

Kritische Überprüfung und Weiterentwicklung des Konzepts der forstlichen Standortproduktivität

Hans-Peter Kahle,
Professur für Waldwachstum und Dendroökologie, Institut für Forstwissenschaften,
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Summary

The assessment, evaluation and projection of the amount of wood that can be produced on a certain site with a given tree species or stand management regime has been in the focus of scientifically based forest growth and yield studies from the very beginning. The straightforward way to assess forest site productivity retrospectively is to measure the amount of wood that has been produced per unit stand area and unit time. However, since over time some of the wood will be transformed, e.g. lost through mortality and subsequent decomposition or extracted from a forest stand by intermediate or harvest cuttings, the amount of standing wood does not represent the full amount of wood which has been produced in the stand. Hence direct measurement is a tedious task, and maintenance of long-term forest research plots is necessary to systematically collect the data necessary for capturing forest site productivity.

In this review the concept of forest site productivity is revisited. The relevance and meaning of different productivity potentials in the context of forest site productivity assessment, evaluation and projection is discussed. Suggestions are made to differentiate between the role of site- and the role of stand-related factors on forest site productivity. Linkages between terms and concepts used in management-oriented and ecological approaches of forest site productivity assessment are provided.

Zusammenfassung

Die Bestimmung, Bewertung und Vorhersage der Menge an Holz die auf einem bestimmten Standort mit einer bestimmten Baumart bei einer bestimmten waldbaulichen Behandlung pro Zeit- und Flächeneinheit erzeugt werden kann, ist eine zentrale Aufgabe der waldwachstumskundlichen Forschung seit ihrer Entstehung. Langfristig beobachtete, nach einem standardisierten Protokoll behandelte, periodisch aufgenommene und ausgewertete waldwachstumskundliche Versuchsflächen stellen die Grundlage dar für die direkte retrospektive Bestimmung der forstlichen Standortproduktivität. Eine wichtige Voraussetzung für die Bewertung der Standortproduktivität ist die Kenntnis des Produktivitätspotenzials, also der unter bestimmten Bedingungen und Voraussetzungen zu erwartenden maximalen Produktivität. Eine belastbare Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Standortproduktivität setzt die Kenntnis der Wirkungszusammenhänge und Faktoren welche die Standortproduktivität bedingen voraus.

Angesichts von Veränderungen der natürlichen, ökonomischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen sowie technologischer Innovationen ist eine kritische Überprüfung des Entwurfs der forstlichen Standortproduktivität angebracht, und eine kompatible Weiterentwicklung des Konzepts notwendig. In dem Beitrag werden die direkten und indirekten Verfahren zur Bestimmung bzw. Einschätzung der forstlichen Standortproduktivität dargestellt und die Grundlagen des derzeitigen Konzepts kritisch durchleuchtet. Es wird ein weiterentwickeltes Konzept vorgestellt, welches die spezifische Bedeutung des Standorts, der Baumart, des Bestandes und der Standort-Baum-Bestand-Interaktionen für die forstliche Standortproduktivität berücksichtigt, und auf dessen Grundlage Änderungen relevanter Komponenten und deren Auswirkungen auf die forstliche Standortproduktivität besser abgebildet werden können.

Forstliche Standortproduktivität

Im ökologischen Kontext wird die *Produktivität von Wäldern* als die Nettobiomasseproduktion eines Waldbestandes pro Flächen- und Zeiteinheit definiert. Die Produktivität hängt von der Strahlungsabsorption durch die Blätter und der Umwandlung der Strahlungsenergie in chemisch gebundene Energie in Form von Kohlehydraten durch die Photosynthese, abzüglich der autotrophen und heterotrophen Atmungsverluste, ab (CANNELL 1989; LANDSBERG & SANDS 2011, vgl. Abb. 1). Im Bewirtschaftungskontext bezieht sich *forstliche Produktivität* auf die inhärente Fähigkeit von Wäldern, Güter oder Leistungen

entsprechend der Zielsetzung ihrer Bewirtschaftung zu erzeugen oder zu erbringen und bereitzustellen. Dies können Produkte wie Biomasse, Fasern oder Nahrungsmittel oder Leistungen wie die Wasser- oder Klimaregulation, der Bodenschutz oder der Schutz von Biodiversität oder die Erbringung von kulturellen Werten z.B. bei der Erholungsnutzung sein.

Während die *forstliche Produktivität* (engl. forest productivity) größere räumliche Einheiten auf Landschaftsebene, z.B. ganze Ökosysteme oder Betriebseinheiten einschließt, bezieht sich die *forstliche Standortproduktivität* (engl. forest site productivity) auf einen ganz bestimmten Standortstyp (in der gängigen Anwendung wird der Begriff auch für Teile von Waldbeständen oder für einzelne Waldbestände verwendet). Betrachtet man die Produktionsfunktionen der Wälder, ist forstliche Standortproduktivität im engeren Sinne definiert als quantitatives Maß für die Fähigkeit eines Waldstandorts, pflanzliche Biomasse zu produzieren. Die forstliche Standortproduktivität hängt sowohl von natürlichen, dem Standort und Bestand innewohnenden Faktoren, als auch von Bewirtschaftungsfaktoren ab (ASSMANN 1970; DYCK et al. 1994; HÄGGLUND 1981).

Häufig wird der Begriff 'Standortqualität' (engl. site quality) synonym für 'forstliche Standortproduktivität' (engl. site productivity) verwendet, dies ist vor allem in der englischsprachigen Literatur der Fall (SOCIETY OF AMERICAN FORESTERS 2014). Da Qualität im begrifflichen Gegensatz zu Quantität steht, und auch eine Art nichtmetrischer Messung suggeriert, ist der Begriff forstliche Standortproduktivität zu bevorzugen (LEARY 1985).

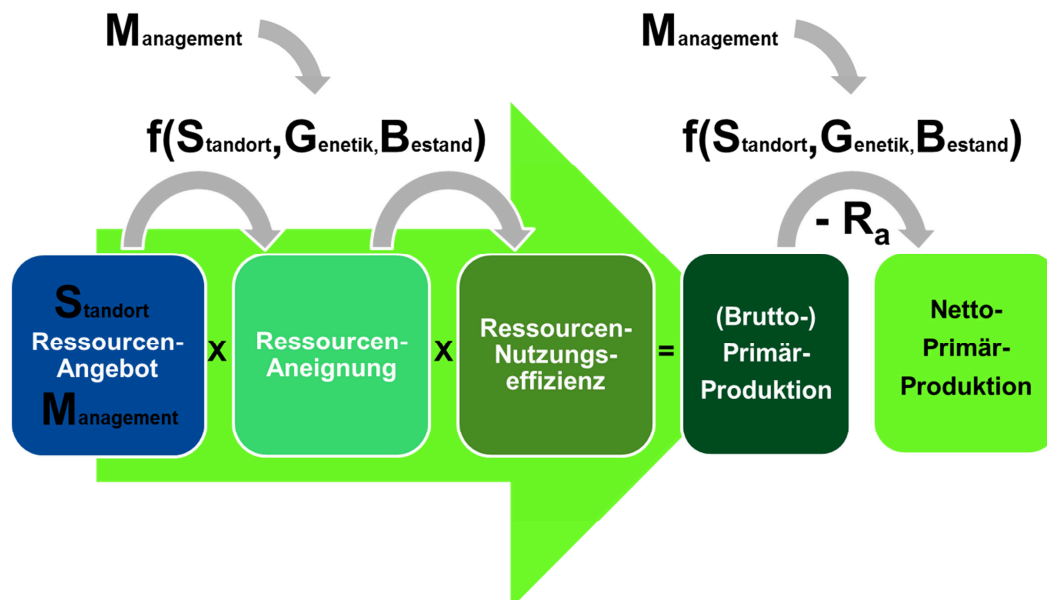


Abbildung 1: Flussdiagramm der produktionsökologischen Grundgleichung zur Darstellung der Primärproduktion in Waldbeständen unter dem Einfluss von Standort, Genetik, Bestand und der Modifikation des Produktionsprozesses durch Maßnahmen der Waldbewirtschaftung (R_a : autotrophe Respiration) (verändert nach MONTEITH 1981).

In Abbildung 1 ist die produktionsökologische Grundgleichung als Flussdiagramm dargestellt (vgl. MONTEITH 1981). Gezeigt ist die Primärproduktion in Waldbeständen unter dem Einfluss von Standort, Genetik, Bestand und der Modifikation des Produktionsprozesses durch Maßnahmen der Waldbewirtschaftung. Die Darstellung im uni-direktionalen Flussdiagramm folgt dem Konzept der Ressourcenlimitierung der Primärproduktion, eine mögliche Rückkopplung von der rechten auf die linke Seite der Produktionsgleichung, entsprechend dem Konzept der Wachstumslimitierung, ist in Abbildung 1 nicht enthalten (siehe jedoch Abb. 2). Am Beispiel Strahlung entspricht die auf der Bestandesoberfläche eintreffende Strahlungsmenge dem Ressourcenangebot, die von den Assimilationsorganen absorbierte Strahlungsenergie entspricht der Ressourcenaneignung, und der Output an chemisch gebundener Energie in den Assimilaten je absorbiertes Strahlungseinheit entspricht der Ressourcennutzungseffizienz.

Abbildung 2 zeigt die Regulation der Primärproduktion als Prozessdiagramm. Die Primärproduktion ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von Photosynthese in den Assimilationsorganen und Wachstum in den Meristemen. Im Gleichgewichtszustand sind beide Teilprozesse gekoppelt und fein aufeinander abgestimmt. Regelt die Photosynthese die Primärproduktion spricht man von *Quellenlimitierung* (syn.

Ressourcenlimitierung), regelt das Wachstum spricht man von *Senkenlimitierung* (syn. *Wachstumslimitierung*) (KÖRNER 2012). Bei Unterversorgung mit Strahlungsenergie oder CO₂ liegt Quellenlimitierung vor, bei Unterversorgung mit O₂ kommt es zur Senkenlimitierung. In allen anderen Fällen ist wegen der gegenseitigen Überlagerung der Effekte, alleine anhand der Produktionsrate keine eindeutige Aussage über die Hierarchie der Regelmechanismen möglich.

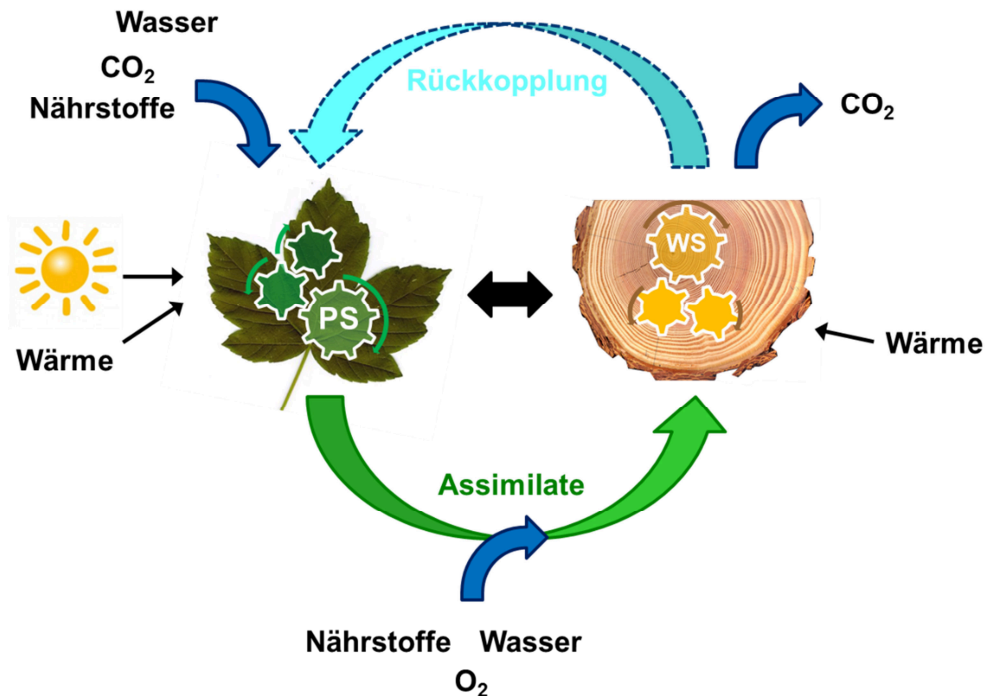


Abbildung 2: Regulation der Primärproduktion. Die Primärproduktion ist das Ergebnis des Zusammenwirkens von Photosynthese in den Assimilationsorganen (PS) und Wachstum in den Meristemen (WS) (verändert nach KÖRNER 2008).

In den letzten Jahren wurden in der wissenschaftlichen Literatur mehrere systematische Übersichten zur Bedeutung, geschichtlichen und modernen Entwicklung und zu Hintergründen der forstlichen Standortproduktivität verfasst (BONTEMPS & BOURIAUD 2014; PRETZSCH 2009; SKOVSGAARD & VANCLAY 2008 und 2013; WEISKITTEL et al. 2011). Diese Veröffentlichungen stellen einen wichtigen Hintergrund für die vorgelegte Studie dar.

Maßeinheiten der forstlichen Standortproduktivität

Im Kontext der Holzproduktion ist die übliche Maßeinheit der forstlichen Standortproduktivität das auf einer bestimmten Fläche und in einem bestimmten Zeitraum produzierte Holzvolumen (z.B. m³ Holz je Hektar und Jahr) (ASSMANN 1970). Das produzierte Holzvolumen, der Holzertrag, bezieht sich meist auf ein 'verwertbares' bzw. 'handelsübliches' Holzvolumen, das regelmäßig bei den monopodialen Nadelbäumen das Stammholzvolumen bzw. bei den Laubbäumen das Stamm- und Astholzvolumen oberhalb eines bestimmten Durchmesserwellenwertes umfasst. Im deutschsprachigen Raum liegt der Schwellenwert (die sog. Kluppschwelle) des oberirdischen Holzes meist bei ≥ 7 cm mit Rinde (das sog. Derbholz) (PRETZSCH 2009). In anderen Ländern werden unterschiedliche Schwellenwerte angewendet (FAO 2010). Das auf diese Weise definierte Derbholzvolumen beinhaltet folglich nur einen Teil der in Wäldern produzierten Biomasse. Das Volumen des Holzes mit einem Durchmesser unterhalb der Kluppschwelle, das Volumen von Nichtholz- und Nichtbaum-Komponenten sowie die unterirdischen Biomasse-Komponenten werden mit dem so definierten Derbholzvolumen nicht erfasst. In einem ökologischen Kontext und auch im Kontext der Kohlenstoffbindung von Wäldern, ist es darüber hinaus üblich, die Produktivität nicht auf das produzierte Holzvolumen, sondern auf die produzierte Holzbiomasse zu beziehen. Anhand der Maßeinheit Biomasse ist eine direkte Ableitung der Nettoprimärproduktion und Berechnung der Menge an gebundenem Kohlenstoff möglich. Dies ist besonders beim Vergleich verschiedener Baumarten mit unterschiedlichen Holzdichten vorteilhaft.

Kenngrößen der forstlichen Standortproduktivität

Die Produktionsrate von Holz pro Flächen- und Zeiteinheit wird entweder als durchschnittlicher Zuwachs über ein bestimmtes Zeitintervall oder als laufender Zuwachs in einer bestimmten Zeiteinheit ausgedrückt (ASSMANN 1970; PRETZSCH 2009). In der Forstwirtschaft wird die produzierte Holzmenge meist auf das Holzvolumen bezogen, und als Zeiteinheit das Jahr gewählt. Entsprechend beziehen sich der durchschnittliche und der laufende Zuwachs auf den *durchschnittlichen jährlichen* (engl. mean annual increment, MAI) und den *laufenden jährlichen Zuwachs* (current annual increment, CAI). Der Zeitraum, für den der durchschnittliche Zuwachs berechnet wird, bezieht sich meist auf die Zeit ab der die Bäume begonnen haben zu wachsen bis zu einem festgelegten Bezugs- oder Referenzalter. Der *periodisch jährliche Zuwachs* (engl. periodic mean annual increment, PAI) dagegen bezeichnet die durchschnittliche jährliche Zuwachsrate während eines bestimmten Zeitintervalls. Dabei kann sich das Zeitintervall entweder auf eine bestimmte Altersspanne beziehen, z.B. Alter 15 bis 20 Jahre, oder auf einen bestimmten Zeitraum, z.B. Kalenderjahr 2005 bis 2010. Aus diesem Grund ist der periodisch jährliche Zuwachs auch für ungleichaltrige Wälder und in der Dauerwaldwirtschaft anwendbar, wo das Alter nicht bekannt ist oder für die Bewirtschaftung nicht relevant ist. In der Altersklassenwirtschaft findet in der Regel jedoch der durchschnittliche jährliche Zuwachs Anwendung.

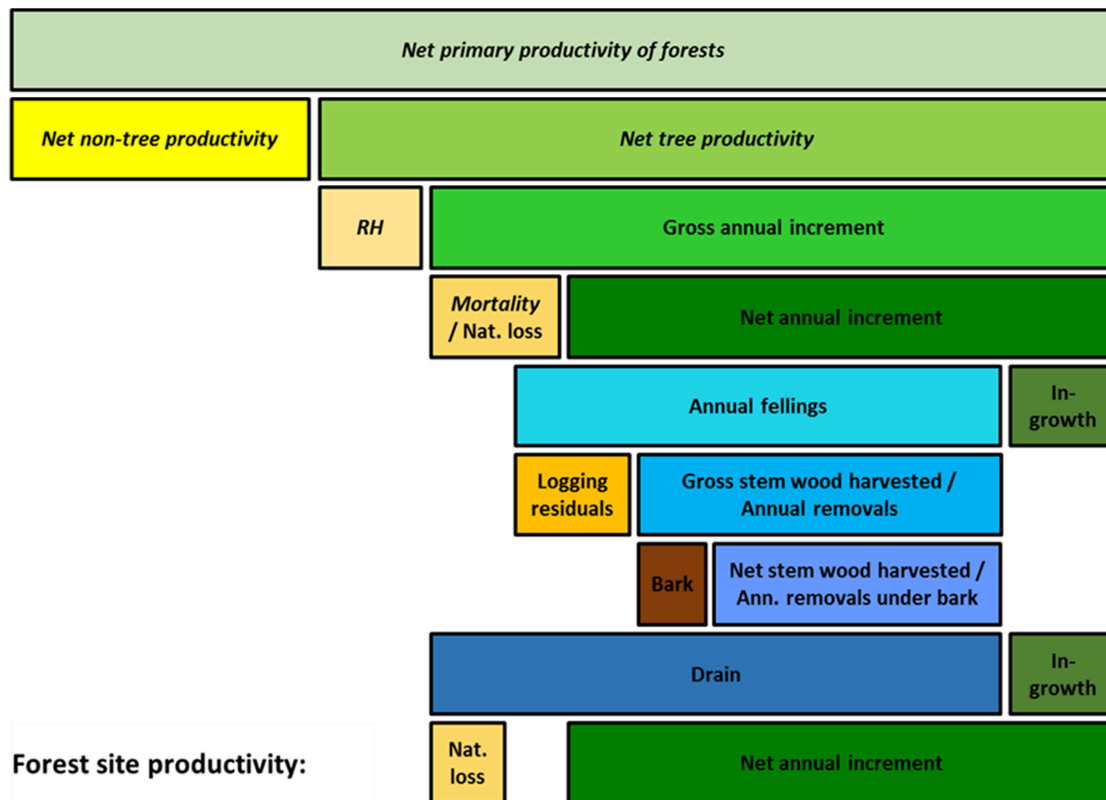


Abbildung 3: Komponenten der Produktivität von Wäldern und deren Zusammenhänge anhand der in der englischsprachigen Literatur verwendeten Begriffe. Oben sind die im ökologischen Kontext, unten die vor allem in der Altersklassenwirtschaft üblichen Komponenten und Begriffe dargestellt (verändert nach BEERS 1962; KUUSELA 1994; PRETZSCH 2009; UN-ECE & FAO 2000). In der Darstellung sind ausschließlich oberirdische Biomassekomponenten dargestellt. In kursiv bezeichnete Komponenten werden typischerweise in Biomasseeinheiten angegeben, die anderen in Volumeneinheiten. RH: Jährliche Rate der heterotrophen Respirationsverluste durch die Zersetzung kurzlebiger Baumbiomassekomponenten. Die forstliche Standortproduktivität schließt üblicherweise den jährlichen Nettoholzvolumenzuwachs, den jährlichen Einwuchs, sowie den jährlichen Verlust an Holzbiomassekomponenten oberhalb der Kluppschwelle durch natürlichen Abgang ein.

Für Wachstumskurven (Wachstum vs. Alter) mit sigmoidalem Verlauf besteht ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen und dem laufenden Zuwachs: der laufende jährliche Zuwachs hat sein Maximum an der Stelle an der die Wachstumskurve ihren Wendepunkt aufweist, und der durchschnittliche jährliche Zuwachs erreicht sein Maximum an der Stelle, an der sich die beiden Kurven des laufenden und des durchschnittlichen Zuwachses schneiden (ASSMANN 1970). Aus der Sicht

der Holzproduktion in der Altersklassenwirtschaft kann es sinnvoll sein, den Zeitpunkt der Kulmination des durchschnittlichen Zuwachses als Erntezeitpunkt festzulegen, da hierdurch die Holzproduktion maximiert wird.

Unterschiedliche Definitionen und Maßeinheiten der forstlichen Standortproduktivität erschweren Vergleiche zwischen verschiedenen Studien, dies gilt in besonderem Maße für Studien die von verschiedenen Forschungsdisziplinen durchgeführt wurden. Abbildung 3 zeigt Zusammenhänge zwischen verschiedenen Komponenten der Produktivität in Wäldern anhand der in der englischsprachigen Literatur verwendeten Begriffe. Im oberen Bereich des Blockdiagramms sind die im ökologischen Kontext verwendeten Begriffe, im unteren die vor allem in der Altersklassenwirtschaft üblichen Komponenten und Begriffe dargestellt.

Potenzielle forstliche Standortproduktivität

Der Begriff *forstliche Standortproduktivität* wird in zweierlei Hinsicht verwendet: die realisierte Produktivität und die vorhergesagte Produktivität. Während sich die *realisierte Produktivität* (syn. tatsächliche Produktivität) auf die gemessene oder geschätzte Produktivität auf einen zurückliegenden Zeitraum i.d.R. von der Bestandesbegründung bis zum Zeitpunkt der Produktivitätsermittlung bezieht (retrospektive Betrachtung), stellt die *vorhergesagte Produktivität* (syn. prognostizierte Produktivität) eine Projektion der forstlichen Standortproduktivität in die Zukunft dar (prospektive Betrachtung). Für beide Betrachtungsweisen gilt, dass sie von der Standort-Bestands-Konstellation ausgehen die zum Zeitpunkt der Produktivitätseinschätzung gegeben ist, dieser befindet sich für die retrospektive Betrachtung am Ende und für die prospektive Betrachtung am Anfang des betreffenden Produktionszeitraums. Die vorhergesagte Standortproduktivität wird dabei als eine potenzielle Standortproduktivität aufgefasst, eine Produktivität die unter bestimmten Annahmen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist. Die Begriffe 'potenzielle Standortproduktivität' und 'Produktivitätspotenzial' werden im Folgenden synonym verwendet.

Das Blockdiagramm in Abbildung 4 zeigt die Struktur und inneren Zusammenhänge der verschiedenen Konzepte der forstlichen Standortproduktivität. Die realisierte oder tatsächliche Standortproduktivität kann entweder direkt durch Messung oder indirekt durch Schätzung erfasst werden.

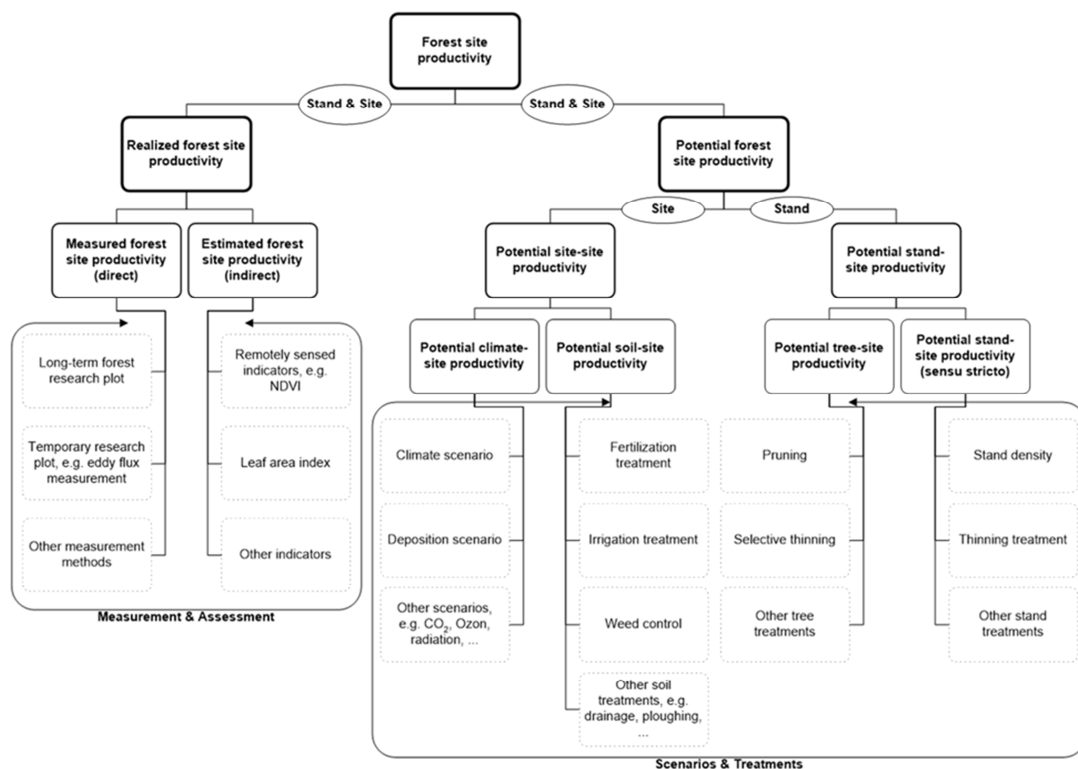


Abbildung 4: Darstellung der Struktur und inneren Zusammenhänge der verschiedenen Konzepte der forstlichen Standortproduktivität.

Die Messung der tatsächlichen forstlichen Standortproduktivität erfolgt traditionell auf langfristigen forstlichen Versuchsflächen durch periodisch wiederholte Erhebungen aller Bäume oberhalb der Klupp-

schwelle in einem Waldbestand, einschließlich der Registrierung und Messung von natürlichen Abgängen, der Entnahme, und von Einwuchs (NAGEL et al. 2012). Da sie reale Prozesse abbilden, sind Daten von solchen langfristigen Waldversuchs-flächen für die Bildung von Prognosemodellen unersetzlich. Sie sind für die Produktivitätseinschätzung darüber hinaus besonders wertvoll, weil sie i.d.R. lange Beobachtungszeiträume abdecken (oft mehrere Jahrzehnte oder mehr als ein Jahrhundert), und damit langfristige Entwicklungen abbilden die wegen des mangelhaften Verständnisses gerade dieser langfristigen Systemdynamiken, von Prognosemodellen - beispielsweise von prozess-basierten Modellen - bislang nur unzureichend nachgezeichnet werden können. Allerdings fehlt es den historischen langfristigen Studien zur forstlichen Standortproduktivität oft an dem für quantitative Untersuchungen der Ursache-Wirkungsbeziehungen notwendigen systematischen Versuchsansatz. Viele Forschungsarbeiten zu den Auswirkungen intrinsischer Standortfaktoren oder zu den Effekten von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Standortproduktivität basieren auf einem Fallstudienansatz und sind, aus heutiger Sicht, auf thematisch eng begrenzte, spezifische Fragen fokussiert.

Theoretisch können moderne turmbasierte Fluss-Messungen, wie die Eddy-Kovarianz-Methode, auch zur Messung der forstlichen Standortproduktivität eingesetzt werden, vorausgesetzt, dass notwendige Begleitinformationen zu einzelnen Komponenten der Standortproduktivität durch ergänzende Messungen erhoben werden (CHAPIN et al. 2006; CLARK et al. 2001; LORENZ 2013). Die Anwendung dieser Messtechniken ist jedoch relativ jung, so dass bislang noch keine langfristigen, kontinuierlichen und umfassenden Messungen dieser Art vorliegen.

Durch die fernerkundungsgestützte Erhebung und Überwachung von Proxy-Variablen, wie z.B. den Vegetationsindices Normalized difference vegetation index (NDVI) und Leaf area index (LAI), die in einem funktionalen Zusammenhang zu dem Prozess der forstlichen Produktion stehen, werden zunehmend Daten bereit-gestellt, die zur qualifizierten Schätzung der forstlichen Standortproduktivität verwendet werden können. Jedoch gilt auch in diesem Fall, dass die Daten validiert und durch Feldmessungen ergänzt werden müssen, um zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen (ZHANG et al. 2012).

Arten von Produktivitätspotenzialen

Die Annahmen die der Abschätzung eines Produktivitätspotenzials zu Grunde liegen, und damit auch die Größe des Produktivitätspotenzials selbst hängen stark davon ab, in welchem Kontext die Prognose stattfindet. So spielen bei bewirtschaftungsorientierten Fragestellungen neben ökologischen Aspekten auch ökonomische, technische und soziale Aspekte eine Rolle.

In Abbildung 5 sind verschiedene, im Zusammenhang mit der Biomasseproduktion verwendete Potenzialarten dargestellt (modifiziert nach: WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG 2010). Das *theoretische Potenzial* beschreibt die bio-physikalische Obergrenze der Biomasseproduktion. Es wird durch Faktoren bestimmt, die nach dem augenblicklichen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis nicht verändert werden können. Das *biologische Potenzial* hingegen ist das unter Berücksichtigung von realen Produktivitätseinschränkungen theoretisch realisierbare Potenzial. Reale Produktivitätseinschränkungen können sich ergeben aufgrund der an einem gegebenen Standort eingeschränkten Bereitstellung der für die Primärproduktion notwendigen Bedingungen und Ressourcen oder aufgrund der beschränkten Wachstumseffizienz eines gegebenen Waldbestandes. Je nachdem ob, und wenn ja,

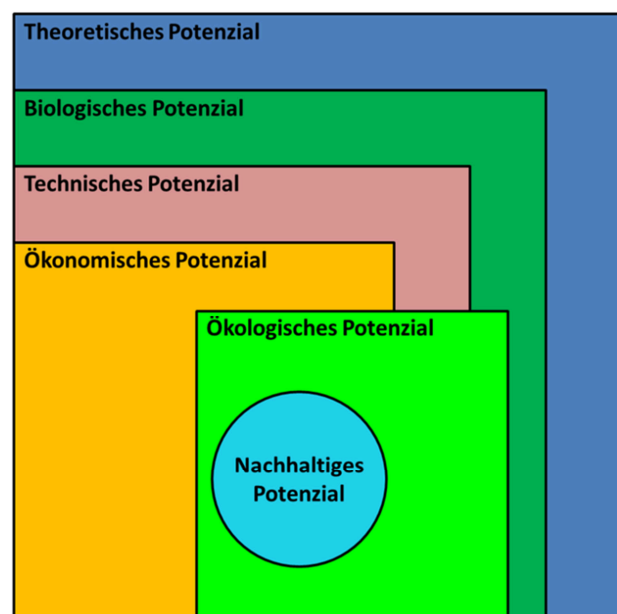


Abbildung 5: Darstellung verschiedener Potenzialarten und deren Zusammenhang

in welchem Ausmaß mögliche Produktionsrisiken in die Abschätzung des biologischen Potenzials einbezogen und berücksichtigt werden, handelt es sich um eher optimistische oder eher pessimistische Prognosen.

Das *technische Potential* ist eine Teilmenge des biologischen Potenzials, es beschreibt das durch die angewendete Technologie in Kombination mit den natürlichen Restriktionen begrenzte Nutzungspotenzial. Die Kriterien zur Bewertung der technologischen Einschränkungen orientieren sich an der technischen Machbarkeit nach derzeitigem Entwicklungsstand. Das *ökonomische Potenzial* kennzeichnet jenen Anteil des technischen Potenzials, der zu ökonomisch vertretbaren Bedingungen genutzt werden kann. Das *ökologische Potenzial* wiederum ist der Anteil des biologischen Potenzials der ökologischen Kriterien genügt, d.h. das Potenzial, das ohne irreversible, nicht-kompensierbare Schäden an der Struktur und Funktionsweise der jeweiligen Ökosysteme (z.B. Verlust der biologischen Vielfalt, Bodenerosion) realisiert werden kann. Schließlich ist das *nachhaltige Potenzial* das unter Berücksichtigung sämtlicher ökologischer, wirtschaftlicher und sozialer Dimensionen der Nachhaltigkeit nutzbare Potenzial. Typischerweise wird zur Bewertung des nachhaltigen Potenzials eine Reihe von ökologischen und sozio-ökonomischen Indikatoren herangezogen.

Produktivitätspotenziale in Wäldern

In diesem Abschnitt werden die im Kontext der Biomasseproduktion in Wäldern relevanten und im Zusammenhang mit der forstlichen Standortproduktivität wichtigsten Potenzialarten präzisiert und deren Zusammenhänge aufgezeigt. Das Ziel besteht darin, eine einheitliche Grundlage für ein Konzept der forstlichen Standortproduktivität zu schaffen.

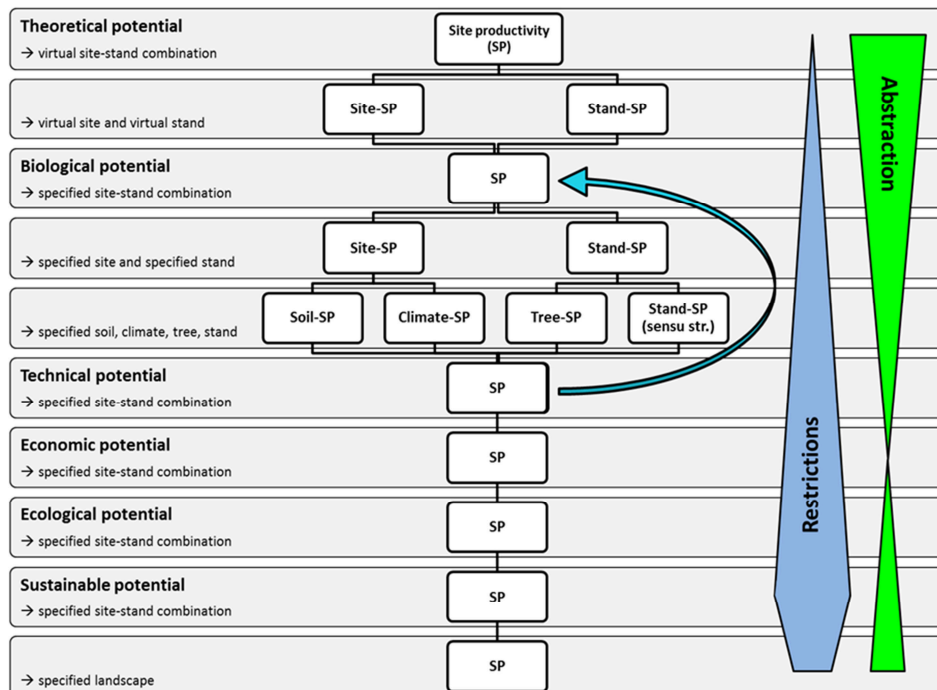


Abbildung 6: Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Arten der Produktivitätspotenziale und den verschiedenen Begriffen der forstlichen Standortproduktivität. Die Produktivitätspotenziale sind durch den Grad ihrer Determiniertheit (virtuell bzw. bestimmt; links) und durch ihren Objektbezug (Standort, Bestand, Standort-Bestand-Kombination, Landschaft; Mitte) definiert. Der gebogene Pfeil deutet die Möglichkeit an, das biologische Potenzial durch Bewirtschaftungsmaßnahmen zu verändern. Die Formen auf der rechten Seite symbolisieren das Ausmaß zu dem bei der jeweiligen Potenzialart reale Produktionsbeschränkungen berücksichtigt sind (blau), bzw. den zu der jeweiligen Potenzialart korrespondierenden Abstraktionsgrad (grün). Der Grad der Berücksichtigung von Produktionsbeschränkungen ist bei der Abschätzung des nachhaltigen Potenzials für spezifische Standort-Bestandes-Kombinationen am größten. Auf Landschaftsebene ist dieser, wegen der mit der Hochskalierung einhergehenden Kompensationsmechanismen, verringert. Der geringste Abstraktionsgrad ist beim wirtschaftlichen Potenzial gegeben.

Das theoretische Potenzial der forstlichen Standortproduktivität

Das theoretische Potenzial der forstlichen Standortproduktivität beschreibt die bio-physikalische Obergrenze der Holzproduktion in Waldbeständen. Dies ist ein hypothetisches, maximales Potenzial, das sich auf eine virtuelle Standort-Bestandes-Kombination bezieht, und keine spezifisch für einen bestimmten Standort oder einen bestimmten Waldbestand gültigen Produktivitätseinschränkungen berücksichtigt. Das theoretische Potenzial der forstlichen Standortproduktivität kann in zwei Komponenten zerlegt werden, das *standortbezogene Potenzial* und das *bestandes-bezogene Potenzial* (Abb. 6).

Der Unterschied zwischen beiden erklärt sich durch die verschiedene Sichtweise auf die Biomasseproduktion: während das standortbezogene Potenzial der forstlichen Standortproduktivität durch eine ressourcenzentrierte Sichtweise auf der Grundlage eines virtuellen Standorts gekennzeichnet ist, ist das bestandesbezogene Potenzial durch eine wachstumszentrierte Sichtweise auf der Grundlage eines virtuellen Waldbestands gekennzeichnet.

Nach rein theoretischer Erwägung kann folglich eine hypothetische, maximale forstliche Standortproduktivität (i) für einen virtuellen Standort unter der Annahme eines darauf stockenden virtuellen Waldbestandes maximaler Produktivität (theoretisches standortbezogenes Potenzial), oder (ii) für einen virtuellen Waldbestand auf einem Standort maximaler Produktionskapazität (theoretisches bestandesbezogenes Potenzial) formuliert werden. Dies ist ein hypothetisches Konzept, da die Annahmen bezüglich unbegrenzter Kapazität des Standorts (d.h. fehlende Ressourcenlimitierung, vgl. Abb. 2) und des Waldbestandes (d.h. fehlende Wachstumslimitierung) nicht der Realität entsprechen und spekulativ sind. Während die Bedingungen des theoretischen Potenzials hypothetisch sind, befinden sich die den betrachteten Wachstumsprozessen zugrundeliegenden Annahmen innerhalb des Raumes des bio-physikalisch Möglichen, denn im Kontext der forstlichen Produktion ist die Prämisse des bio-physikalisch Möglichen, untrennbar mit dem Prozess der Primärproduktion verbunden. Daher kann auch die Höhe des hypothetischen, maximalen Potenzials nicht unabänderlich festgelegt werden, sondern ist abhängig von den getroffenen Annahmen und dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis, v.a. in der Biophysik und der Ökophysiologie.

Im Zusammenhang mit der forstlichen Standortproduktivität wichtige, produktivitätsbestimmende Eigenschaften von Bäumen sind (i) die Fähigkeit, Ressourcen aufzunehmen und zu erwerben, (ii) die Effizienz, Ressourcen für die Photosynthese zu nutzen, und (iii) die Aufteilung und Allokation der Biomasse auf (Stamm-)Holzkompartimente (vgl. Abb. 1) (BINKLEY et al. 2004; CANNELL 1989; INGESTAD & ÅGREN 1992; LANDSBERG & GOWER 1997; POWERS 2001). Letzteres ist besonders wichtig, da sich die forstliche Standortproduktivität auf die akkumulierte Nettoprimärproduktion der oberirdischen Holzbiomasse (mittel- bis langfristige Kohlenstoffspeicher) und weniger auf die Nettoprimärproduktion von Biomasse in Wäldern im Allgemeinen (einschließlich der kurzfristigen Kohlenstoffspeicher) bezieht (PRETZSCH 2009).

Das biologische Potenzial der forstlichen Standortproduktivität

Im Gegensatz zu dem theoretischen Potenzial schließt das biologische Potenzial der forstlichen Standortproduktivität standorts- und bestandesbezogene Produktivitätseinschränkungen mit ein. In der allgemeinen Formulierung bezieht sich das biologische Potenzial auf eine bestimmte Standort-Bestandes-Kombination (Abb. 6). Entsprechend kann das biologische Potenzial untergliedert werden in ein Standortpotenzial und in ein Bestandespotenzial. Während das *biologische Standortpotenzial* die potenzielle Produktivität eines bestimmten Standorts unter der Annahme eines darauf stockenden idealen Bestandes beschreibt, stellt das *biologische Bestandespotenzial* das Potenzial eines bestimmten Bestandes auf einem idealen Standort dar. Dabei bezieht sich die Prämisse eines 'idealen Bestandes' auf ideale Bestandesbedingungen, d.h. Bedingungen ohne bestockungs- oder störungs-bedingte Produktivitätseinschränkungen. Entsprechend ist die Prämisse eines 'idealen Standorts' durch ideale Standortbedingungen gekennzeichnet, d.h. Bedingungen ohne Einschränkungen durch Standortveränderungen, Extremereignisse oder Störungen. In beiden Fällen bezieht sich 'ideal' auf optimale Bedingungen für die Holzproduktion.

Das biologische Standortpotenzial wird durch die gegebenen Standortfaktoren und Standortbedingungen eingeschränkt, während das biologische Bestandespotenzial durch den gegebenen Waldbestand limitiert wird (Abb. 6). Begrifflich kann das Standortpotenzial weiter differenziert werden in ein boden-

bezogenes Standortpotenzial und in ein klimabezogenes Standortpotenzial, je nachdem, ob das Hauptaugenmerk auf die Boden- oder die Klimakomponente der forstlichen Produktion gerichtet ist (Abb. 6). Entsprechend unterscheiden wir beim biologischen Bestandespotenzial zwischen dem baumbezogenen Bestandespotenzial und dem bestandesbezogenen Potenzial, um bei der Produktivitätsabschätzung zwischen Baum- und Bestandeseffekten auf die Produktivität zu differenzieren.

Im konkreten Fall eines gegebenen Bestandes auf einem gegebenen Standort, verschmelzen das standortbezogene und das bestandesbezogene biologische Potenzial so, dass das Minimum der beiden Potenziale das biologische Produktivitätspotenzial der Standort-Bestandes-Kombination bestimmt (Abb. 7).

Das standortbezogene biologische Standortpotenzial ist durch eine ressourcenfokussierte Sichtweise gekennzeichnet; dergestalt, dass die Produktivität durch das Vermögen des gegebenen Standorts, die für das Baumwachstum wesentlichen Bedingungen (Raum, Temperatur) und Ressourcen (Licht, Wasser und Nährstoffe) bereitzustellen, bedingt wird. Vermögen in dem gegebenen Zusammenhang bedeutet, die anhaltende (langfristige) und unabhängige (standortinhärente) Kapazität des Standorts, Baumwachstum in der betreffenden Weise zu ermöglichen.

Änderungen wachstumsrelevanter Standort- und Bestandesfaktoren können Produktivitätseinschränkungen beeinflussen und damit das biologische Standortpotenzial verändern. Das biologische Standortpotenzial ist folglich nicht unveränderlich, sondern kann durch natürliche Prozesse (z.B. Bodenentwicklung, Bodenerosion, Sukzessions-dynamik), Umweltveränderungen (z.B. Klimaerwärmung, N-Deposition) oder durch dezidierte Management-maßnahmen, die den Standort oder Bestand mit dem Ziel modifizieren, inhärente Produktivitätseinschränkungen teilweise aufzuheben (z.B. Düngung, Bewässerung, Baumartenwahl), verändert werden. Das biologische Standortpotenzial kann auch negativ beeinflusst werden, z.B. durch nicht nachhaltige Landnutzung, die zu Bodenerosion und Standortdegradation führt.

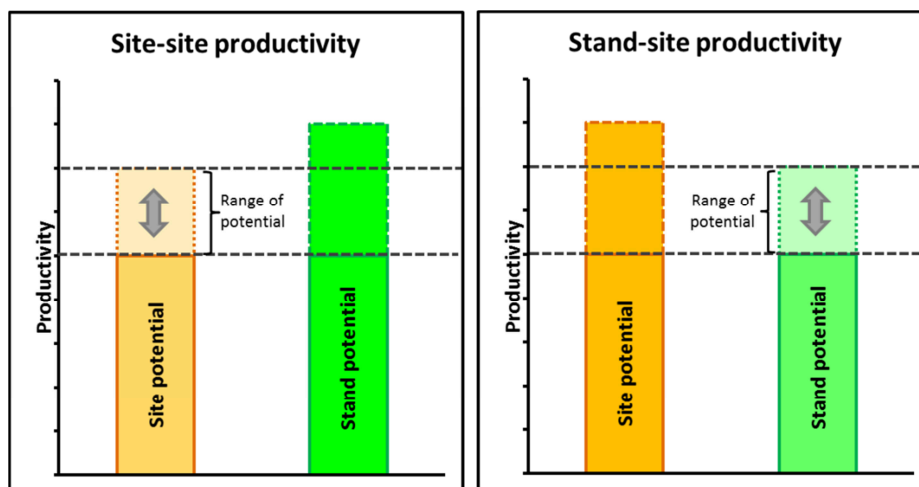


Abbildung 7: Balkendiagramm zur Illustration der Limitierung der Standortproduktivität durch standörtliche Faktoren (standort-bezogene Standortproduktivität, links) oder durch Bestandesfaktoren (bestandes-bezogene Standortproduktivität). Die Potenzialspanne kennzeichnet den Bereich innerhalb dessen die Standortproduktivität in Abhängigkeit von sonstigen Bedingungen variieren kann (verändert nach POWERS 2001).

Relevanz der Produktivitätspotenziale

Aufgrund technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Produktionseinschränkungen sind reale Produktivitätspotenziale niedriger als das theoretisch maximale Potenzial. Um eine Vorstellung über die Potentialspanne zu bekommen innerhalb derer durch gezielte Bewirtschaftungsmaßnahmen die Produktivität beeinflusst werden kann, ist die Kenntnis der 'Produktivitätslücke' wichtig. Der Waldbewirtschafter ist schließlich daran interessiert zu wissen, wie nahe die tatsächliche Produktivität an der - gemessen an den jeweiligen Produktionszielen und -beschränkungen - effizientesten (oder optimalen) Produktivität ist. Die Produktionsziele werden von dem Eigentümer bzw. Bewirtschafter definiert, und die Produktionseinschränkungen von den gegebenen Umständen gesetzt. Somit liefert die Produktivität

tätslücke Informationen für den Waldbewirtschafter, darüber zu entscheiden, welche Bewirtschaftungsmaßnahmen eventuell zu ergreifen oder umzuschichten sind, um die forstliche Produktion zu verbessern. Wird die potenzielle Produktivität als Management-Benchmark verwendet, ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass sich die potenzielle von der tatsächlichen Produktivität auch darin unterscheidet, dass bei dieser Verluste durch biologische Schadfaktoren wie Schädlinge (z.B. Borkenkäfer, blattfressende Insekten) und Krankheiten (z.B. Wurzelfäule, Stammfäule) sowie Verluste durch abiotische Störfaktoren wie Stürme und Waldbrände in der Regel nicht berücksichtigt sind.

In einem ökologischen Kontext kann es sein, dass die Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher oder sozialer Produktionseinschränkungen nicht relevant ist, so dass sich in vielen ökologischen Anwendungen die potenzielle Standortproduktivität auf die Produktivität einer bestimmten Waldaufbauform bezieht, die das standörtliche Potenzial voll ausschöpft (biologisches Potenzial der forstlichen Standortproduktivität). Prozess-basierte Modelle integrieren biophysikalisches Wissen und ökophysiologische Theorien (LANDSBERG 1986; MONSERUD 2003) und stellen deshalb geeignete Werkzeuge dar, Schätzungen der potenziellen Produktivität für einen bestimmten Standort und Vegetationstyp abzuleiten (BINKLEY et al. 2004; LANDSBERG & GOWER 1997; LANDSBERG & SANDS 2011). Während die Prozesse die das Waldwachstum steuern relativ gut bekannt sind (LANDSBERG 1986 und 2003; PALLARDY & KOZLOWSKI 2008), sind das detaillierte mechanistische Verständnis und die quantitative Kenntnis dieser Prozesse noch sehr lückenhaft (CHAPIN et al 2012; SCHLESINGER & BERNHARDT 2013). Prozess-basierte Modelle verwenden in der Regel Verallgemeinerungen wie 'Pflanzenfunktionstypen' anstelle von bestimmten Baumarten (EHLERINGER & FIELD 1993; LANDSBERG & WARING 1997), oder Abstraktionen wie das 'Big-Leaf-Modell' (MONTEITH 1981) oder 'Multi-Layer-Modelle' (DePURY & FARQUHAR, 1997; LANDSBERG et al. 1996), zur Modellierung der potenziellen Produktivität von Baumvegetationsformen. Einige groß-skalige Modelle verwenden die modellierte Produktivität der potenziellen natürlichen Vegetation als Referenz, um diese mit der modellierten Produktivität der aktuellen Vegetation zu vergleichen (CRAMER et al 1999; HABERL et al. 2007; VITOUSEK et al. 1986).

Literaturverzeichnis

- ASSMANN, E.: The Principles of Forest Yield Study. Studies in the Organic Production, Structure, Increment, and Yield of Forest Stands. Pergamon Press, Oxford, 1970
- BEERS, T.W.: Components of growth. *Journal of Forestry* 60, 245–248, 1962
- BINKLEY, D., STAPE, J.L., RYAN, M.G.: Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management* 193, 5-16, 2004
- BONTEMPS, J.D., BOURIAUD, O.: Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry* 87, 109–128, 2014
- CANNELL, M.G.R.: Physiological basis of wood production: A review. *Scand. J. of Forest Res.* 4, 459–490, 1989
- CHAPIN, F.S., MATSON, P.A., VITOUSEK, P.M., CHAPIN, M.C.: Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology, 2nd ed. Springer, New York, 2012
- CHAPIN, F.S., WOODWELL, G.M., RANDERSON, J.T., RASTETTER, E.B., LOVETT, G.M., et al.: Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems* V9, 1041–1050, 2006
- CRAMER, W., KICKLIGHTER, D.W., BONDEAU, A., III, B.M., CHURKINA, G., NEMRY, B. et al.: Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biol* 5, 1–15, 1999
- DePURY, D. G. G., FARQUHAR, G.D.: Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models. *Plant Cell Environ* 20, 537–557, 1997
- EHLERINGER, J.R., FIELD, C.B.: Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. Acad. Press, San Diego, 1993
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO): Global Forest Resources Assessment 2010 - Main Report. Rome, FAO Forestry Paper, 163, 2010
- HABERL, H., ERB, K.H., KRAUSMANN, F., GAUBE, V., BONDEAU, A., PLUTZAR, C. et al.: Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS* 104, 12942–12947, 2007
- HÄGGLUND, B.: Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstracts, Review Article* 42, 515–527, 1981
- INGESTAD, T., ÅGREN, G.I.: Theories and methods on plant nutrition and growth. *Physiol Plant* 84, 177–184, 1992
- KÖRNER, C.: Was steuert das Pflanzenwachstum? Angebot oder Nachfrage. *Biologie in unserer Zeit* 42, 238–243, 2012

- KUUSELA, K.: Forest Resources in Europe 1950-1990. Cambridge University Press, Cambridge. European Forest Institute, Research Report, 1994
- LANDSBERG, J.J.: Physiological Ecology of Forest Production. Academic Press, London, 1986
- LANDSBERG, J.J., GOWER, S.T.: Applications of Physiological Ecology to Forest Management. Academic Press, San Diego, 1997
- LANDSBERG, J.J., SANDS, P.J.: Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models, Elsevier/Academic Press, Amsterdam, Terrestrial Ecology Series v. 4, 2011
- LEARY, R.A.: Interaction Theory in Forest Ecology and Management. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, Hingham, MA, USA. Forestry Sciences 19, 1985
- MONSERUD, R.A.: Evaluating forest models in a sustainable forest management context. Forest Biometry, Modeling and Information Sciences 3, 35–47, 2003
- MONTEITH, J.L.: Coupling of plants to the atmosphere, in: GRACE, J., FORD, E., JARVIS, P. (Eds.), Plants and their Atmospheric Environment. Blackwell, Oxford, 1–29, 1981
- NAGEL, J., SPELLMANN, H., PRETZSCH, H.: Zum Informationspotenzial langfristiger forstlicher Versuchsflächen und periodischer Waldinventuren für die waldwachstumskundliche Forschung. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 183, 111–116, 2012
- PALLARDY, S.G., KOZLOWSKI, T.T.: Physiology of Woody Plants, 3rd ed. Elsevier, Amsterdam, Boston, 2008
- POWERS, R.F.: Assessing potential sustainable wood yield, in: EVANS, J. (Ed.), The Forestry Handbook. Applying Forest Science for Sustainable Management. Blackwell Science, Oxford, 105–128, 2001
- PRETZSCH, H.: Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Parey, Berlin, 2002
- PRETZSCH, H.: Forest Dynamics, Growth and Yield - From Measurement to Model. Springer, Berlin, 2009
- SCHLESINGER, W.H., BERNHARDT, E.S.: Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, 3rd ed. Academic Press, Waltham, Mass., 2013
- SKOVSGAARD, J.P., VANCLAY, J.K.: Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. Forestry 81, 13–31, 2008
- SKOVSGAARD, J.P., VANCLAY, J.K.: Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. Forestry 86, 305–315, 2013
- SOCIETY OF AMERICAN FORESTERS: The Dictionary of Forestry. <http://dictionaryofforestry.org/>, 20th of October, 2014
- UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UN-ECE), FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO): Forest resources of Europe, CIS, North America, Australia, Japan and New Zealand - Temperate and Boreal-Forest Resource Assessment TBFA-2000. Geneva, Timber and Forest Study Papers, 2000
- VITOUSEK, P.M., EHRLICH, P.R., EHRLICH, A.H., MATSON, P.A.: Human appropriation of the products of photosynthesis. BioScience 36, 368–373, 1986
- WEISKITTEL, A.R., HANN, D.W., KERSHAW, J.A., VANCLAY, J.K.: Forest Growth and Yield Modeling. Wiley-Blackwell, Oxford, 2011
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG Globale Umweltveränderungen: Future Bio-energy and Sustainable Land Use. Earthscan, London, 2010
- ZHANG, X., ZHAO, Y., ASHTON, M.S., LEE, X.: Measuring carbon in forests, in: ASHTON, M., TYRRELL, M., SPALDING, D., GENTRY, B. (Eds.), Managing Forest Carbon in a Changing Climate. Springer, Dordrecht, 139–164, 2012.