

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

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 152 (2001)

Heft: 5

Artikel: Vom Kleinen zum Grossen in der langfristigen Walddynamik : die Bedeutung verschiedener Massstabsebenen

Autor: Bugmann, Harald

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098290>

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: 02.05.2026

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

Vom Kleinen zum Grossen in der langfristigen Walddynamik: Die Bedeutung verschiedener Masstabsebenen¹

HARALD BUGMANN

Keywords: Scaling; forest ecology; long-term ecosystem dynamics; models. FDK 1 : 945.4

1. Einleitung

Warum kümmert es uns, wie man bei der Beurteilung von Walddynamik vom «Kleinen» zum «Grossen» kommt? Was ist in diesem Zusammenhang überhaupt «klein», was «gross»? Die Dynamik von Ökosystemen und somit auch von Wäldern wird oftmals in einem zweidimensionalen Raum dargestellt, der aufgespannt wird durch die Zeit und den Raum. Die meisten Beobachtungen und Experimente in der Waldökologie und in der Ökologie generell beschränken sich notwendigerweise auf verhältnismässig kurze Zeitintervalle und Raumabschnitte (vgl. KAREIVA & ANDERSEN, 1988). Die Wissenschaft untersucht also vordergründig das «Kleine», die sogenannten «Masstabsebenen» links unten im Raum-Zeit-Diagramm (Abbildung 1). Was uns letztlich aber interessiert, ist das «Grosse», nämlich beispielsweise die Entwicklung von Waldökosystemen im Lauf mehrerer Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte. Es ist bekannt, dass auf Grund von Ergebnissen relativ kurzer Untersuchungen in kleinen Gebieten die Dynamik von Ökosystemen über längere Zeit und auf grösseren Flächen nur sehr schwierig herleitbar ist. Man spricht von sogenannten Skalierungsfragen: aufgrund kleinskaliger Ergebnisse (des «Kleinen») ist die grossskalige Dynamik (das «Grosse») nicht direkt erschliessbar (EHLERINGER & FIELD, 1993).

Betrachten wir diese Verhältnisse anhand der charakteristischen Masstabsebenen in Waldökosystemen: Physiologische Prozesse wie die Fixierung von CO₂ in der Photosynthese laufen typischerweise innert Bruchteilen von Sekunden und auf der räumlichen Ebene von Mikro- bis Millimetern ab; die

Dynamik eines Baumindividuums ist auf der Ebene von Monaten (z.B. Phänologie, Durchmesserchwankungen) und Metern erfassbar; die Bestandesdynamik hat charakteristische Zeit- und Raumeinheiten von Jahrzehnten und Hektaren; über die regionale (z.B. Landschaftsmuster) und kontinentale (z.B. Pflanzen-Wanderung) Ebene gelangt man schliesslich zur Dynamik der Biosphäre, bei welcher Zeitskalen von Jahrhunderten und Raumeinheiten von Millionen von Quadratkilometern relevant sind.

In der Waldökologie sind also riesige Spannen von Zeit und Raum von Interesse, von der Sekunde bis zum Jahrhundert und vom Millimeter bis zum gesamten Globus. Wie ermittelt man beispielsweise die Konsequenzen von Veränderungen in physiologischen Prozessen für die Biosphäre, wenn die «höheren» Masstabsebenen für Beobachtung und Experiment zumeist nicht direkt zugänglich sind? Der vorliegende Artikel geht der Frage nach, für welche praktischen Fragen Skalierungsprobleme relevant sind und wie sie angegangen werden können.

2. Praktische Bedeutung von Skalierungsfragen

In Anbetracht der eingangs skizzierten methodischen Probleme erscheint es fraglich, wie die Forschung Antworten geben soll auf eine Reihe von Fragen, die von verschiedener Seite und mit zunehmender Intensität gestellt werden. Ich bin überzeugt, dass vier verschiedene «Umwelten» die Wälder des 21. Jahrhunderts und unseren Umgang mit ihnen prägen werden:

Zum Einen die sozio-ökonomische Umwelt: Wenn wir ein auf fossilen Energieträgern basierendes Energiesystem beibehalten, dürfte es in den kommenden Jahrzehnten aufgrund steigenden Verbrauchs (Weltbevölkerung) und abnehmender Verfügbarkeit der Ressourcen zu Preissteigerungen für fossile Energie kommen, welche eine Intensivierung der Waldnutzung auch in Gebirgsräumen wie der Schweiz (wieder) attraktiv machen könnten. Unter diesem Szenario muss die Forschung Fragen zur Nachhaltigkeit einer intensiven Waldnutzung im Gebirgsraum beantworten, und dazu sind langfristige und grossräumige Betrachtungen notwendig. Wenn wir umgekehrt vor der Verknappung der fossilen Brennstoffe einen Wechsel unseres Energiesystems zustande brächten (z.B. zu einer Wasserstoffwirtschaft), so würde der Trend zur Extensivierung der Bewirtschaftung in vielen Waldbeständen vor allem im Gebirge wohl anhalten. Unter diesem Szenario

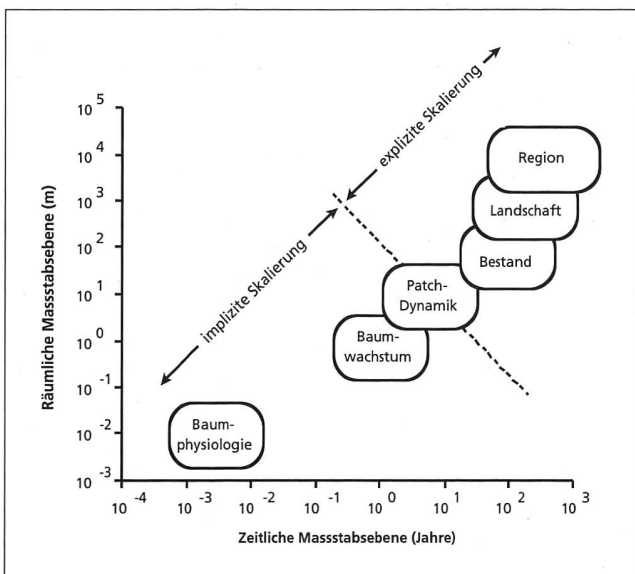


Abbildung 1: Zeitliche und räumliche Masstabsebenen in der Waldökologie und Arten ihrer Überbrückung in Gap-Modellen (implizite und explizite Skalierung, vgl. Text). Nach BUGMANN et al. (2000).

¹ Nach einem Referat, gehalten am Symposium des Schweizerischen Forstvereins «Forstwissenschaften im Wandel - neue Methoden für tragfähige Lösungen» im Rahmen der 180. Jahresversammlung der Schweiz. Akademie der Naturwissenschaften (SANW) am 13. Oktober 2000 in Winterthur.

muss die Forschung Fragen beantworten zur «natürlichen» Entwicklung (Sukzession) in den heutigen Waldbeständen; auch hierzu sind langfristige und grossräumige Betrachtungen vonnöten.

Zum Zweiten die politische Umwelt: In den vergangenen zehn Jahren, genauer seit der Konferenz von Rio 1992, haben Wälder eine neue Funktion erhalten, die von der Politik zunehmend nachgefragt wird. Wälder sind sehr wichtige Kohlenstoffspeicher, und eine entsprechende Bewirtschaftung dieser Systeme könnte den atmosphärischen Kohlendioxidgehalt mindestens während einiger Jahrzehnte stark beeinflussen (vgl. FISCHLIN & BUGMANN, 1994). Wiederum ist aber zur Abschätzung solcher Massnahmen und ihrer Konsequenzen eine Langzeit-Perspektive notwendig, die nicht bei der ersten «Commitment period» (2008–2012) des Kyoto-Protokolls halt machen kann.

Zum Dritten die physikalische Umwelt: Es steht mittlerweile praktisch ausser Zweifel, dass der Mensch eine Veränderung des globalen Klimas verursacht. Dies wird im dritten Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (vgl. <http://www.ipcc.ch>), der diesen Sommer erscheint, eindrücklich dargelegt. Demzufolge stellen sich Fragen nach den Auswirkungen von Klimaveränderungen auf Ökosysteme, und zwar nicht nur von Veränderungen der Mittelwerte des Klimas (vgl. BUGMANN, 1999), sondern auch von Veränderungen in der interannuellen Variabilität (vgl. BUGMANN & PFISTER, 2000) und bezüglich der Häufigkeit und des Ausmasses von Extremereignissen (vgl. die Stürme «Vivian» und «Wiebke» 1990 und «Lothar» 1999). Auch diese Fragen lassen sich mit den üblichen Beobachtungs- und Experimentmethoden nicht wirklich beantworten.

Zum Vierten die chemische Umwelt: Die anthropogen erhöhte Stickstoffdeposition ist eine seit langem anerkannte Realität, ebenso die Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes. In beiden Fällen ist es aber äusserst schwierig, klare Aussagen zu machen darüber, welcher der beiden Faktoren zu wie grossen Veränderungen z.B. in der Wuchsleistung von Waldbäumen geführt hat resp. noch führen wird (vgl. SPIECKER *et al.*, 1996; KÖRNER, 1996). Dies ist so, weil wir zum Beispiel nicht in der Lage sind, von Experimenten mit Topfpflanzen ohne Weiteres auf das Verhalten von Ökosystemen zu schliessen. Das ist zwar eigentlich ganz naheliegend und einleuchtend; trotzdem wird in vielen wissenschaftlichen Arbeiten immer noch mit sehr einfachen und oftmals sogar nachweislich falschen Ansätzen versucht, vom «Kleinen» auf das «Grosse» zu schliessen (vgl. *Tabelle 1*).

Tabelle 1: Beispiele für Skalierungsprobleme bezüglich eines erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehaltes (nach KÖRNER, 1996). In der linken Spalte stehen die beobachteten kleinskaligen Phänomene, während die rechte Spalte das Ergebnis einer (naiven) linearen Extrapolation in Zeit und Raum wiedergibt, ohne dass Skalierungsfragen in Betracht gezogen werden. Die Massstabsebenen für die Beobachtungen und die Extrapolationen sind in Klammern angegeben.

Beobachtetes kleinskaliges Phänomen	Grossskalige Extrapolation
Stimulierung der Blatt-Photosynthese (Tage bis Wochen)	proportionale Erhöhung der langfristigen Photosyntheseleistung (Jahre bis Jahrhunderte)
Erhöhung der Atmungsrate (Tage bis Wochen)	proportionale Erhöhung der langfristigen Atmungsrate (Jahre bis Jahrhunderte)
Höhere Wachstumsrate von Keimlingen, Anwuchs und Aufwuchs (m ²)	mehr Kohlenstoff-Speicherung auf der Landschaftsebene (km ²)
Tieferer Lichtkompensationspunkt der Blätter (cm)	Erhöhung des Blattflächenindex auf Bestandesebene (ha)

3. Methoden zur Beantwortung von Skalierungsfragen

In einer idealen Welt würde man mindestens einige als kritisch eingestufte Skalierungsfragen in der Waldökologie mit den «klassischen» wissenschaftlichen Methoden, mit Beobachtung und Experiment zu beantworten versuchen. Dies wäre möglich, indem man langfristige Untersuchungen durchführen würde, bei welchen verschiedene räumliche Massstabsebenen gleichzeitig betrachtet würden. Ein solches Vorgehen wäre aber sehr aufwendig und in den allermeisten Fällen mit derart hohen Kosten (pro Jahr) verbunden, dass die Machbarkeit schon allein deswegen fraglich erscheint.

Eines der wenigen Experimente, das explizit zur Beantwortung von Skalierungsfragen im Wald entwickelt wurde, steht im Zusammenhang mit der Frage nach den ökosystemaren Auswirkungen eines erhöhten atmosphärischen CO₂-Gehaltes. Mitten in einem Wald in der Nähe von Hofstetten (SO), der sich durch eine hohe Baumartenzahl auszeichnet, steht ein «gewöhnlicher» Baukran. Er wird vom Botanischen Institut der Universität Basel (Prof. C. Körner) dazu verwendet, im gesamten Bestand dreidimensional ökophysiologische Messungen durchzuführen. Über den Bestand wurde ein dichtes Netz von Plastikschräuchen gezogen, aus denen kontinuierlich CO₂ strömt. Die Konzentration des Gases im Bestand wird so nah als möglich bei einer Sollkonzentration gehalten; seit dem Sommer 2000 wird der Bestand mit CO₂ begast. Dieses im Vergleich mit anderen ökologischen Untersuchungen sehr teure Experiment soll in ein paar Jahren eine Antwort auf die Frage geben, ob die im Treibhaus und in Topfpflanzen-Versuchen unter erhöhtem CO₂ erzielten, teils phänomenalen Wachstumssteigerungen von Jungpflanzen auch bei erwachsenen Waldbäumen in ihrer natürlichen Umgebung auftreten (vgl. *Tabelle 1*).

Die meisten wissenschaftlichen Untersuchungen beschränken sich aber immer noch auf eine einzige räumliche Massstabsebene oder sie betrachten nur kurze Zeiträume (2 bis 3 Jahre). Der Bedarf nach weiteren komplexen «Ökosystemexperimenten» ist deshalb sicher gegeben. Auch wenn wir beim ersten Gedanken an solche Experimente vor ihrer räumlichen, logistischen und finanziellen Dimension zurückschrecken: im Vergleich zum finanziellen und apparativen Aufwand, der in anderen Wissenschaftsbereichen routinemässig betrieben wird, sind solche Ökosystemexperimente immer noch verhältnismässig billig. In Anbetracht der Fragen, vor welche die Wissenschaft in unserem Bereich gestellt ist (siehe Abschnitt 2), würde sich der Aufwand sicher lohnen, solche Experimente vermehrt durchzuführen.

Als eine Alternative oder mindestens Ergänzung zu teuren, arbeitsintensiven und schwierig durchzuführenden Experimenten zur Beantwortung von Skalierungsfragen bieten sich mathematische Modelle an. Skalierungsfragen stehen beispielsweise im Zentrum der sogenannten Gap-Modelle der Waldsukzession, die in dieser Zeitschrift bereits ausführlicher diskutiert wurden (z.B. BUGMANN, 1999). Für eine detaillierte Abhandlung zu Skalierungsfragen in Gap-Modellen seien interessierte Leser auf BUGMANN *et al.* (2000) verwiesen. An dieser Stelle soll nur auf einige entscheidende Kernpunkte der modellbasierten Skalierung eingegangen werden im Hinblick auf eine Diskussion von «kritischen» Fällen, wo diese Methode nicht zu genügen vermag.

4. Modellbasierte Skalierung

4.1 Grundlagen

Viele Massstabsebenen in der Natur sind entlang kontinuierlich aufsteigender (oder absteigender, je nach Betrachtungsweise) Zeit- und Raumkonstanten angeordnet. Die Massstabs-

ebenen bilden ausserdem kein Kontinuum entlang der beiden Achsen, sondern sie sind vielmehr diskret angeordnet (vgl. HOLLING, 1992). Wir können demzufolge für vorgegebene Phänomene wie zum Beispiel die Dynamik von Wäldern eine Reihe von klar unterscheidbaren Massstabsebenen identifizieren, wie das in *Abbildung 1* gemacht wurde. Diese beiden Tatsachen werden in der sogenannten Hierarchie-Theorie (O'NEILL *et al.*, 1986) verwendet, um eine Beziehung zwischen benachbarten Massstabsebenen herzustellen.

Kernpunkt der Hierarchie-Theorie ist, dass man Phänomene auf der Massstabsebene n erklären kann, indem man Prozesse aus der «tiefer liegenden» Ebene $n-1$ benutzt, währenddem die «höher liegenden» Ebenen $n+1$, $n+2$ usw. lediglich zur Definition kontextsetzender, konstanter Rahmenbedingungen verwendet werden. Die zugrunde liegende Idee ist, dass sich «höher liegende» Prozesse so langsam oder auf so grossen Flächen abspielen, dass man sie ignorieren darf: wenn man beispielsweise die Biodiversität im 21. Jahrhundert betrachten will, so kann man die Kontinentaldrift getrost vernachlässigen, denn die Lage der Kontinente wird sich in den kommenden 100 Jahren kaum merklich verändern. Umgekehrt spielen sich «tiefer liegende» Prozesse so schnell oder auf so kleinen Flächen ab, dass sie auf der interessierenden Massstabsebene näherungsweise im statistischen Gleichgewicht sind: beispielsweise werden in der Pflanzenphysiologie zwar biochemische und molekularbiologische Prozesse betrachtet, kaum aber solche aus der Kernphysik.

Um beim Bereich der Forstwissenschaften zu bleiben (vgl. *Abbildung 1*): Nach der Hierarchie-Theorie lässt sich das Baumwachstum (Ebene 2) aufgrund der Baumphysiologie (Ebene 1) erklären, währenddem die Populationsdynamik der Bäume (Ebene 3) konstant gehalten (vernachlässigt) wird. Analog lässt sich die Dynamik einer (vollständig bewaldeten) Landschaft (Ebene 5) aufgrund der Dynamik von Waldbeständen (Ebene 4) erklären, ohne dass es notwendig wäre, z.B. Kenntnisse aus der Baumphysiologie (Ebene 1) beizuziehen.

Die Hierarchie-Theorie bietet also Regeln an, um Prozesse auf verschiedenen Massstabsebenen miteinander zu verknüpfen; man sagt auch, Prozesse zu «skalieren». Bekanntlich gibt es keine Regel ohne Ausnahme; trotzdem hat sich die Hierarchie-Theorie unter anderem als äusserst nützlich für die mathematische Modellierung der Dynamik natürlicher Systeme erwiesen.

BUGMANN *et al.* (2000) unterschieden zwei verschiedene Arten der modellbasierten Skalierung. Einerseits gibt es die implizite Skalierung; in dieser Methode wird die Ebene $n-1$ durch aggregierte, «skalierte» Funktionen auf der Ebene n wiedergegeben. Beispielsweise wird in Gap-Modellen, in welchen das Baumwachstum (Ebene 2) modelliert wird, die Baumphysiologie (Ebene 1) nicht direkt betrachtet, sondern die Wachstumsgleichung wird durch einfache Funktionen modifiziert, die aufgrund physiologischer Überlegungen hergeleitet wurden (*Abbildung 1*). Ebenso wird der Übergang vom Baum (Ebene 2) zur Kleinfläche («patch»; Ebene 3) durch die Hypothese der Gap Dynamics (WATT, 1947; BORMANN & LIKENS, 1979) bewerkstelligt, ohne dass die genaue räumliche Anordnung der einzelnen Bäume betrachtet würde. Andererseits kann man «explizite» Skalierungsmethoden anwenden, um die Aussagen eines Punktmodells in Raum und/oder Zeit durch numerische (oder sehr selten auch analytische) Integration zu skalieren (vgl. KING, 1991; LUXMOORE *et al.*, 1991). Im Fall von Gap-Modellen wird explizite Skalierung beispielsweise benutzt, um die Dynamik eines Waldbestandes (Ebene 4) aus der Dynamik von Kleinflächen (Ebene 3) herzuleiten; ebenso gibt es Studien, in denen die Dynamik einer ganzen Region (Ebene 5/6) anhand verteilter Simulation aus der Dynamik von Einzelbeständen (Ebene 4) hergeleitet wurde (vgl. HUSTON, 1991; LINDNER *et al.*, 1997).

Wie aus *Abbildung 1* ersichtlich ist, gestatten die Regeln der Hierarchie-Theorie im Idealfall eine lückenlose Skalierung ökologischer Prozessinformation von der Ebene der Baumphysiologie bis zur regionalen Dynamik. Bevor wir uns den Ausnahmen zuwenden, wollen wir drei Beispiele der Anwendung dieser Regeln im Rahmen von Modellen der langfristigen Walddynamik kurz diskutieren.

4.2 Anwendungen

Das erste Anwendungsbeispiel beschäftigt sich mit der Sukzessionsforschung in Naturwäldern, von denen es in der Schweiz heute nur wenige Reste gibt, darunter jene in Bödmeren (SZ), Scatlé (GR) und Derborence (VS). BADECK *et al.* (2001) untersuchten das Verhalten von sechs Sukzessionsmodellen an fünf europäischen Standorten mit naturnahen Wäldern, darunter auch in Scatlé. Parameter, die für die Modelle vorgegeben werden müssen, sind lediglich die Standortcharakteristika (Klima, Boden) und die morphologischen (z.B. maximale Höhe und Durchmesser) und autökologischen (z.B. Trockenheits- und Schattentoleranz) Eigenschaften der Baumarten. Durch den Vergleich simulierter Bestandesgrössen (vgl. *Abbildung 2*) mit gemessenen Daten aus den Urwäldern können wir unser Verständnis von Sukzessionsprozessen überprüfen. Im vorliegenden Fall ergab sich, dass das Modell die gemessene Biomasse (Vorrat) erheblich überschätzt und zudem irrtümlicherweise die Anwesenheit der Lärche auch im späten Sukzessionsstadium (nach dem Simulationsjahr 800) simuliert (*Abbildung 2*). Aufgrund dieser Studien zeigte es sich, dass es manchmal äusserst schwierig ist, bei Divergenzen zwischen simuliertem und gemessenen Daten die genaue Ursache im Modell zu eruieren – ein Skalierungsschritt (*Abbildung 1*) mag fehlerhaft gemacht worden sein, oder innerhalb einer bestimmten Massstabsebene (hier v.a. Ebenen 2 & 3) wurden Prozesse fehlerhaft modelliert. Gerade in dieser Hinsicht sind systematische Modellvergleiche sehr nützlich, doch sind weitergehende Analysen einzelner Prozesse notwendig, um hier klare Antworten geben zu können (BUGMANN *et al.*, 2001).

Im zweiten Anwendungsbeispiel geht es um die Abschätzung der Auswirkungen anthropogener Klimaveränderungen auf Zusammensetzung, Vorrat und Struktur von Waldbeständen. Wie BUGMANN (1999) diskutierte, haben die meisten «klassischen» Ansätze zur Abschätzung solcher Auswirkungen bedeutende Schwachstellen. Es ist deshalb naheliegend, dynamische mathematische Modelle beizuziehen. Im Modellansatz, der dieser Studie zugrunde lag, wurden die Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag als Eingangsgrössen verwendet. Diese Grössen haben einen direkten Einfluss auf die Etablierung und das Wachstum von Baumindividuen

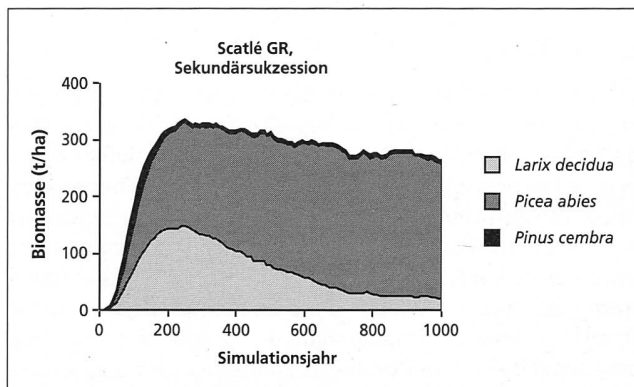


Abbildung 2: Simulierte Dynamik eines Urwaldbestandes am Standort Scatlé (GR). Dargestellt ist eine Sekundärsukzession, ausgehend von einer unbewaldeten Fläche mit einem entwickelten Boden (z.B. aufgelassene Weide). Nach BADECK *et al.* (2001).

im Modell. In erster Linie von Interesse sind aber nicht diese direkten Effekte (Ebenen 2 & 3 in *Abbildung 1*), sondern die indirekten Auswirkungen über längere Zeiträume auf ganze Waldbestände (Ebene 5). Mit dem Modell ist es nun möglich, die direkten Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die Bestandesebene zu skalieren, ohne dass zusätzliche Annahmen (ausserhalb jener der Hierarchie-Theorie) getroffen werden müssen. So ergab sich in der Studie von BUGMANN (1999) beispielsweise, dass Buchen- und Buchen-Tannenwälder im Mittelland nur wenig empfindlich auf Klimaveränderungen sind, wie wir sie für das Jahr 2100 erwarten können. BRZEZIECKI *et al.* (1995) hingegen kamen in einer ähnlichen, aber auf einem ganz anderen Modell basierenden Studie zum Schluss, dass die Buchenwälder weitgehend durch wärmeliebende (und trockenheitstolerantere) Eichenmischwälder ersetzt würden. Im Modell von BRZEZIECKI *et al.* (1995) werden aber die heutigen Waldgesellschaften empirisch-statistisch mit Klima- und anderen Eingangsdaten korreliert, ohne dass eine implizite oder explizite Skalierung kausaler Prozessinformation gemacht würde. Ein grosser Teil der Unterschiede in den Resultaten der beiden Studien dürfte darin begründet liegen, wie resp. ob die Skalierung gemacht wurde.

Das dritte Anwendungsbeispiel beschäftigt sich mit der Frage, wie sich die interannuelle Variabilität im Klima auf die langfristige Walddynamik auswirkt. Wiederum stehen uns primär Informationen über die Auswirkungen von Klimavariabilität auf den Ebenen 2 & 3 zur Verfügung (*Abbildung 1*), während uns die Ebene 5 am meisten interessiert. BUGMANN & PFISTER (2000) wendeten ein Modell an, um die Auswirkungen interannueller Klimavariabilität von der Ebene des Einzelbaumes auf die Ebene der Bestandesdynamik zu skalieren. Dazu benutzten sie eine detaillierte Witterungsrekonstruktion für die Jahre 1525–1995 (PFISTER, 1992; PFISTER *et al.*, 1994) und studierten die Walddynamik entlang von zwei Höhentransekten in Davos, welche sich von der subalpinen in die alpine Zone erstreckten. Dabei ergab sich, dass die Lage der natürlichen alpinen Waldgrenze massgeblich durch zwei «traumatische» Kaltperioden beeinflusst wurde; eine davon war Ende des 16. Jahrhunderts, die andere in den 1810er-Jahren. Bemerkenswert ist insbesondere, dass die simulierte Waldgrenze seit dem kältebedingten starken Rückgang Anfang des 19. Jahrhunderts nicht wieder angestiegen ist, obwohl die Temperaturen im 19. und 20. Jahrhundert durchwegs erheblich höher lagen als während der Kaltperiode – das System reagiert also nur sehr verzögert. Dieses Skalierungsbeispiel zeigt, dass auf der Ebene der Bestandesdynamik neue Effekte (sogenannte «emergent properties») auftreten können, die man aufgrund der bekannten Beziehungen auf der Ausgangsebene (hier: Baumwachstum und -etablierung) nicht ohne weiteres erwartet hätte.

4.3 Probleme

Wie bereits angedeutet, bietet die Hierarchie-Theorie Regeln an, die sich in vielen Fällen erfolgreich anwenden lassen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Prozesse auf tiefer liegenden und insbesondere auch auf höher liegenden Ebenen kontinuierlich ablaufen. Über die Ausnahmen von den Regeln der Hierarchie-Theorie finden in verschiedenen Disziplinen – nicht etwa nur in den Forstwissenschaften – lebhaft Diskussionen statt (vgl. HARVEY, 2000). Ein prominentes Beispiel dafür stammt aus der Atmosphärenphysik: Globale Klimamodelle arbeiten mit einer sehr groben räumlichen Auflösung (Gitterzellen von mehreren Grad Länge und Breite), und das führt zum Problem, dass Wolken nicht direkt modelliert werden können, obwohl sie eine sehr grosse Bedeutung für die Energiebilanz der Erde haben. Man wendet statt dessen üblicher-

weise eine implizite Skalierung an und «parametrisiert» die Effekte von Wolken auf der Ebene der Gitterzellen der Klimamodelle. Wie das genau zu erfolgen hat oder ob es sogar notwendig ist, die Physik der Wolken explizit wiederzugeben, ist einer der am heftigsten diskutierten Gegenstände in der Klimamodellierung. Letztlich geht es um die Frage, ob eine tiefer liegende Ebene (Wolkenphysik) einen direkten, «durchschlagenden» Einfluss auf eine viel höher liegende Ebene (atmosphärische Zirkulation der Gitterzelle) hat, der mit dem üblichen Skalierungsschema (vgl. *Abbildung 1*) nicht adäquat gefasst werden kann.

Aus dem Bereich der Forstwissenschaften seien zwei Beispiele genannt, bei denen «durchschlagende» Effekte entweder diskutiert werden oder nachgewiesenermassen vorhanden sind: Zum Einen wird heftig debattiert, ob es möglich ist, Aussagen über die Einflüsse von Umweltveränderungen (vor allem Stickstoff-Deposition, CO₂-Düngung und Klima) auf Ökosysteme zu machen, ohne die physiologische Ebene und insbesondere Photosynthese, Atmung und Allokation (die Verteilung des assimilierten Kohlenstoffes auf die verschiedenen Pflanzenorgane wie z.B. Blätter, Wurzeln und Stammholz) explizit zu berücksichtigen; hier wird also wie im Fall der Wolkenphysik debattiert, ob eine implizite Skalierung überhaupt möglich ist. Zum Anderen haben uns einige Extremereignisse der letzten Jahre wie die Windwürfe von 1990 und 1999 in Mitteleuropa und die Waldbrände in den westlichen USA von 1988 und 1999 zwei Dinge in Erinnerung gerufen: einerseits, dass die Landschaftsebene an sich von Bedeutung ist und wir Ökosysteme nicht losgelöst von ihrem landschaftlichen Kontext analysieren und verstehen können; andererseits aber auch, dass Landschaftsprozesse, die nicht kontinuierlich ablaufen, auf grossen Flächen, aber innert kürzester Zeit (d.h. links oben im Raum-Zeit-Diagramm der *Abbildung 1*) und somit ausserhalb der üblichen Skalierungs-Kaskade auftreten können. Solche grossflächig-kurzzeitig auftretenden Landschaftsphänomene haben «durchschlagende» Effekte bis hinunter zur Physiologie und entziehen sich somit den vorgängig diskutierten Skalierungsmethoden (vgl. TURNER *et al.*, 1993).

5. Schlussfolgerungen

Ich habe im vorliegenden Artikel versucht, eine Einführung in die Bedeutung und Problematik der Skalierung von Prozessinformation in Waldökosystemen zu geben. Die folgenden Schlussfolgerungen scheinen mir besonders erwähnenswert:

Erstens dürfte die Waldentwicklung im 21. Jahrhundert und darüber hinaus durch eine Vielzahl komplexer Faktoren bestimmt werden. Die sozio-ökonomische, politische, physikalische und chemische Umwelt wird sich (weiter) und zum Teil stark verändern, auch wenn die genauen Veränderungen zur Zeit äusserst schwierig abschätzbar sind. Entsprechend ist die Forschung mit der Herausforderung konfrontiert, die langfristigen und grossräumigen Auswirkungen dieser Umweltveränderungen abzuschätzen, basierend auf zumeist kurzzeitigen und kleinflächigen Erkenntnissen. Daraus ergibt sich die grosse praktische Bedeutung von Skalierungsfragen.

Zweitens stellen wir fest, dass Wälder hierarchisch strukturierte Systeme sind, in denen von der Physiologie bis zur Landschaftsdynamik und den regionalen Interaktionen zwischen Vegetation und Klima eine Vielzahl von Massstabsebenen eine Rolle spielt. Die Fortpflanzung (Skalierung) von Signalen vom Kleinen zum Grossen in Zeit und Raum ist deshalb nicht einfach abschätzbar. Mathematische Modelle, die explizit auf der Hierarchie-Theorie aufbauen, können helfen, solche Skalierungsfragen anzugehen.

Drittens ergibt sich aus der Hierarchie-Theorie, dass wir eine bestimmte Massstabsebene, die für uns interessant ist

(z.B. die Bestandesebene), nicht losgelöst von benachbarten Massstabsebenen betrachten können. Ausserdem ist festzustellen, dass es auf der Landschaftsebene grossflächige, aber kurzzeitig wirksame Phänomene und Prozesse wie Windwürfe, Feuer und generell «Störungen» gibt, die einen bedeutenden Einfluss auf den Zustand und die Entwicklung von Wäldern haben können. Wir müssen deshalb den Wald im Landschaftskontext sehen und die sogenannten «Störungen» als integralen Teil der Ökosystemdynamik begreifen und sie in die Planung und Gestaltung dieser Systeme integrieren (vgl. CHRISTENSEN *et al.*, 1996).

Zusammenfassung

Die Dynamik von Waldökosystemen umfasst riesige Spannen in Zeit und Raum, von der Millisekunde bis zum Jahrtausend und vom Quadratmillimeter bis zum Globus. Experimente und Beobachtungen werden aber zumeist auf kleinen Flächen und für kurze Zeiträume gemacht. Daraus ergibt sich das Problem, wie die Forstwissenschaft Antworten auf Fragen zur Entwicklung von Wäldern geben soll, die mit aktuellen Veränderungen der sozio-ökonomischen, politischen, physikalischen und chemischen Umwelt im 21. Jahrhundert in Zusammenhang stehen.

Das Konzept der Massstabsebenen und der Übergänge zwischen Massstabsebenen, die sogenannte Skalierung, wird eingeführt, und Methoden zur Skalierung ökologischer Information werden diskutiert. Neben (zumeist sehr kostspieligen) Beobachtungen und Experimenten, die über lange Zeiträume und auf verschiedenen räumlichen Massstabsebenen gleichzeitig durchgeführt werden müssten, bieten sich vor allem mathematische Modelle, die auf der Hierarchie-Theorie aufbauen, zur Beantwortung von Skalierungsfragen an. Anhand von drei Anwendungsbeispielen wird gezeigt, wie die Skalierung ökologischer Information durchgeführt werden kann, und Problemfälle der Hierarchietheorie werden diskutiert.

Summary

Moving from the small to large in long-term forest dynamics: the importance of scaling issues

The dynamics of forest ecosystems span very large ranges of time and space, from milliseconds to millennia and from square millimeters to the entire globe. Experiments and observations, however, are typically performed on small patches of land and for relatively short time spans. Thus, the problem arises as to how forest science can answer questions related to the development of forests under the impacts of changes in the socio-economic, political, physical and chemical environment in the 21st century.

The concept of scale and the transition between different scales, so-called scaling, are introduced, and methods for the scaling of ecological information are discussed. Scaling questions can be answered by direct observation or experimentation, but such studies tend to be very expensive because they be performed over long periods of time and on several spatial scales. As an alternative, mathematical models that are based on hierarchy theory can be used to address scaling issues. Three examples are used to illustrate how ecological information can be scaled from small areas and short times to larger areas and long periods. Problems arising with hierarchy theory are also addressed.

Résumé

Des petites aux grandes choses qui régissent la dynamique forestière à long terme: de l'importance de la notion d'échelle

La dynamique des écosystèmes forestiers se caractérise par des écarts énormes dans le temps et l'espace. Ces derniers vont de la milliseconde au millénaire et du millimètre carré à la surface du globe. Les recherches et les observations ont lieu le plus souvent sur de petites surfaces et durant une brève période. Il se pose alors le problème suivant: comment les sciences forestières peuvent-elles donner des réponses aux questions se rapportant à l'évolution des forêts, tout en tenant compte des changements qui s'opèrent actuellement dans l'environnement socio-économique, politique, physique et chimique du XXI^e siècle?

La notion d'échelle ainsi que le passage d'une échelle à une autre (la mise à l'échelle) font l'objet de développements. Des méthodes de mise à l'échelle de l'information écologique sont discutées. A côté des observations et des expériences (souvent très coûteuses) qui doivent être entreprises sur de longues périodes et à différentes échelles spatiales, il est possible de répondre avantageusement aux questions de mise à l'échelle en recourant à des modèles mathématiques basés sur la théorie des hiérarchies. Trois exemples sont utilisés pour montrer comment il est possible de mettre à l'échelle l'information écologique. Ils permettent ensuite de discuter les problèmes posés par la théorie des hiérarchies.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Literatur

- BADECK, F.-W., LISCHKE, H., BUGMANN, H., HICKLER, T., HÖNNINGER, K., LASCH, P., LEXER, M.J., MOUILLOT, F., SCHABER, J., SMITH, B. (2001): Tree species composition in European pristine forests. Comparison of stand data to model predictions. *Climatic Change*, im Druck.
- BORMANN, F.H., LIKENS, G.E. (1979): Pattern and process in a forested ecosystem. Springer, New York a.o., 253 S.
- BRZEZIECKI, B., KIENAST, F., WILDI, O. (1995): Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *J. Veg. Sci.*, 6: 257–268.
- BUGMANN, H. (1999): Anthropogene Klimaveränderung, Sukzessionsprozesse und forstwirtschaftliche Optionen. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 150: 275–287.
- BUGMANN, H., PFISTER, C. (2000): Impacts of interannual climate variability on past and future forest composition. *Reg. Env. Change*, 1: 112–125.
- BUGMANN, H., LINDNER, M., LASCH, P., FLECHSIG, M., EBERT, B., CRAMER, W. (2000): Scaling issues in forest succession modelling. *Climatic Change*, 44: 265–289.
- BUGMANN, H., REYNOLDS, J.F., PITELKA, L.F. (Ed.) (2001): How much physiology is needed in forest gap models for simulating long-term vegetation response to global change? *Climatic Change*, im Druck.
- CHRISTENSEN, N.L. *et al.* (1996): The report of the Ecological Society of America committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6: 665–691.
- EHLERINGER, J.R., FIELD, C.B. (1993): Scaling physiological processes: Leaf to globe. Academic Press, San Diego a.o., 388 S.
- FISCHLIN, A., BUGMANN, H. (1994): Können forstliche Massnahmen einen Beitrag zur Reduktion der schweizerischen CO₂-Emissionen leisten? *Schweiz. Z. Forstwes.*, 145: 275–292.
- HARVEY, D.L. (Hg.) (2000): Upscaling in global change research. *Climatic Change*, 44: 223–408.
- HOLLING, C.S. (1992): Cross-scale morphology, geometry and dynamics of ecosystems. *Ecological Monographs*, 62: 447–502.
- HUSTON, M.A. (1991): Use of individual-based forest succession models to link physiological whole-tree models to landscape-scale ecosystem models. *Tree Physiology*, 9: 293–306.

- KAREIVA, P., ANDERSEN, M. (1988): Spatial aspects of species interactions: The wedding of models and experiments. In: HASTINGS, A. (Ed.), *Community Ecology. Lecture Notes in Biomathematics 77*, Springer Verlag, Berlin, 35–50.
- KING, A.W. (1991): Translating models across scales in the landscape. In: TURNER, M.G., GARDNER, R.H. (Ed.), *Quantitative methods in landscape ecology. Ecological Studies, 82*, Springer, New York a.o., 479–517.
- KÖRNER, C. (1996): The response of complex multispecies systems to elevated CO₂. In: WALKER, B., STEFFEN, W. (Ed.), *Global Change and Terrestrial Ecosystems. International Geosphere-Biosphere Programme book series, 2*, Cambridge University Press, Cambridge, 20–42.
- LINDNER, M., BUGMANN, H., LASCH, P., FLECHSIG, M., CRAMER, W. (1997): Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg, Germany. *Agric. For. Meteorol.*, 84: 123–135.
- LUXMOORE, R.J., KING, A.W., THARP, M.L. (1991): Approaches to scaling up physiologically based soil-plant models in space and time. *Tree Physiol.*, 9: 281–292.
- O'NEILL, R.V., DEANGELIS, D.L., WAIDE, J.B., ALLEN, T.F.H. (1986): A hierarchical concept of ecosystems. Princeton University Press, Princeton.
- PFISTER, C. (1992): Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. A methodology for quantifying man-made evidence on weather and climate. In: BRADLEY, R.S., JONES, P.D. (Ed.), *Climate since AD 1500*. Routledge, London, 118–142.
- PFISTER, C., KINGTON, J., KLEINLOGEL, G., SCHÜLE, H., SIFFERT, E. (1994): The creation of high resolution spatio-temporal reconstructions of past climate from direct meteorological observations and proxy data. Methodological considerations and results. In: FRENZEL, B., PFISTER, C., GLAESER, B. (Ed.), *Climatic trends and anomalies in Europe 1675–1715. High resolution spatio-temporal reconstructions from direct meteorological observations and proxy data. Methods and results. Paläoklimaforschung, 13* (Akademie der Wiss. Mainz): 329–376.
- SPIECKER, H., MIELIKÄINEN, K., KÖHL, M., PETER, J. (1996): Growth trends in European forests – studies from 12 countries. Springer-Verlag, Heidelberg, 372 S.
- TURNER, M.G., ROMME, W.H., GARDNER, R.H., O'NEILL, R.V., KRATZ, T.K. (1993): A revised concept of landscape equilibrium: Disturbance and stability on scaled landscapes. *Landscape Ecology*, 8: 213–227.
- WATT, A.S. (1947): Pattern and process in the plant community. *J. Ecol.*, 35: 1–22.

Verfasser:

Prof. Dr. HARALD BUGMANN, Gebirgswaldökologie, Departement Forstwissenschaften, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.