dem Dampfdruckdefizit und der Bodenfeuchte ab. Die Aufteilung zwischen Stamm und Laub erfolgt aufgrund der Baumgrösse, wobei ein umso grösserer Teil dem Stamm zugewiesen wird, je grösser der Baum ist. Das vierte Untermodell berechnet die Wasserbilanz. Hierfür werden Transpiration und Evaporation aus dem Boden mit der Penman-Monteith-Gleichung (Penman 1948, Monteith 1965) ermittelt und zur Interzeption der Krone addiert, um die Verdunstung (Evapotranspiration) vorherzusagen. Veränderungen des Bodenwassergehaltes werden als Differenz zwischen Evapotranspiration und Niederschlag berechnet, wobei Wasser, das die maximale Speicherkapazität des Bodens überschreitet, abfließt (Sands & Landsberg 2002). Ist die Evapotranspiration grösser als das verfügbare Bodenwasser, wird die NPP entsprechend reduziert. Das fünfte Untermodell dient der Vorhersage der Stammzahlentwicklung. Hierfür wird einerseits die dichteabhängige Mortalität unter Verwendung des Selbstausdünnungsgesetzes (Yoda et al 1963) ermittelt (Landsberg & Waring 1997, Sands & Landsberg 2002), andererseits wird die dichteunabhängige Mortalität, d.h. die Mortalität, die durch Schädlinge, Krankheiten oder Trockenheit verursacht wird, anhand von empirischen Zusammenhängen zwischen Stammzahl und dem Alter der Baumart modelliert (Sands 2004, Gonzalez-Benecke et al 2014). Das sechste Untermodell rechnet die modellierte Biomasse in ertragskundliche Grössen um, die für die Forstpraxis relevant sind (z.B. Vorrat, Zuwachs, Mitteldurchmesser, Bestandeshöhe).

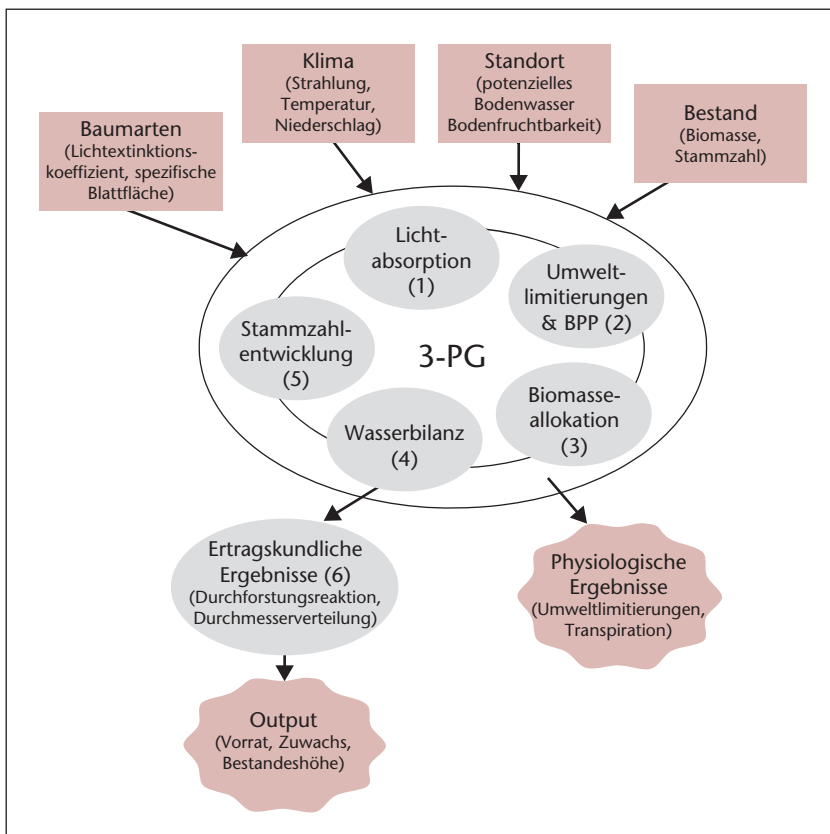


Abb 1 Hauptkomponenten des 3-PG-Modells (modifiziert nach Landsberg & Sands 2011). Sechs Untermodelle (graue Ovale) werden für die Vorhersage der Lichtabsorption (1), der Bruttoprimärproduktion (BPP) aufgrund der Umweltlimitierungen (2), der Biomasseallokation (3), der Wasserbilanz (4) und der Stammzahlentwicklung (5) verwendet. Ein Management-Submodell rechnet die Biomasse auf die für die Forstpraxis relevanten ertragskundlichen Grössen um (6).

Inputdaten
Standort <ul style="list-style-type: none"> – Breitengrad – Bodenfruchtbarkeitsbewertung (zwischen 0 = sehr geringe Fruchtbarkeit und 1 = keine Nährstoffbeschränkung) – Minimal und maximal pflanzenverfügbares Bodenwasser (berechnet aus Bodentextur und Bodentiefe) – Initial verfügbares Bodenwasser
Klima (Daten in monatlicher Auflösung) <ul style="list-style-type: none"> – Durchschnittliche Minimaltemperatur und durchschnittliche Maximaltemperatur – Sonneneinstrahlung – Niederschlagssumme – Anzahl Frosttage – Atmosphärische CO₂-Konzentration (nur erforderlich, wenn CO₂-Effekte von Interesse sind)
Bestand* <ul style="list-style-type: none"> – Stammzahl (Bäume pro Hektare) – Anfängliche Stamm-, Wurzel- und Blattbiomasse (pro ha oder pro Baum). Kann aus dem Schaftdurchmesser unter Verwendung von Biomassegleichungen berechnet werden (siehe Forrester et al 2017b)
Parameter der Baumarten <ul style="list-style-type: none"> – Artspezifische physiologische und allometrische Parameter, die aus der Literatur stammen oder direkt gemessen wurden. Zum Beispiel Lichtextinktionskoeffizient, Koeffizienten der Beziehung zwischen BHD und Stammbiomasse, spezifische Blattfläche von jungen und alten Bäumen, maximale Lichtausnutzungseffizienz

Tab 1 Inputdaten für 3-PG und 3-PG_{mix}. * Für 3-PG_{mix} wird jede dieser Variablen für jede Kohorte benötigt. Eine Kohorte kann eine Art, eine Altersklasse oder eine Grössenklasse sein. BHD: Brusthöhendurchmesser.

Mit der Erweiterung des Modells auf Mischwälder und ungleichaltrige Bestände (3-PG_{mix}) können verschiedene Arten und Altersgruppen und deren Interaktionen simuliert werden (Forrester & Tang 2016). Dafür wurden die Lichtabsorptionsberechnungen stark modifiziert. Neu wird für jede Art und Altersklasse die vertikale Position der Kronen berücksichtigt, anstatt wie im ursprünglichen Modell die Kronen als ein einziges grosses Blatt zu behandeln. Damit können die vertikalen Strahlungs- und Dampfdruckgradienten innerhalb des Kronendachs berechnet werden. Diese Berechnungen ermöglichen den Einbezug von Artinteraktionen und ihrer Auswirkungen auf die Evapotranspiration, womit Mischungseffekte auf den Wasserhaushalt berücksichtigt werden.

3-PG benötigt für die Modellierung Inputdaten zum Standort, zum Klima, zu den Baumarten und zum Bestand (Tabelle 1, Abbildung 1).

Forstlicher und ökologischer Output des Modells

Häufig verwendete forstliche Resultate von 3-PG sind die zentralen forstlichen Grössen Grundfläche, Stammzahl, Vorrat und durchschnittlicher jährlicher Volumenzuwachs. Es können auch Grössen wie der Mitteldurchmesser und die Biomasse ausgegeben werden. Ökologische Variablen werden ebenfalls berechnet, zum Beispiel die BPP, die NPP, die Evapotranspiration, das pflanzenverfügbare Bodenwasser,

der Blattflächenindex und das Ausmass der Umweltlimitierungen. Die meisten Outputs von 3-PG können als Monats- oder Jahreswerte dargestellt werden.

3-PG ist in einer VisualBasic-Implementierung in Microsoft Excel frei verfügbar¹. Ebenfalls ist ein 3-PG-Paket für die Software-Suite R erhältlich.²

Modellanwendungen

Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf das Wachstum von Waldföhren-Buchen-Mischungen?

Es ist bekannt, dass der Klimawandel in Mischbeständen die Interaktionen zwischen den Arten verändern kann (u.a. Forrester 2014). Es gibt aber erst wenige Studien, die sich mit diesen Effekten beschäftigten. 3-PG_{mix} wurde kürzlich verwendet, um die klimatischen Effekte in Mischbeständen aus Buche (*Fagus sylvatica*) und Waldföhre (*Pinus sylvestris*) zu untersuchen (Forrester et al 2017a). In die Studie wurden 78 Versuchsflächen einbezogen, die über ganz Europa verteilt sind. Weil die vorhergesagten Mischungseffekte in Abhängigkeit von Temperatur, Niederschlag, Bodenfeuchte, Bodenfruchtbarkeit, Alter und Bestandesdichte gut mit Ergebnissen experimenteller Studien übereinstimmten, wurde der gewonnene Parametersatz verwendet, um zu untersuchen, wie sich das Wachstum und der Ertrag in einem Schweizer Mischbestand, der von Waldföhre und Buche dominiert ist, im Klimawandel entwickeln könnte. Als Initialisierungsdaten verwendeten wir die mittleren Bestandesbedingungen von drei Dauerflächen des Netzwerks der langfristigen Wachstums- und Ertragsforschung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), für die schon seit über 60 Jahren Beobachtungen existieren (Forrester et al 2019): Stadtföhren (Eglisau, ZH), Pâturage du Droit (Cormoret, BE) und Holzenberg (Ziefen, BL). Diese Bestände wurden in der Regel alle acht Jahre durchforstet. Wir verwendeten Klimadaten von 1981 bis 2010 und verglichen die Wachstumsdynamik in dieser Periode mit der Wachstumsdynamik unter den für das Ende des 21. Jahrhunderts zu erwartenden Klimabedingungen in der Schweiz (RCP8.5; CH2018 2018).

Mit dem zukünftigen Klima war das Wachstum der Buche deutlich reduziert (Abbildung 2), was auf die trockeneren und heisseren Sommer zurückzuführen ist. Die Waldföhre war ebenfalls vom Klimawandel beeinflusst. Weil aber die Konkurrenz durch die Buche zurückging, widerspiegelte sich der erhöhte klimatische Stress kaum in ihrem Wachstum, das in der Simulation nur leicht unter jenem des heutigen Klimas lag.

¹ <http://3pg.forestry.ubc.ca/> (3.3.2020)

² <https://github.com/trotsiuk/r3PG> (2.4.2020)

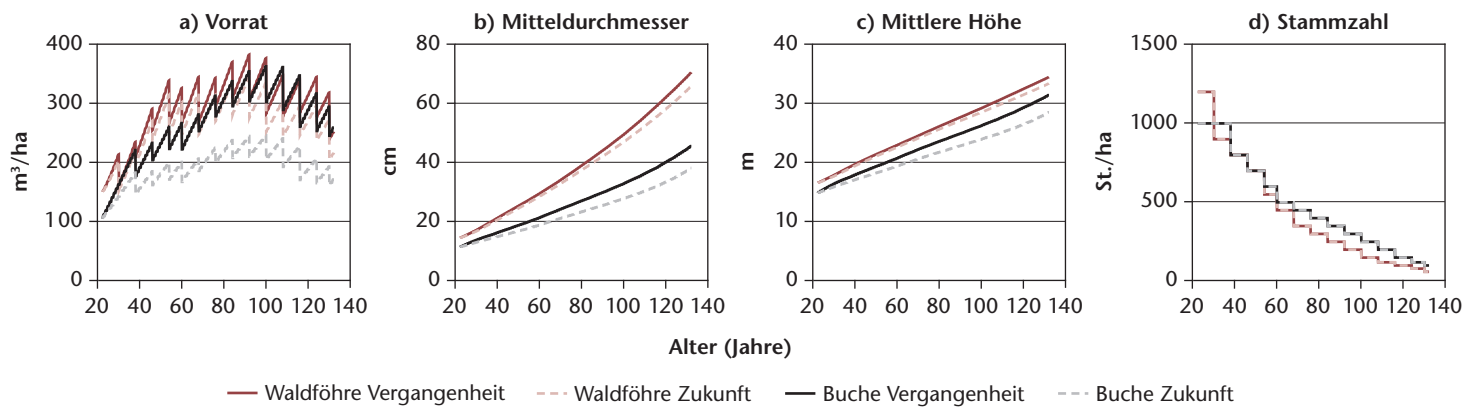


Abb 2 Simulation von a) Vorrat, b) Mitteldurchmesser, c) mittlerer Höhe und d) Stammzahl eines Mischbestands aus Waldföhre und Buche in Abhängigkeit des Bestandesalters für das in der Vergangenheit (1981–2010) herrschende und das für das Ende des 21. Jahrhunderts prognostizierte Klima.

Diese Simulationen zeigen, wie die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wachstumsdynamik eines Bestandes an einem konkreten Standort untersucht werden können. Mit dem Modell können verschiedene Baumarten, Artenanteile oder Artenkombinationen getestet werden. Wir haben nur ein einfaches Beispiel angeführt, da 3-PG erst vor Kurzem in der Schweiz eingeführt wurde und substantziellere Auswertungen noch in Entwicklung sind.

Unter welchen Standortbedingungen werden Buchenwälder vom Klima gestresst?

Wegen des Klimawandels können Arten, die bisher für einen bestimmten Standort gut geeignet waren, ihre lokale Eignung verlieren. Um uns auf diese Veränderungen vorzubereiten und sie besser zu verstehen, benötigen wir Informationen darüber, welche Faktoren das Wachstum einer bestimmten Art limitieren. Auch hierfür kann das Modell 3-PG nützlich sein. In einer Fallstudie haben wir 3-PG verwendet, um den Stress der Buche in der Schweiz aufgrund des Klimas, der Bodenfruchtbarkeit und der

Bodenfeuchte zu analysieren (Abbildung 3). Als Input für 3-PG wurden monatliche meteorologische Daten (1961–1990) von MeteoSchweiz verwendet, die von der Gruppe Landschaftsdynamik der WSL mit der DAYMET-Methode (Thornton et al 1997) auf ein Gitter mit einer Maschenweite von 100 m interpoliert wurden. Standortsspezifische Informationen zu den Bodeneigenschaften (siehe Tabelle 1) wurden der digitalisierten Bodeneignungskarte der Schweiz (Massstab 1:200 000)³ entnommen.

In einem ersten Schritt wurde simuliert, wie stark die saisonalen Umweltbedingungen das Wachstum der Buche limitieren. In einem zweiten Schritt wurden diese Limitierungen als Prädiktoren verwendet, um die im vierten Landesforstinventar (LFI4; 2009–2017; WSL 2018) beobachtete Präsenz bzw. Abwesenheit der Buche mit einem «Random Forest»-Modell statistisch zu modellieren. Das statistische Modell wurde mit 70% der Beobachtungsdaten aus dem LFI4 kalibriert. Die restlichen 30% der Daten wurden für die Modellevaluation («Validierung») verwendet.

Die mit diesem Modell simulierte Präsenzwahrscheinlichkeit der Buche (Abbildung 3) zeigt, welche Faktoren für das Wachstum an einem bestimmten Standort in den verschiedenen Jahreszeiten ausschlaggebend sind.

Bei dieser Analyse wurden andere Prozesse der Walddynamik, zum Beispiel die Verjüngung, nicht berücksichtigt. Mit solchen räumlichen Analysen kann man sowohl potenzielle Verschiebungen in der Artverbreitung unter Szenarien eines zukünftigen Klimas simulieren als auch in der Zukunft geeignete Standorte für neue Arten oder Provenienzen erkennen (z.B. Almeida et al 2010, Mathys et al 2017).

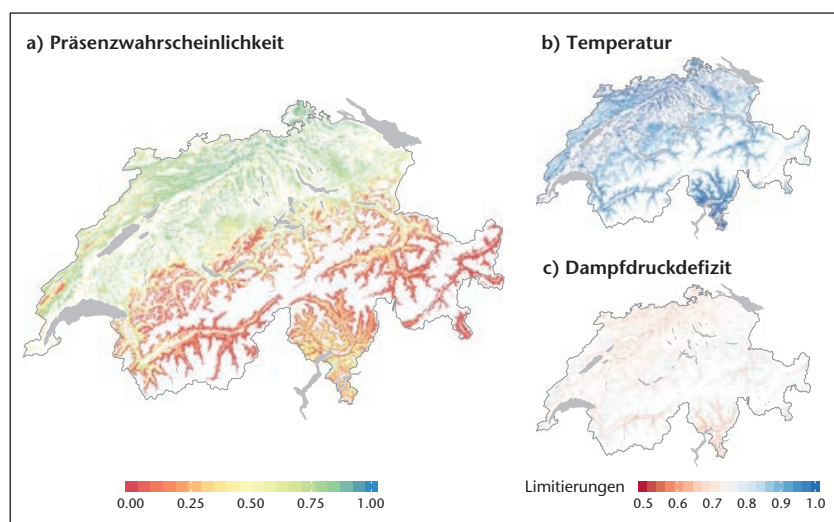


Abb 3 Simulierte Präsenzwahrscheinlichkeit der Buche, basierend auf den von 3-PG simulierten Umweltlimitierungen für 55-jährige Wälder (a) sowie Beispiele für die Limitierung durch die Juni-Temperatur (b) und das Juni-Dampfdruckdefizit (c) unter den heutigen Klimabedingungen. Die Limitierungen reichen von keiner Wachstumsbegrenzung (1) bis zu einer starken Begrenzung (0).

Diskussion

Möglichkeiten des Einsatzes von 3-PG

3-PG wird von Forstpraktikern in Australien, Afrika, Süd-/Nordamerika und Asien für die kurz-

³ <https://is.gd/gjpNcb> (31.3.2020)

fristige Betriebsplanung und für die langfristige strategische Planung für viele verschiedene Baumarten und Waldtypen eingesetzt (Dye 2005, Paul et al 2006, Battaglia et al 2007, Gupta & Sharma 2019), zum Beispiel um das Potenzial neuer Arten oder Provenienzen für Plantagen abzuschätzen oder um waldbauliche Systeme zu entwerfen bzw. zu modifizieren (z.B. Almeida et al 2010, Forrester & Tang 2016). Einige der weltweit grössten Plantagenunternehmen haben 3-PG sogar für einzelne Klone parametrisiert, um ermitteln zu können, welche Klone anfälliger auf Trockenheit sind oder wo welche Klone am besten wachsen (Battaglia et al 2007, Almeida et al 2010). Das Modell wurde ebenfalls für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte und der Wasserbilanz auf der Bestandes- und Landschaftsebene angewendet (z.B. Dye 2005, Paul et al 2006).

Bisher beschränkte sich die Anwendung von 3-PG in Europa hauptsächlich auf gleichaltrige Wälder, zum Beispiel Plantagen in Finnland, Portugal, Schottland und Spanien (Gupta & Sharma 2019). In der Schweiz wurde 3-PG unseres Wissens ausser in den in diesem Artikel präsentierten Fallbeispielen lediglich in zwei früheren Studien genutzt. In der ersten wurde untersucht, wie sich die Waldgrenze als Reaktion auf das Klima verändert und welche Faktoren das Wachstum am stärksten einschränken (Coops et al 2013). Diese Studie zeigte, dass hauptsächlich die Temperaturen im Herbst und Frühling für die Lage der oberen Waldgrenze und ihre Verschiebung in einem sich ändernden Klima verantwortlich sind. Die zweite Studie ging der Frage nach, wie sich das Wachstum der Fichte (*Picea abies*) und der Buche in Jahren mit extremer Witterung vom durchschnittlichen Wachstum als Funktion der Höhenlage unterscheidet (Trotsiuk et al 2020). Dabei wurde gezeigt, dass warm-trockene Extreme die Produktivität in hohen Lagen erhöhten, in niedrigen Lagen dagegen verringerten. Ein wichtiges Ergebnis dieser Studie war, dass die Auswirkungen der einzelnen Extreme keine lineare Funktion der Höhe waren. Daraus ergibt sich, dass empirische Datensätze für solche Abschätzungen nicht verwendet werden können, da die zukünftige Klimareaktion eines Bestandes vermutlich nicht durch jene eines anderen Bestandes auf einem heute wärmeren oder trockeneren Standort repräsentiert wird. Modelle wie 3-PG können diesbezüglich dagegen einen Eindruck vermitteln.

Aufgrund gezielter Modellerweiterungen kann 3-PG_{mix} heute auch für ungleichaltrige Mischbestände und Laubbäume eingesetzt werden, wie sie in Mitteleuropa vorkommen (Forrester et al 2017a).

Dass 3-PG so vielfältig eingesetzt wird, kann im Wesentlichen auf drei Gründe zurückgeführt werden. Erstens hat 3-PG eine einfache Struktur, was das Modell leicht verständlich, parametrisierbar und anwendbar macht. Zweitens liefert das Modell Ergebnisse und Produkte, die von Wissenschaftlern

und Praktikern häufig verwendet werden und die für deren Arbeit von Bedeutung sind. Drittens wurde das Verhalten aller Teilmodelle gründlich anhand von Beobachtungsdaten evaluiert. Viele andere prozessbasierte Modelle wurden nur bezüglich ihrer «Endprodukte» wie Wachstum und Ertrag überprüft. Es gibt aber keinen Grund anzunehmen, dass gute Wachstums- und Ertragsvorhersagen prozessbasierter Modelle hinreichende Indikatoren dafür sind, dass die anderen Berechnungen (z.B. Lichtabsorption, Wasserbilanz, Biomasseallokation; Abbildung 1) wirklich korrekt sind und das Modell somit aus den richtigen Gründen das richtige Verhalten zeigt. Erst die Überprüfung der einzelnen Komponenten kann dies zeigen.

Aufgrund der Zuverlässigkeit und Einfachheit wurde 3-PG auch als Komponente in andere, komplexere Modelle integriert (z.B. Dye 2005, Paul et al 2006, Seidl et al 2007), die Vorhersagen über die Kohlenstoffbilanz und/oder die Wasserbilanz machen. Umgekehrt können auch in 3-PG Modelle integriert werden, um Prozesse zu berechnen, die von 3-PG im Normalfall nicht simuliert werden. Zum Beispiel wurde von Xenakis et al (2008) die in 3-PG sehr einfach gehaltene Bodenfruchtbarkeitsbewertung durch ein Nährstoffumsatzmodell ersetzt.

Einschränkungen von 3-PG

Vor der Anwendung eines Modells ist es wichtig, sich seiner Grenzen bewusst zu sein. Bei 3-PG besteht die Annahme, dass die Bäume gleichmässig im Raum verteilt sind. So können beispielsweise in einem Mischbestand die Bäume verschiedener Arten nicht in abwechselnden Reihen oder in Gruppen gemischt werden. Es ist auch kein Ziel des Modells, die Verjüngung einzelner Baumarten zu untersuchen. Dafür eignen sich andere Modelle, die in dieser Schwerpunktschleife beschrieben sind, zum Beispiel ForClim (Bugmann & Huber 2020) oder SwissStandSim (Zell et al 2020).

3-PG modelliert die Auswirkungen der Bodenfruchtbarkeit auf das Waldwachstum sehr vereinfacht. Im Gegensatz zur allgemeingültigen Wasser- und Lichtdynamik unterscheidet sich die Nährstoffdynamik je nach Bodenart. Es gibt daher keine allgemeinen Nährwertmodelle, die für viele Bodenarten oder Klimazonen funktionieren oder mehrere wichtige Nährstoffe enthalten (z.B. Stickstoff, Phosphor, Kalium). Die derzeit beste Lösung dürfte die Verknüpfung von 3-PG mit einem geeigneten Bodennährstoffmodell sein (Xenakis et al 2008).

Die Verwendung von Daten mit monatlichen Zeitschritten schränkt die Fähigkeit des Modells ein, den Zeitpunkt phänologischer Ereignisse und hydrologischer Prozesse abzuschätzen, da diese über kürzere Zeiträume auftreten. Almeida & Sands (2016) ergänzten 3-PG deshalb mit einer detaillierteren Bodenwasserbilanz, die tägliche Klimadaten verwen-

det. Die Anwendung dieses Modells erfordert aber zusätzliche Informationen über bodenphysikalische Eigenschaften und erhöht die rechnerischen Anforderungen markant.

Schlussfolgerungen

Die weitverbreitete Nutzung des Modells 3-PG in vielen Regionen der Welt zeigt, dass es sowohl in der Praxis als auch in der Forschung als zuverlässig und nützlich eingeschätzt wird. In der Schweiz hat es das Potenzial, die Lücke zu schliessen zwischen empirischen Modellen zur Betrachtung aktueller oder vergangener Bedingungen und physiologischen, prozessbasierten Modellen, die mit hoher Auflösung eine Fülle von Informationen zur Verfügung stellen, über längere Zeiträume aber nur schwer anwendbar sind.

Neue Entwicklungen in der Parametrisierung erleichtern die Bestimmung der Parameter nicht nur von Baumarten, sondern auch von Provenienzen. Mit der vor Kurzem erfolgten Übersetzung des 3-PG-Modells in die R-Sprache wird es vielseitig in Verbindung mit Fernerkundungsdaten, Parametrisierungssoftware und Validierungsdaten verwendet werden können. ■

Eingereicht: 4. Oktober 2019, akzeptiert (mit Review): 2. April 2020

Dank

Wir danken Brigitte Rohner und Meinrad Abegg für die Bereitstellung der LFI-Daten und Patricia Kälin für die Überarbeitung des Textes. Wir danken auch Dirk Schmatz und MeteoSchweiz für die Bereitstellung der DAYMET-Daten und der meteorologischen Daten für die räumliche Interpolation.

Literatur

- ALMEIDA AC, SIGGINS A, BATISTA TR, BEADLE C, FONSECA ET AL (2010) Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. For Ecol Manage 259: 1730–1740.
- ALMEIDA AC, SANDS PJ (2016) Improving the ability of 3-PG to model the water balance of forest plantations in contrasting environments. Ecohydrology 9: 610–630.
- BADOUX E (1983) Ertragstabellen für die Fichte in der Schweiz. Birmensdorf: Eidgenöss. Forschungsanstalt WSL.
- BATTAGLIA M, ALMEIDA AC, O'GRADY AP, MENDHAM D (2007) Process-based models in Eucalyptus plantation management: reality and perspectives. Cideu 3: 189–205.
- BATTAGLIA M, SANDS P, WHITE D, MUMMERY D (2004) CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. For Ecol Manage 193: 251–282.
- BUGMANN H, HUBER N (2020) Entwicklung von Mischbeständen mit komplexer Struktur im Klimawandel. Schweiz Z Forstwes 171: 133–141. doi: 10.3188/szf.2020.0133

- CH2018 (2018) CH2018 – Climate scenarios for Switzerland. Technical Report. Zurich: National Centre for Climate Services. 271 p.
- COOPS NC, MORSORDORF F, SCHAEPMAN ME, ZIMMERMANN NE (2013) Characterization of an alpine tree line using airborne LiDAR data and physiological modeling. Glob Chang Biol 19: 3808–3821.
- DUURSMA RA, MEDLYN BE (2012) MAESPA: a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO₂] × drought interactions. Geosci Model Dev 5: 919–940.
- DYE P (2005) Final Report: A new decision support software tool for tree growers and water resource managers: Harnessing physiological information to improve productivity and water use assessment of forest plantations. Pretoria: National Research Foundation, Innovation Fund Project 23407. 57 p.
- FORRESTER DI (2014) The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. For Ecol Manage 312: 282–292.
- FORRESTER DI, TANG X (2016) Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. Ecol Model 319: 233–254.
- FORRESTER DI, AMMER C, ANNIGHÖFER PJ, AVDAGIC A, BARBEITO I ET AL (2017A) Predicting the spatial and temporal dynamics of species interactions in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* forests across Europe. For Ecol Manage 405: 112–133.
- FORRESTER DI, TACHAUER IHH, ANNIGHÖFER P, BARBEITO I, PRETZSCH H ET AL (2017B) Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. For Ecol Manage 396: 160–175.
- 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.
- GONZALEZ-BENECKE CA, JOKELA EJ, CROPPER JR WP, BRACHO R, LEDUC DJ (2014) Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliotii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. For Ecol Manage 327: 55–75.
- GUPTA R, SHARMA LK (2019) The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: a review. Ecol Model 397: 55–73.
- LANDSBERG J, SANDS P (2011) The 3-PG process-based model. In: Landsberg J, Sands P, editors. Physiological ecology of forest production: Principles, processes and models. Amsterdam: Elsevier. pp. 241–282.
- 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.
- MATHYS AS, COOPS NC, WARING R (2017) An ecoregion assessment of projected tree species vulnerabilities in western North America through the 21st century. Glob Chang Biol 23: 920–932.
- MONTEITH JL (1965) Evaporation and environment. In: Fogg GA, editor. The state and movement of water in living organisms. London: Academic Press, Symposia of the Society for Experimental Biology 19. pp. 205–234.
- PAUL K, POLGLASE P, SNOWDON P, THEIVEYANATHAN T, RAISSON J, GROVE T, RANCE S (2006) Calibration and uncertainty analysis of a carbon accounting model to stem wood density and partitioning of biomass for *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata*. New Forests 31: 513–533.
- PENMAN HL (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc R Soc Lond (A) 193: 120–145.

- PRETZSCH H, FORRESTER DI, RÖTZER T (2015) Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecol Model* 313: 276–292.
- SANDS P (2004) Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. Hobart: CRC for Sustainable Production Forestry, Technical Report 141. 35 p.
- SANDS PJ, LANDSBERG JJ (2002) Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. For *Ecol Manage* 163: 273–292.
- 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.
- THORNTON PE, RUNNING SW, WHITE MA (1997) Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *J Hydrol* 190: 214–251.
- THÜRIG E, BUGMANN H (2020) Modelle? Brauche ich nicht. Modellieren? Tue ich nicht – oder vielleicht doch? *Schweiz Z Forstwes* 171: 110–115. doi: 10.3188/szf.2020.0110
- TROTSIUK V, HARTIG F, CAILLERET M, BABST F, FORRESTER DI ET AL (2020) Assessing the response of forest productivity to climate extremes in Switzerland using model-data fusion. *Glob Chang Biol* 26: 2463–2476.
- WARING RH, LANDSBERG JJ, WILLIAMS M (1998) Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production. *Tree Physiol* 18: 129–134.
- XENAKIS G, RAY D, MENCUCINI M (2008) Sensitivity and uncertainty analysis from a coupled 3-PG and soil organic matter decomposition model. *Ecol Model* 219: 1–16.
- YODA K, KIRA T, OGAWA H, HOZAMI K (1963) Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *J Biol Osaka City Univ* 14: 107–129.
- 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

- WSL (2018) Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Datenlieferung vom 2. Februar 2018 zu den Erhebungen 1983/85 (LFI1), 1993/95 (LFI2), 2004/06 (LFI3) und 2009/17 (LFI4) durch Brigitte Rohner und Meinrad Abegg. Birmensdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL.

3-PG: un modèle physiologique de croissance forestière

Les tables de production ont été les premiers modèles de croissance forestière développés en Europe. Ces modèles empiriques ne sont pas adaptés à une application dans des conditions climatiques futures, à des peuplements mixtes ou à l'estimation des effets de nouveaux systèmes sylvicoles. Au cours des dernières décennies, des alternatives aux tables de production ont été développées, y compris des modèles basés sur les processus qui peuvent également représenter des conditions en dehors des données observées. Ces modèles prennent en compte les données de croissance, mais leurs formulations sont principalement basées sur les principes physiologiques et allométriques de la croissance des plantes. Cette famille de modèles comprend le 3-PG (Physiological Processes Predicting Growth), qui a été développé en Australie et en Amérique du Nord pour les peuplements purs équiens de feuillus à feuilles persistantes et de conifères. Un développement récent (version 3-PG_{mix}) permet de simuler les interactions entre des arbres de tailles, d'âges et d'essences différents. L'article décrit le modèle, qui se compose de six sous-modèles et, malgré sa base physiologique, fournit des paramètres qui sont d'une grande importance pour la sylviculture pratique. Deux exemples d'applications du modèle 3-PG pour la Suisse sont présentés. Le premier exemple montre le changement de croissance dans les peuplements mixtes de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et de hêtre (*Fagus sylvatica*) en raison du changement climatique. Il est démontré que la croissance du hêtre est beaucoup plus limitée par l'augmentation de la sécheresse que celle du pin sylvestre, qui est également limité par la sécheresse, mais qui bénéficie en même temps de la moindre pression concurrentielle du hêtre. Dans le deuxième exemple, le 3-PG est utilisé pour quantifier le stress climatique pour le hêtre en fonction des caractéristiques des stations dans toute la Suisse. Ces deux exemples montrent que le 3-PG fournit des informations stationnelles spécifiques sur la façon dont la dynamique de la croissance des forêts est influencée par le climat, la composition en essences et la sylviculture.

3-PG: a physiological forest growth model

Empirical models such as yield tables were some of the first forest growth models developed in Europe. However, these empirical models are unsuitable for application under future climatic conditions, for mixed stands or for estimating the effects of new silvicultural systems. In recent decades, alternatives have been developed, including process-based models that can also represent conditions outside of the currently observed data. Such models are mostly based on physiological and allometric principles of plant growth. One example is 3-PG (Physiological Processes Predicting Growth), which was developed in Australia and North America for pure and even-aged stands of evergreen broadleaved and coniferous trees. In a recently developed version (3-PG_{mix}), interactions between trees of different sizes, ages and species can be simulated. The article describes the model, which consists of six submodels, and some of the outputs that are of great importance for practical forestry. Two examples of applications of 3-PG for Switzerland are presented. The first example shows the change in growth in mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*) due to climate change. The growth of beech is much more restricted by increased drought than that of Scots pine, which is also restricted by drought, but at the same time benefits from the lower competitive pressure from beech. In the second example, 3-PG is used to quantify the climatic stress for beech as a function of site characteristics throughout Switzerland. Both examples show that 3-PG provides site-specific information on how forest growth dynamics are influenced by climate, species composition and silviculture.