

# Verbesserung der Klimaabhängigkeit der Wachstumsfunktion für Szenarienanalysen der Waldentwicklung (Holznutzungspotential, Nachhaltigkeit) KLIWAWA

Esther Thürig, Pascale Weber, Heike Lischke, Dirk Schmatz, Edgar Kaufmann, Hagen Zandt, Matthias Dobbertin, Andreas Zingg, Paolo Cherubini, Peter Waldner (WSL)

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, email: [vorname.nachname@wsl.ch](mailto:vorname.nachname@wsl.ch), Tel. 044 739 21 11

## 1 Hintergrund

Die Schweizer Waldwirtschaft ist mit Veränderungen konfrontiert. Änderungen der klimatischen Verhältnisse (IPCC, 2007) können die Wachstumsverhältnisse im Schweizer Wald beeinflussen und auch bei der Wahl standortsgerechter Baumarten nach Verjüngungen (verändertes Wachstum, Störungsanfälligkeit und Verbreitung) eine Rolle spielen. Ein möglicherweise auch in Zukunft weiter steigender Bedarf an Energieholz und neue Ernteverfahren haben einen Trend zu steigender Holznutzung ausgelöst und Potentialabschätzungen, sowie Überlegungen zur Nachhaltigkeit werden immer wichtiger. Mittels Simulationen mit verschiedenen Modellen können zukünftige Handlungsmöglichkeiten in der Waldwirtschaft getestet und mögliche Auswirkungen abgeschätzt werden. Die Umweltabhängigkeiten in bestehenden Waldmodellen (e.g. ForSAFE: Braun et al., 2008) sind allerdings unsicher; das empirische Modell MASSIMO (Thürig et al., 2005; Thürig & Kaufmann, 2008), welches das BAFU für die Holznutzungspotentialanalysen verwendet, geht bisher von konstanten Umweltbedingungen aus.

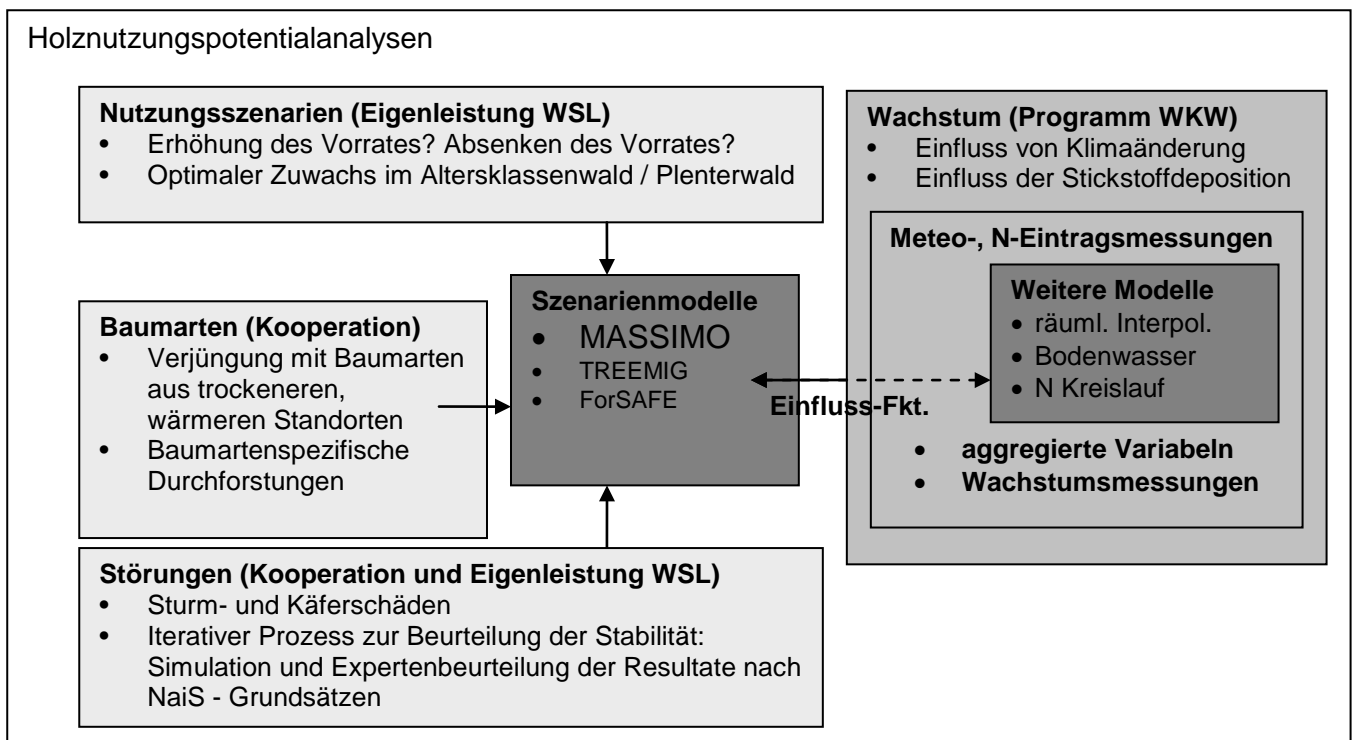


Abbildung 1. Wichtige Einflussfaktoren von Szenarienmodellen zur Abschätzung von Waldentwicklung und Holznutzungspotentialen.

Die Schwierigkeit in der Abschätzung des zukünftigen Waldwachstums liegt darin, die Auswirkung des Klimawandels vom Einfluss der kurzfristigen Variationen des Wetters, von anderen Umweltfaktoren (z.B. N) und von der Bestandesdynamik zu unterscheiden. Dieses Projekt nutzt unterschiedliche Datenquellen und Modelle aus, um die verschiedenen Einflüsse einzeln und in Kombination zu betrachten.

In dieser Studie sollen verbesserte Beschreibungen der Umweltabhängigkeiten für die Modellierung des Baumwachstums hergeleitet werden, und das Modell MASSIMO unter Einbezug der Resultate anderer Projekte ('PorTree' von Zimmermann et al.; 'Standortsensitivität' von Weber et al.), in Eigenleistungen der Gruppe Kaufmann, WSL (Störungen, Nutzungsszenarien) und mit den in dieser Skizze beantragten Mitteln (Wachstum) erweitert werden (Abbildung 1).

### **1.1 Aktueller Wissensstand**

Änderungen der Umweltbedingungen, insbesondere der klimatischen Verhältnisse (Begert et al., 2005), können über das Baumwachstum die Artenzusammensetzung und die Struktur im Schweizer Wald verändern (Theurillat & Guisan, 2001; Theurillat & Guisan, 2002).

Das Baumwachstum wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst: Neben der direkt auf die physiologischen Prozesse einwirkenden Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind dies die Verfügbarkeit von Licht, Nährstoffen und Wasser, wobei letzteres massgebend vom Niederschlag und der Wasserhaltekapazität des Bodens bestimmt wird.

#### **Auswirkung der Klimaänderung auf Wachstum**

In den gemässigten Breiten sind die Wasserverfügbarkeit (Zingg, 1996) die Temperatur (Kozłowski & Pallardy, 1996) und die Stickstoffverfügbarkeit während der potentiellen Vegetationsperiode die wichtigsten limitierenden Faktoren.

Höhere Temperaturen können zu einer Verschiebung der Vegetationsperiode und zu einer Verschiebung des Zuwachses auf Perioden mit ausreichender Wasserverfügbarkeit führen (Fabian & Menzel, 1999; Defila & Clot, 2001; Menzel et al., 2006). In auf unabhängigen Daten basierenden Studien wurde in der Schweiz insbesondere in tieferen Lagen eine teilweise beträchtliche Zunahme des Stammwachstums gefunden (Jahringdaten: Bräker, 1996; Stamm-Umfang Forstinventare: Köhl, 1996; Ertragskundliche Flächen: Zingg, 1996; rekonstruiertes Höhenwachstum: siehe in Dobbertin, 2005).

Vermehrte Trockenperioden, wie zum Beispiel in der Periode von 1940 bis 1950 oder im Sommer 2003, können den Zuwachs niederschlagslimitierter Bestände allerdings auch weiter einschränken. Dabei reagieren Fichte und Buche empfindlicher auf Wassermangel als Eiche und Tanne (Zingg & Bürgi, 2008). Eddy-Covariance Studien an verschiedenen Flux-Sites in Europa fanden eine Abnahme der Primärproduktion im Sommer 2003 (Ciais et al., 2005). Auf den Flächen der langfristiger Forschungsflächen (LWF) war das Baumwachstum im Jahr 2003 in den tieferen Lagen (unterhalb von 1200 m) geringer und in höheren Lagen grösser als im Vor- und den Folgejahren (Dobbertin, 2005; Jolly et al., 2005). Die Zuwachsveränderung korrelierte gut mit der Veränderung des Verhältnisses der aktuellen zur potentiellen Evapotranspiration (Graf Pannatier et al., 2007).

#### **Auswirkung der Stickstoffdeposition auf Wachstum**

Die N-Deposition auf den Wald hat in Europa im 20. Jahrhundert stark zugenommen (Schöpp et al., 2003; Rihm & Kurz, 2008) und überschreitet in Teilen der Schweiz die Critical Loads (Rihm, 1996; Thimonier et al., 2005; Waldner et al., 2007). Die oben erwähnte Zunahme des Baumwachstums wird je nach Studie in unterschiedlichem Ausmass auf die erhöhte N-Deposition zurückgeführt (Spiecker et al., 1996; Mellert et al., 2008): Die Übertragung der Kennwerte von Nadelhoffer et al. (1999), Solberg et al. (in press) und Magnani et al. (2007) auf die Zunahme des Stickstoffeintrags im Schweizer

Mittelland ergeben für die mittlere Zuwachszunahme Werte zwischen rund 2 und 40 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> (de Vries et al., 2008). Stickoxid- und Ammoniakemissionen können das Wachstum je nach Standortverhältnissen zudem über eine beschleunigte Versauerung des Waldbodens (Cronan et al., 1989; Graf Pannatier et al., 2004) und den Sekundärluftschadstoff Ozon (Schaub, 2005) beeinflussen. So erklärten Braun & Flückiger (2009) eine auf sensitiven Flächen im Norden der Schweiz beobachtete Abnahme des Zuwachses mit Wurzelschädigungen und Nährstoffungleichgewichten.

### **Auswirkung der Konkurrenz auf Wachstum**

Die erwähnten abiotischen Umwelteinflüsse werden überlagert durch Effekte der intra- und interspezifischen Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe am Standort (Vanclay, 1994; Kozłowski & Pallardy, 1996). Die Konkurrenz wird bestimmt durch die Artenzusammensetzung und Waldstruktur (Weber et al., 2008), auch beeinflusst durch das Waldmanagement.

### **Wechselwirkungen**

All diese Faktoren wirken teilweise adhoc (z.B. Temperatur), teilweise episodisch (z.B. Windwurf, siehe Usbeck et al., 2009) und oft liegen dynamische Prozesse unterschiedlicher Geschwindigkeit zugrunde, z.B. für den Bodenwasserhaushalt, den Nährstoffkreislauf oder die Waldentwicklung. Dies bedeutet, dass einzelne Zusammenhänge nicht isoliert aus Wachstumsdaten extrahiert werden können, sondern das Wechselspiel der Faktoren und ihrer Dynamik berücksichtigt werden muss. Die dazu benutzten Wachstumsdaten sollten idealerweise eine hohe zeitliche Auflösung aufweisen, lange Zeiträume abdecken und für jede relevante Art ihre gesamte ökologische Nische abdecken.

### **Modelle**

#### *MASSIMO*

Das Waldentwicklungs- und Waldbewirtschaftungsmodell MASSIMO (Kaufmann, 2001) ist ein empirisches, dynamisches distanz-unabhängiges Einzelbaummodell, welches die Entwicklung der einzelnen Bäume anhand ihres Durchmessers (BHD) modelliert. Das Modell besteht aus den vier Teilmodellen Wachstum, Bewirtschaftungs-Szenarien, Mortalität und Verjüngung. Diese vier Teilmodelle wurden empirisch aus den Daten des Schweizerischen Landesforstinventar (LFI) 1 und 2 (1983-1985, Mahrer et al., 1988; 1993-1995, Brassel & Brändli, 1999) hergeleitet. Die Wachstumsfunktionen (validiert in Thürig et al., 2005) berechnen in Zehnjahresschritten den Grundflächenzuwachs der einzelnen Bäume als Funktion von Waldstruktur, Standorts- und Konkurrenzbedingungen. Das Modell wurde schon mehrfach verwendet, um Holznutzungspotentialanalysen für die nächsten Jahrzehnte zu berechnen (Thürig & Kaufmann, 2008; Thürig & Kaufmann, submitted). Weil jedoch das empirische Modell von konstanten Umweltbedingungen ausgeht, werden in der aktuellen Version jegliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Zuwachs vernachlässigt.

#### *ForSAFE*

Das Modell ForSAFE (Wallman et al., 2005) wurde konzipiert, um den bisherigen statistischen Ansatz der Critical Loads-Berechnungen (siehe Rihm & Kurz, 2001) mit einem dynamischen Ansatz, welcher die zeitliche Entwicklung der Stickstoff- und der versauernden Einträge berücksichtigt, zu ersetzen. Im Modell werden Waldbestände mit mehreren Boden- und Vegetationsschichten, der Wasserhaushalt und die bio-geochemischen Prozesse dargestellt. Eine Stärke des Modells ist, dass es eine detaillierte Beschreibung der Verwitterung enthält, mit welchen die bisherigen Critical Loads Exceedance Maps erstellt wurden (Kurz et al., 1998). Das Modell wird im Rahmen des Projekts 'ForSAFE-LWF' (D. Kurz) getestet und weiterentwickelt.

## TREEMIG

Das Modell TREEMIG (Lischke et al., 2006) simuliert die raumzeitliche Entwicklung von räumlicher Struktur und Artenzusammensetzung gemässigter und borealer Wälder. Es beschreibt die Prozesse Wachstum, Mortalität, Konkurrenz, Samenproduktion, Samenverbreitung und Jugendentwicklung von Bäumen verschiedener Arten. Die Klimaabhängigkeiten in TREEMIG wurden von Vorläufermodellen (z.B. ForClim, Bugmann, 1996) übernommen, für die sie wiederum aus grossräumigen Verbreitungsgrenzen und Klassifikationen (e.g. Feuchtezahl, Landolt, 1977) hergeleitet wurden. Rickebusch et al. (2007) passten die Temperaturabhängigkeit des Wachstums der Arten an der alpinen Baumgrenze an Jahrringdaten an.

## Pilotstudie

In einer momentan laufenden Test-Studie (Lischke et al., unpubl.) versuchen wir, mit einfachen Verfahren die Trockenstress-Abhängigkeitsfunktion des Wachstums in TREEMIG für einige Arten der trockenen Baumgrenze zu verbessern. Dazu werden Jahrringdaten aus dem Wallis, LFI 1/2-Wachstumsdaten und herabskalierten Wetterdaten verwendet. Erste Ergebnisse zeigen das Potential, verschiedene Daten zusammen zu verwenden: der BHD-Zuwachs aus den LFI Daten und die über 10 Jahre integrierten Jahrringbreiten unter verschiedenen Trockenheitsbedingungen sind konsistent. Allerdings weist die Studie auch auf erste Herausforderungen hin. So ist die in TREEMIG verwendete Trockenstressfunktion sehr sensitiv auf die Temperatur und die Wasserhaltekapazität, die beide v.a. bei den Jahrringdaten nur sehr ungenau gegeben sind.

## Forschungslücken

Soweit uns bekannt ist, wurden die vorhandenen Datengrundlagen zum Zuwachs noch nie gesamthaft über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen homogenisiert und in Kombination angewendet, um die Abhängigkeit des Zuwachses von sich zeitlich schnell ändernden Umweltfaktoren zu analysieren.

Bisherige Studien auf Basis der *LFI-Daten* decken nur den Einfluss von sich langsam ändernden Faktoren wie Bestandes- und Standortfaktoren gut ab. Der Einfluss von sich schnell ändernden Umweltfaktoren wie jährlichen Klimawerten oder Stickstoffeintrag war jedoch aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung der Wachstumsmessung und dem Fehlen von adäquaten Werten für die Umweltfaktoren nur ungenau bestimmbar.

Studien, welche auf *Jahrringanalysen* basieren, konnten aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung den Einfluss der Umweltfaktoren gut bestimmen, haben aber meist keine gleich gute Repräsentativität der Bestandes- und Standortfaktoren. Der Verlauf der Konkurrenzsituation der untersuchten Bäume, über die meist keine Beobachtungen vorliegen, kann heute zwar rekonstruiert werden, allerdings mit einer gewissen Unsicherheit (Weber et al., 2008).

Im Vergleich zu den Jahrringdaten liegen bei *Ertragskundeflächen* Beobachtungen über die Konkurrenzsituation von Einzelbäumen und zur Entwicklung ganzer Waldbestände vor. Kurzfristige Einflüsse der Umweltfaktoren und die Einflüsse der Bestandes- und Standortfaktoren können jedoch wegen der geringeren zeitlichen Auflösung weniger umfassend untersucht werden.

Die *LWF-Flächen* wiederum eignen sich zur Untersuchung der kurzfristigen Einflüsse der Umweltfaktoren und zur Erkennung von langfristigen Veränderungen der Standortfaktoren, decken aber nur wenige Situationen und Standorte ab.

Seit kurzem liegen räumliche interpolierte und zeitlich *hochaufgelöste Datensätze* für die *Umweltfaktoren* vor. Eine geschickte Aggregation all dieser Datensätze auf die Perioden der jeweiligen Wachstumsmessungen wird es ermöglichen, die Vorteile der verschiedenen Datensätze zu kombinieren und damit den Einfluss der Umweltfaktoren mit einer hohen Abdeckung der Bestandes- und Standortfaktoren bestimmen zu können.

## **1.2 Nationale und internationale Bedeutung**

Die Marktsituation in der Waldwirtschaft ändert sich mit den Preisen für Energie und dem Rohstoff Holz fast monatlich, Klimaextreme wie Sturm oder Trockenheit wirken auf den Wald ein und prognostizierte Klimaänderungen lassen eine längerfristige Anpassungen der Baumarten teilweise notwendig erscheinen. Somit nimmt die Bedeutung von Modellen zur Abschätzung der Auswirkungen verschiedener Handlungsweisen zu.

### **Internationale Bedeutung**

Das LFI, die Sanasilva-Untersuchungen und die LWF haben ihre Erhebungsmethoden mit den Partnernetzen in den meisten europäischen Ländern abgeglichen (Verbund der NFI's, ICP-Forests level I und II siehe ICP-Forests, 1994). Nur in wenigen Ländern sind die drei Messnetze so gut miteinander verbunden und die Voraussetzungen für das 'up- and downscaling' so gut wie in der Schweiz. Durch die gute Vergleichbarkeit der Erhebungsmethoden bestehen gute Aussichten, dass ein Teil der Erkenntnisse aus diesem Projekt relativ einfach in Ländern mit vergleichbaren Bestandes- und Standortcharakteristika anwendbar sind.

## **1.3 Verbindung zu anderen Forschungsprojekten (FP) der Antragsteller**

- FP 'Standortsensitivität' (BAFU) (*Weber, Walthert*)
- FP 'MEPHYSTO: Verbesserung der Formulierung des Trockenstresses und seiner Auswirkungen in TREEMIG' (COST FP0603) (*Lischke*)
- FP 'Yasso 07: Bodenkohlenstoffmodellierung mit Yasso07 und LFI 3 Daten' (BAFU) (*Hagedorn, Thürig*)
- Cost Action E52 'Growth potential and drought sensitivity of beech close to the dry distribution limit' (*Rigling, Bugmann, Walthert, Weber*)
- Cost Action FP703 'ECHOES, Expected Climate Change and Options for European Silviculture' (*Dobbertin*)
- Cost Action FP903 'Climate Change and Forest Mitigation and Adaptation in a Polluted Environment' (*Dobbertin, Waldner et al.*)
- Projektantrag 'BarBeeKey': Untersuchung und Modellierung der Wechselwirkung Borkenkäfer- und Wald-Dynamik in sich änderndem Klima (*Wermelinger, Lischke et al.*)
- Projektantrag 'ForSAFE-LWF': (*Kurz, Waldner et al.*)

## **2 Ziele**

### **2.1 Forschungsziele**

Ziel dieses Projektes ist es, den Einfluss der Temperatur, des Niederschlags und des Stickstoffeintrags auf das modellrelevante Wachstum mittels vorhandener Datengrundlagen zu analysieren, voneinander und von weiteren Einflüssen zu separieren, und Abhängigkeitsfunktionen für die Szenarienmodelle zu erarbeiten.

### **2.2 Hypothesen**

- 1) Durch die Klimaänderung verändert sich der standortsbezogene Zuwachs von Baumarten.
- 2) Auf Grund starker Interaktionen kann der Einfluss einzelner relevanter Umweltfaktoren wie zum Beispiel Vegetationsperiode, Trockenstress und N-Verfügbarkeit nicht isoliert betrachtet werden, sondern nur in Kombination.

- 3) Weitere Einflüsse (z.B. Baumalter, Management, Störungen) können durch geeignete Standardisierungs- und Auswertetechniken aus den kombinierten Datensätzen herausgefiltert werden.

### 2.3 Einbindung und Anwendung der Resultate im Programm Wald & Klima

Dieses Projekt liefert sowohl einen Beitrag zum Arbeitspaket 1 (Grundlagen und Entwicklungsszenarien), wie auch zum Arbeitspaket 2 (Waldleistungen und Ressourcen). Mit der Kombination verschiedener Daten aus LFI, Ertragskunde, LWF und Jahrringen kann die Zuwachsfunktion bestehender Modelle klimasensitiv formuliert und parametrisiert werden. Mittels dieser verbesserten Funktionen werden Szenarien zu Holznutzungspotentialen und der Entwicklung der Wälder als Kohlenstoffsenke, bzw. -quelle unter veränderten Umweltbedingungen erstellt. Diese Szenarien können einen Beitrag leisten zur Planung der zukünftigen Schweizer Wald- und Holzwirtschaft.

## 3 Daten und Methoden

In diesem Projekt werden verschiedene Umwelt- und Zuwachsdaten zusammengestellt und aufbereitet, um damit verbesserte Einflussfunktionen für das Wachstum in Modellen herzuleiten. Die Daten unterscheiden sich bezüglich ihrer Detaillierung und ihrer zeitlichen, so wie räumlichen Auflösung (Tabelle 1). Der kombinierte Einfluss von Temperatur, Niederschlag und Stickstoffeintrag auf den Zuwachs wird für die einzelnen Standorte mittels multivariater Funktionen ausgedrückt. Die Funktionen werden schweizweit angewendet und mittels LFI-Daten validiert. Kombiniert mit den Modellanpassungen bezüglich Baumarten, Störungen und Nutzung, und unter Einbezug von IPCC Klimaszenarien, werden zukünftig zu erwartende schweizweite Holznutzungspotentiale mit MASSIMO erstellt.

### 3.1 Baumwachstumsdaten

Tabelle 1: Datengrundlage über das Wachstum mit Vor- und Nachteilen (vereinfacht).

	<b>LFI</b>	<b>Ertragskunde</b>	<b>Jahrringe</b>	<b>Sanasilva / LWF</b>
<b>Zeitl. Auflösung</b>	- tief (10 Jahre)	± 3 bis 10 Jahre	+ hoch (1 Jahr)	+ hoch (<= 1 Jahr)
<b>Zeitliche Ausdehnung</b>	- mittel (20 Jahre)	+ 20 bis >100 Jahre	+ hoch (Jahrhunderte)	+ 10 Jahre detailliert + ergänzt mit Jahrringen
<b>Räumliche Abdeckung</b>	+ repräsentatives Stichprobenetz (ca. 6000 Probepunkte)	- ausgewählte Standorte	- ausgewählte Standorte	- zwischen 48 und 700 Sanasilva-Flächen und 18 LWF-Flächen über die Schweiz verteilt
<b>Bestand</b>	+ alle Baumarten und Waldtypen	+ zuwachsstark	- ausgewählte Baumarten	- Sanasilva: alle LWF: wenige wichtige Baumarten
<b>Jährliche Variation von Einflussfaktoren</b>	- Nur Mittelwerte über 10 Jahre	- Interpolation nötig	- Interpolation nötig	<b>LWF:</b> + 10 J. Meteo (in-situ) + 10-30 J. N-Deposition + Frass, Mastjahre, etc.
<b>Weitere Vorteile</b>	+ Anknüpfung Sanasilva, NaiS	+ Grundlage Ertragstafeln	+ etablierte Dendromethoden	+ physiol./bio-geochem. Messgrößen

### LFI

Das LFI wurde in der Schweiz bisher zu drei Zeitpunkten erhoben (LFI 1: 1983-1985, Mahrer et al., 1988; LFI 2: 1993-1995, Brassel & Brändli, 1999; LFI 3: 2004-2006<sup>1</sup>). Auf einem regelmässigen Netz von 1.4 km wurden ca. 6000 permanente Stichprobenpunkte

<sup>1</sup> <http://www.lfi.ch/resultate/lfi3.php> (12.7.2009)

mit durchschnittlich ca. 13 Bäumen erhoben. Das LFI ist die einzige schweizweit repräsentative Datengrundlage betreffend Vorrat, Zuwachs, Nutzung und Mortalität.

### **Ertragskundliche Daten**

Seit 1886 wurden insgesamt 160 Versuchsflächen (mit 550 Teilflächen) in Rein- und Mischbeständen eingerichtet, auf denen alle 4 bis 12 Jahre eine Messung durchgeführt wird, bzw. wurde (Zingg & Bachofen, 1998). Die Flächen sind im Mittel rund 0.3 ha gross und weisen teilweise sehr lange (>100 Jahre) Messreihen auf. Vertreten sind alle Regionen der Schweiz, allerdings nicht repräsentativ für Baumarten und Waldtypen. Auf den Flächen wird bei allen Bäumen mit einem bestimmten Mindestdurchmesser (Kluppschwelle: 0 - 8 cm) der Durchmesser auf 1.3 m Höhe (BHD) an markierten Stellen kreuzweise auf den mm genau gemessen und weitere Ansprachen (z.B. soziale Stellung) durchgeführt. Auf den Flächen wird bei einem Teil der Bäume (Subset) die Baumhöhen und seit ca. 1950 Jahren auch der Durchmesser in 7 m Höhe sowie 4 Kronenradien gemessen.

### **Jahrringdaten**

Obwohl für die Schweiz relativ viele Jahrringchronologien verschiedener Baumarten vorliegen, sind georeferenzierte Chronologien relativ rar. Die Koordinaten sind jedoch nötig um die Umwelt-, Standorts- und Bestandesfaktoren zuordnen zu können. Für dieses Projekt stellen wir erstmals die verfügbaren georeferenzierten Chronologien zusammen, wozu insbesondere auch jene des Projektes „Standortsensitivität“ (Weber et al.) und die Jahrringdaten der Flächen der Ertragskunde und des LWF gehören.

### **Sanasilva**

Die Sanasilva-Aufnahmen werden jährlich auf einem Teil der LFI-Flächen durchgeführt, und zwar von 1985-1992 auf dem 4x4 km Netz, in den Jahren 1993,1994 und 1997 auf dem 8x8 km Netz und in den restlichen Jahren auf dem 16x16 km Netz. Für die Bäume auf diesen Flächen wird der Kronenzustand inklusive Fraßschäden und Samenanhang, und die Kronenkonkurrenz aufgenommen und der BHD auf den cm genau gemessen.

### **LWF**

Auf den 18 LWF-Flächen (ca. 2 ha) wird alle 5 Jahre eine Stammumfang- und Baumhöhenmessung aller Bäume mit BHD > 12 cm durchgeführt (auf ein bis zwei 0.5 ha Unterflächen ab BHD > 5 cm). Seit 2001 wird bei einem Teil der Bäume einmal jährlich der Umfang mit Hilfe manueller Umfangmessbänder (Genauigkeit 0.1 mm) abgelesen. Auf drei Flächen sind zudem elektronische Umfangmessbänder im Einsatz, welche den Umfang stündlich aufzeichnen.

## **3.2 Umweltfaktoren**

Auf den LWF-Flächen werden die wichtigsten Umweltfaktoren und deren Einfluss auf die Wasser- und Stoffkreisläufe im Ökosystem nach den Methoden von ICP-Forests (1994) kontinuierlich gemessen (z.B. Meteorologische Parameter, Bodenfeuchte, Deposition, Streufall, Bodenlösung, Ozonbelastung, siehe z.B. Graf Pannatier et al., 2004; Thimonier et al., 2005; Waldner et al., 2007). Ebenso werden die Bestandes- und Standortfaktoren und deren räumliche Variabilität periodisch erhoben (Baumbestand, Blattspiegelwerte, Blattflächenindex, Bodenvegetation, Bodenchemie und -physik, siehe z.B. Walthert et al., 2003).

### **Klima**

Die Messdaten der Meteostationen der Schweiz können mit geeigneten Methoden (z.B. Daymet, Thornton et al., 1997) zu täglichen Karten in 100 m Auflösung räumlich interpoliert werden. Für Zeiträume ab 1900 können monatliche Rasterkarten des CRU-

Datensatzes (Mitchell & Jones, 2005) mit Hilfe der Anomalien-Methode von einer räumlichen Auflösung von 10'' ebenfalls auf 100 m herabskaliert und mit den monatlichen Daymet-Daten kombiniert werden. Zurzeit sind für die Schweiz Rasterkarten mit einer räumlichen Auflösung von 100 m und einer hohen zeitlichen Auflösung für den Zeitraum 1930 bis 2006 verfügbar (Tageswerte: minimale, mittlere und maximale Temperatur, Niederschlag, kurzweilige Einstrahlung - Monatswerte: potentielle Evapotranspiration, Feuchte-Index mind).

Globale Klimawandelszenarien, basierend auf den vier Storylines des IPCC-Berichtes und auf vier globalen Zirkulationsmodellen, liegen für Europa auch als monatliche Karten mit einer räumlichen Auflösung von 10'' für 2000 bis 2100 vor (CRU Datensatz) und können für die Schweiz ebenfalls auf 100 m herabskaliert und mit den monatlichen Daymet-Daten kombiniert werden.

### **Stickstoffdeposition**

Im Rahmen der Genfer Konvention wird die N-Deposition in Europa aufgrund von nationalen Emissionskatastern, einem Transportmodell und Immissionsmessung mit einer räumlichen Auflösung von 50 km und hoher zeitlicher Auflösung modelliert (Schöpp et al., 2003). Mit diesen Modelresultaten und weiteren nationalen Daten (z.B. NABEL, siehe BAFU, 2008) wurde die N-Deposition in der Schweiz seit 1900 mit einer räumlichen Auflösung von 1 km rekonstruiert (Rihm & Kurz, 2008). Die modellierte N-Deposition können mit den Messungen auf den LWF-Flächen verglichen werden (Thimonier et al., 2005).

### **Wasserverfügbarkeit**

Es existieren komplexere (PF-Kurven basierte, siehe z.B. Christiansen et al., 2006) und einfachere (bucket models, Bugmann & Solomon, 1995) Bodenwasserhaushaltsmodelle zur Abschätzung des Trockenstresses. Für diese Berechnung werden neben Klimadaten auch Informationen über das Wasserspeichervermögen (z.B. nutzbare Feldkapazität, Bucketsize, Wasserhaltekapazität) des Bodens an den Standorten benötigt. Diese Informationen wurden bei einem Teil der Standorte erhoben und müssen für die anderen mittels einfacher Regressionen (Pedotransferfunktionen) anhand beispielsweise der Bodeneignungskarte der Schweiz (Frei et al., 1980) abgeschätzt werden (variability siehe Löffler & Lischke, 2001).

## **4 Forschungsplan**

Das Vorgehen beinhaltet folgende, teilweise iterativ durchgeführte Schritte:

### **1. Herleiten der Daten und Umweltfaktoren:**

- 1.1. Inputdaten: Klima-, N-Deposition-, und Bodendaten werden zusammengetragen und – wo nötig – auf die Orte der unterschiedlichen Baumwachstumsdaten interpoliert. Dieser Arbeitsschritt wird im 3. Jahr mit den neusten verfügbaren Daten wiederholt.
- 1.2. Baumdaten: Auch die Baumwachstumsdaten werden zusammengetragen und auf gleiche Einheiten umgerechnet. Wo notwendig (z.B. bei älteren Jahrringdatensätzen) werden die Daten, v.a. die Jahrringstandorte, genauer georeferenziert und hinsichtlich ihrer Qualität gewichtet, ggf. aus der Analyse ausgeschlossen.
- 1.3. Standardisieren der Daten:  
Um den Klima-unabhängigen Teil des Wachstums, d.h. Alterseffekte, Konkurrenz und exogene Störungen aus den Jahrringdaten herauszufiltern, müssen Jahrringserien und Zuwachsdaten standardisiert werden. Dazu werden verschiedene Ansätze verwendet, z.B. die Software ARSTAN in der Dendrochronologie (Cook, 1985; Holmes, 1994). Für gewisse Anwendungen wie



das Herausfiltern einer Klimaresponse werden baumarten- und standortspezifische Jahrringchronologien (Mittelkurven) verwendet, für andere Anwendungen wie jährliche Zuwachswerte werden Rohwerte und standardisierte Jahrringserien, aber auch Basalflächenzuwachsreihen von Einzelbäumen zusammen verwendet. Ein einfaches Verfahren ist die Verwendung jeweils nur der stärksten Zuwächse pro Umwelteinfluss-Klasse (Rickebusch et al. 2007), unter der Annahme, dass diese die jeweiligen optimalen Bedingungen widerspiegeln. Die Daten können auch direkt passend für die Waldmodelle standardisiert werden: In TREEMIG z.B. ist die Wachstumsfunktion ein Produkt aus einem Maximalwachstum, einem BHD-, einem Licht- und einem Klima-abhängigen Term. Durch Division durch den BHD-Term und durch den Lichtterm kann der reine Klimaeinfluss erfasst werden.

1.4. Umwelteinflüsse: Herleiten baumwachstumsrelevanter Umwelteinflüsse (bioklimatische und biogeochemische Variablen) wie Vegetationszeit, Trockenstress, N-Verfügbarkeit mit einer zeitlich hohen Auflösung aus den Input-Daten, zum Beispiel mittels bioklimatischer Funktionen aus TREEMIG (Lischke et al., 2006) oder Nährstoffkreislaufmodellen (e.g. ForSAFE: Braun et al., 2008):

- Überprüfen und Anpassen der Gradtagverfahren zur Bestimmung von Blattaustrieb und Blattfall anhand von Messdaten (LWF).
- Rekonstruktion der Wasserverfügbarkeit mit Wasserhaushaltsmodellen welche mit LWF-Daten kalibriert oder validiert werden und ableiten von Stressindikatoren.
- Abschätzen der zeitlichen Verzögerung zwischen atmosphärischer Deposition oder Managementeingriff und Nährstoffverfügbarkeit für verschiedene Pathways (rasche Aufnahme über Makroporen, Veränderung des Bodenwassers in den feinen Poren, Knospen und Blattbildung und gesteigerte Photosynthese, Streuabbau).
- Aggregieren der Umwelteinflüsse für verschiedene Zeitintervalle.

## 2. Herleiten der Funktionen: Iterative Ausführung folgender Arbeitsschritte

2.1. Statistische Grundlagen: Mithilfe einfacher Korrelationen sowie dendroökologischer statistischer Methoden werden Zusammenhänge zwischen Zuwachs und Umwelteinflüssen über verschiedene wachstumsrelevante Zeitperioden analysiert (z.B. Weber et al., 2007). Dabei wird die Abhängigkeit von klimatischen Faktoren wie Temperatur, Niederschlag, Trockenheit, (Spät-)frost und die Einstrahlung untersucht. Ausserdem soll auch der Einfluss der Nährstoffverfügbarkeit am Standort (generelle Auswirkung auf den potentiellen Zuwachs) und der Einfluss der N-Deposition (Veränderung im Zuwachs über die Zeit) analysiert werden.

2.2. Physiologische Grundlagen: Bestimmen der zeitlichen Form potentieller multivariater Abhängigkeitsfunktionen zwischen Wachstum und Umwelteinflüssen basierend auf physiologischen Grundlagen. Korrelation der Wachstumsdaten mit für unterschiedliche zeitliche Verzögerungen aggregierten Umwelteinflüssen.

2.3. Schätzen der Parameter: Die zeitlich hoch aufgelösten Umwelteinflüsse (Tage bis Monate) aus 1.4 werden für die wachstumsrelevante Perioden (Saison bis mehrere Jahre) aggregiert und mit der Form aus 2.2 wird der Einfluss der einzelnen Variablen für möglichst viele Standorte quantifiziert.

## 3. Modellieren und Validieren:

3.1. Modellerweiterung: Die parametrisierten Funktionen aus 2.3 werden in MASSIMO, TreeMig und allenfalls weitere Modelle eingebaut.

3.2. Inverse Modellierung: Die Umwelt-Abhängigkeitsfunktionen können mit einem „inversen Ansatz“ verfeinert werden. Dazu wird das Baumwachstum mit den in den Modellen implementierten, von allen Einflussgrößen abhängigen, neuen Wachstumsfunktionen simuliert, mit den empirischen Zuwachswerten verglichen.

Bei Abweichungen werden die Parameter feiner abgestimmt (fine-tuning). Damit werden dynamische Effekte, z.B. des N-Kreislaufes oder der Bestandesdynamik mit betrachtet, die nicht als Zusatz-Daten erhoben wurden.

- 3.3. Validation: Zur unabhängigen Überprüfung des modellierten Zuwachses dienen Verfahren aus der Kreuzvalidierung und LFI-Daten aus Liechtenstein.
- 3.4. Sensitivitätsanalyse: Durch systematisches Verändern der einzelnen Funktionsteile und Parameter wird der Unsicherheitsbereich der Funktionen und Parameter untersucht.

#### 4. Modellintegration und –anwendung:

- 4.1. Modellintegration: Die in dem vorliegenden Projekt erarbeitete Modellanpassung der Zuwachsfunktion wird zusammen mit den Resultaten aus verwandten Projekten zu Baumarten (Projekt PorTree), Störungen (Gruppe Kaufmann) und Nutzungsszenarien (Gruppe Kaufmann) im Modell MASSIMO integriert.
- 4.2. Modellanwendung: Mit dem verbesserten Modell werden umweltabhängige, schweizweite Holznutzungspotentialanalysen erstellt für die nächsten 50-100 Jahre erstellt.

KliWaWa

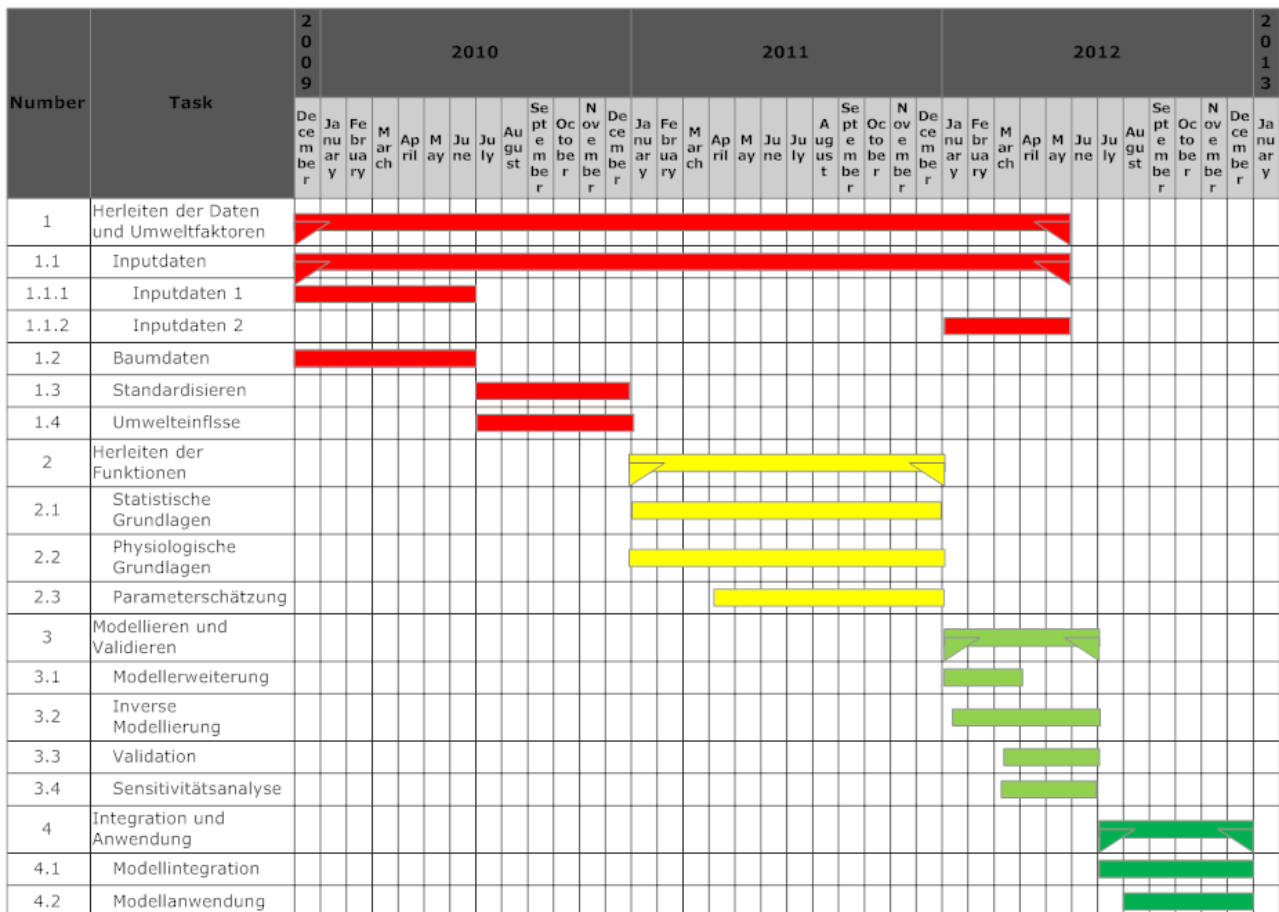


Abbildung 2. Gantt-Diagramm der thematischen und zeitlichen Planung des Projektes.

#### 4.1 Detailliertes Budget (in CHF)

Posten	Tasks	Eigenleistung	Programm
PhD Student	Wachstum		185'000
E. Thürig, 20%	LFI, MASSIMO	70'000	
E. Kaufmann, 20%	LFI, Nutzung	70'000	
H. Zandt, 20%	MASSIMO, Störungen, Waldverjüngung	70'000	
D. Schmatz, 5%	Daymet	12'500	5'000
H. Lischke, 5%	TREEMIG	17'500	
P. Waldner, 20%	LWF, Analysen	50'000	20'000
P. Weber, 10%	Jahrringe	35'000	
P. Cherubini, 5%	LWF, Bestandesgeschichte	17'500	
PraktikantIn	Jahrringdaten interpretieren		5'000
A. Zingg, 5%	Ertragskunde	17'500	
<b>Summe</b>		<b>360'000</b>	<b>215'000</b>

## 5 Antragsteller und Forschungsplatz

### 5.1 Forschungsteam und dessen Aufgaben

Alle Mitglieder des Forschungsteams arbeiten an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL in Birmensdorf:

*Esther Thürig* erarbeitete eine Dissertation im Gebiet der empirischen Waldmodellierung mit Landesforstinventar (LFI) Daten und arbeitet seither als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Auswertung, Analyse und Modellierung der neuesten LFI-Daten.

*Pascale Weber* hat in ihrer Dissertation den Einfluss der Trockenheit und der Landnutzung auf die Konkurrenz zwischen Waldföhre und Flaumeiche im Wallis erforscht. Seither untersucht sie das Wachstum der Baumarten in deren Verbreitungsgebiet durch Kombination von Methoden der Bodenökologie und der Jahrringanalyse.

*Heike Lischke* hat langjährige Erfahrung in der dynamischen ökologischen Modellierung, insbesondere mit dem klimagetriebenen räumlichen Waldmodell TREEMIG, in der Parametrisierung und Validation mit Wald-Daten (LFI, Pollen, Jahrringe), und in verschiedenen Anwendungen von populationsdynamischen Waldmodellen.

*Peter Waldner* arbeitet seit Jahren im Gebiet der Wasser- und Nährstoffkreisläufe von hydrologischen Einzugsgebieten und Waldökosystemen und hat vertiefte Kenntnisse der Erhebungen des LWF und von deren Auswertungen.

*Dirk Schmatz* hat langjährige Erfahrung im Umgang mit grossen Datensätzen, komplexen Datenmodellen, Datenbank-Techniken sowie High performance computing. Er berechnet Klimakarten und entwickelt Methoden zur Herabskalierung von Klimadaten und -szenarien.

*Hagen Zandt* programmiert die Weiterentwicklungen des Modells MASSIMO und implementiert Module zur Regeneration und zu Störungen.

*Matthias Dobbertin* leitet die Sanasilva-Erhebungen und die Forschungseinheit 'Waldökosystemprozesse', welche einen grossen Teil der LWF-Erhebungen durchführt. Er ist Experte für Waldzustandsbeurteilung und Wachstum und Chairman des Expert-Panel Forest Growth von ICP-Forests.

*Paolo Cherubini* leitet die Gruppe "Baumphysiologie", ist Experte in Dendrologie und hat die Bestandesgeschichte und die Jahrringanalysen der LWF-Flächen erhoben.

*Andreas Zingg* leitet seit mehr als 15 Jahren die Ertragskunde/Waldwachstumsforschung der WSL und damit verantwortlich für die Aufnahmen und die wissenschaftliche Betreuung der ertragskundlichen Versuchsflächennetzes.

*Edgar Kaufmann* leitet die Gruppe 'Ressourcenanalyse und Prognosen'. Er entwickelte das empirische Modell MASSIMO aus den LFI 1 und 2 Daten und hat langjährige Erfahrung im Bereich der empirischen Modellierung von Waldnutzungsszenarien und deren Statistiken.

## **5.2 Nationale und internationale Zusammenarbeit**

Forschungsprojekte, in denen die verwendeten Daten erhoben wurden/werden, sowie:

- Projektantrag 'PorTree' (Zimmermann, et al.): Wie ändern sich die potentiellen Gleichgewichts-Baumarten unter veränderten Umweltbedingungen?
- Projekt 'Physiologische Reaktionen von Bäumen auf den Klimawandel' (R. Zweifel): Die Zusammenarbeit mit diesem Projekt erlaubt es, die physiologischen Zusammenhänge hinter den im vorliegenden Projekt hergeleiteten Funktionen besser zu verstehen.
- COST-Aktion FP0603 'Forest models for research and decision support in sustainable forest management' (H.Lischke, CH-Vertreterin): Diese Aktion beinhaltet die Einführung von physiologischen Zusammenhängen und Klimaabhängigkeiten in mehrere Waldmodelle und verspricht daher grosse Synergieeffekte.

## **6 Erwartete Resultate, Umsetzung**

### **6.1 Erwartete wissenschaftliche und soziale Bedeutung**

Verbesserte Funktionen und Parameter, zur Beschreibung des Einflusses der Klimaparameter und N-Deposition auf das Baumwachstum welche das Modell MASSIMO entscheidend verbessern und auch in anderen Waldmodellen verwendet werden können. Waldwachstumssimulationen für die Schweiz unter Berücksichtigung von sich jährlich ändernden Umwelteinflüssen.

### **6.2 Anwendung und Umsetzung der Forschungsergebnisse**

Verlässlichere Holznutzungspotentialanalysen als Basis zur Beurteilung und Planung zukünftiger Trends in der Wald- und Holzwirtschaft.

Verbesserte Aussagen über jährliche C-Senkenwirkung des Schweizer Waldes unter Berücksichtigung der Wetterentwicklung und anderer Umweltfaktoren.

### **6.3 Beitrag zur Programmsynthese**

- Szenarien der Waldentwicklung bezüglich Vorrat, Zuwachs und Nutzung unter veränderten Umwelt- und Klimabedingungen.

### **6.4 Publikation der Resultate**

- Wissenschaftlich: 3-4 Publikationen in international anerkannten Zeitschriften.
- Anwendung: Publikation der modellierten Holznutzungspotentialanalysen in der Zeitschrift *Wald und Holz* oder *SZF*, falls erwünscht Vorträge zum Thema (Bund, HIS, Lignum, WVS, KOK, usw.).

## 7 Quellen

- BAFU, 2008: *NABEL Luftbelastung 2007. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL)*. Umwelt-Zustand, Vol. 0823, Bundesamt für Umwelt, Bern, 139 p.
- Begert, M., Schlegel, T. & Kirchhofer, W., 2005: Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25: 65-80.
- Bräker, O. U., 1996: Growth trends of Swiss forests: tree-ring data. Case study Toppwald. In: H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl & J. P. Skovsgaard (eds.), *Growth Trends in European Forests*. Research Report, Vol. 5. European Forest Institute. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 199-217.
- Brassel, P. & Brändli, U.-B., 1999: *Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der zweiten Aufnahme 1993-1995*. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf. Haupt, Bern, 444 p.
- Braun, S., Belyazid, S., Kurz, D. & Sverdrup, H., 2008: Monitoring, experimental data and geochemical evaluations related to the modelling sites. In: H. Sverdrup (ed.), *Background document, 18th CCE Workshop, LRTAP Convention (UNECE)*, Bern, 21-25 April 2008. p. 51-61.
- Braun, S. & Flückiger, W., 2009: *Wie geht es unserem Wald? Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU. Ergebnisse 1984 bis 2008*. Bericht, Vol. 3, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch, Schweiz, 104 p.
- Bugmann, H. K. M., 1996: A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology*, 77 (7): 2055-2074.
- Bugmann, H. K. M. & Solomon, A. M., 1995: The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients. *Journal of Biogeography*, 22 (2-3): 477-484.
- Christiansen, J. R., Elberling, B. & Jansson, P.-E., 2006: Modelling water balance and nitrate leaching in temperate Norway spruce and beech forests located on the same soil type with the CoupModel. *Forest Ecology and Management*, 237 (1-3): 545-556.
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A. D., Friedlingstein, P., Grunwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M. J., Schulze, E. D., Vesala, T. & Valentini, R., 2005: Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437 (7058): 529-533.
- Cook, E. R., 1985: *A time series analysis approach to tree-ring standardization*. Dissertation, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA, p.
- Cronan, C. S., April, R., Bartlett, R. J., Bloom, P. R., Driscoll, C. T., Gherini, S. A., Henderson, G. S., Joslin, J. D., Kelly, J. M., Newton, R. M., Parnell, R. A., Patterson, H. H., Raynal, D. J., Schaedle, M., Schofield, C. L., Sucoff, E. I., Tepper, H. B. & Thornton, F. C., 1989: Aluminum toxicity in forests exposed to acidic deposition - the Albios results. *Water, Air, and Soil Pollution*, 48 (1-2): 181-192.
- de Vries, W., Solberg, S., Dobbertin, M., Sterba, H., Laubhan, D., Reinds, G. J., Nabuurs, G.-J., Gundersen, P. & Sutton, M. A., 2008: Ecologically implausible carbon response. *Nature* 447 (848-850).
- Defila, C. & Clot, B., 2001: Phytophenological trends in different seasons, regions and altitudes in Switzerland. *Fingerprints of Climate Change - Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges*: 113-121.
- Dobbertin, M., 2005: Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research*, 124 (4): 319-333.

- Fabian, P. & Menzel, A., 1999: Changes in phenology of trees in Europe. *Causes and Consequences of Accelerating Tree Growth in Europe* (27): 43-51.
- Frei, E., Vökt, U., Flückiger, R., Brunner, H. & Schai, F., 1980: *Bodeneignungskarte der Schweiz (Masstab 1:200'000)*. Grundlagen für die Raumplanung, Bundesämter für Raumplanung, Landwirtschaft und Forstwesen, EMDZ, Bern,p.
- Graf Pannatier, E., Dobbertin, M., Schmitt, M., Thimonier, A. & Waldner, P., 2007: Effects of the drought 2003 on forests in Swiss Level II plots. In: J. Eichhorn (ed.), *Forests in a Changing Environment. Results of 20 years ICP Forests Monitoring*, Göttingen, Germany, October 25-28, 2006. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Vol. 142, p. 128-135.
- Graf Pannatier, E., Walthert, L. & Blaser, P., 2004: Solution chemistry in acid forest soils: Are the BC: Al ratios as critical as expected in Switzerland? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 167 (2): 160-168.
- Holmes, R. L., 1994: Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree ring*, 43: 69-78.
- ICP-Forests, 1994: *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (ICP-Forests). Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP). UN-ECE., Programme Coordinating Centres. [www.icp-forests.org](http://www.icp-forests.org), Hamburg, Prague, 177 p.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. S. Solomon, Qin, D., Manning, M. Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., and Miller, H.L. , Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom 996 p.
- Jolly, W. M., Dobbertin, M., Zimmermann, N. E. & Reichstein, M., 2005: Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps. *Geophysical Research Letters*, 32 (18).
- Kaufmann, E., 2001: Prognosis and Management Scenarios. In: P. Brassel & H. Lischke (eds.), *Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the Second Assessments*. WSL Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape, Birmensdorf, p. 197-206.
- Köhl, M., 1996: Growth pattern in forests of the Canton of Berne, Switzerland, based on inventory data. In: H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl & J. P. Skovsgaard (eds.), *Growth Trends in European Forests*. Research Report, Vol. 5. European Forest Institute. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 219-237.
- Kozlowski, T. T. & Pallardy, S. G., 1996: *Physiology of woody plants*. Academic Press, San Diego,p.
- Kurz, D., Rihm, B., Sverdrup, H. & Warfvinge, P., 1998: *Critical loads of acidity for forest soils. Regionalized PROFILE model*. Environmental Documentation Air / Forests, Vol. 88, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Berne, 102 p.
- Lischke, H., Zimmermann, N. E., Bolliger, J., Rickebusch, S. & Löffler, T. J., 2006: TreeMig: A forest landscape model for simulating spatio-temporal patterns from stand to landscape scale. *Ecological Modelling*, 199: 409-420.
- Löffler, T. J. & Lischke, H., 2001: Incorporation and influence of variability in an aggregated forest model. *Natural Resource Modeling*, 14 (1): 103-137.
- Magnani, F., Mencuccini, M., Borghetti, M., Berbigier, P., Berninger, F., Delzon, S., Grelle, A., Hari, P., Jarvis, P. G., Kolari, P., Kowalski, A. S., Lankreijer, H., Law, B. E., Lindroth, A., Loustau, D., Manca, G., Moncrieff, J. B., Rayment, M., Tedeschi, V., Valentini, R. & Grace, J., 2007: The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, 447 (7146): 848-850.
- Mahrer, F., Bachofen, H., Brändli, U.-B., Brassel, P., Kasper, H., Lüscher, P., Mahrer, F., Riegger, W., Stierlin, H.-R., Strobel, T., Sutter, R., Wenger, C., Winzeler, K. & Zingg, A., 1988:

*Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982 to 1986.* EAFV-Berichte, Vol. 305, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV), Birmensdorf. Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz, Berne, Berne, 375 p.

- Mellert, K., Prietzel, J., Straussberger, R., Rehfuess, K., Kahle, H., Perez, P. & Spiecker, H., 2008: Relationships between long-term trends of air temperature, precipitation, nitrogen nutrition and growth of coniferous stands in Central Europe and Finland. *European Journal of Forest Research*, 127 (6): 507-524.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavská, O. g., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A. J. H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S. & Züst, A., 2006: European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12 (10): 1969-1976.
- Mitchell, T. D. & Jones, P. D., 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25 (6): 693-712.
- Nadelhoffer, K. J., Emmet, B. A., Gundersen, P., Kjonaas, O. J., Koopmans, C. J., Schleiippi, P., Tietema, A. & Wright, R. F., 1999: Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. In: *Nature*, Vol. 398, pp. 145-148.
- Rickebusch, S., Lischke, H., Bugmann, H., Guisan, A. & Zimmermann, N. E., 2007: Understanding the low-temperature limitations to forest growth through calibration of a forest dynamics model with tree-ring data. *Forest Ecology and Management*, 246: 251-263.
- Rihm, B., 1996: *Critical loads of nitrogen and their exceedances - Eutrophying atmospheric deposition.* Environmental Series - Air, Vol. 275, Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL), Bern, 74 p.
- Rihm, B. & Kurz, D., 2001: Deposition and critical loads of nitrogen in Switzerland. In: *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 130, pp. 1223-1228.
- Rihm, B. & Kurz, D., 2008: Input preparation for dynamic modelling with ForSAFE-VEG in Switzerland - deposition of nitrogen, sulfur and base cations and climate related parameters. In: H. Sverdrup (ed.), *Background document for the 18th CCE Workshop on the assessment of nitrogen effects under the ICP for Modelling and Mapping, LRTAP Convention (UNECE)*, Berne, 21.-25. April, 2008. p. 38-50.
- Schaub, M., 2005: Ozone exposures and effects on forest vegetation: A global overview. *International Forestry Review*, 7 (5): 284.
- Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S. & Johansson, M., 2003: Long-term development of acid deposition (1880-2030) in sensitive freshwater regions in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7 (4): 436-446.
- Solberg, S., Dobbertin, M., Reinds, G. J., Lange, H., Andreassen, K., Fernandez, P. G., Hildingsson, A. & de Vries, W., in press: Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach. *Forest Ecology and Management*.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. & Skovsgaard, J. P., 1996: *Growth trends in European forests; studies from 12 countries.* European Forest Institute, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, p.
- Theurillat, J.-P. & Guisan, A., 2001: Potential Impact of Climate Change on Vegetation in the European Alps: A Review. *Climatic Change*, 50 (1): 77-109.
- Theurillat, J.-P. & Guisan, A., 2002: Erratum. *Climatic Change*, 53 (4): 529-530.
- Thimonier, A., Schmitt, M., Waldner, P. & Rihm, B., 2005: Atmospheric deposition on Swiss Long-term Forest Ecosystem Research (LWF) plots. *Environmental Monitoring and Assessment*, 104: 81-118.

- Thornton, F. C., Running, S. W. & White, M. A., 1997: Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 190: 214-251.
- Thürig, E. & Kaufmann, E., 2008: Waldbewirtschaftung zur Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 159 (9): 281-287.
- Thürig, E. & Kaufmann, E., submitted: Increasing carb on sink through forest management: A model-based comparison of the Swiss Plateau and the Alps.
- Thürig, E., Kaufmann, E., Frisullo, R. & Bugmann, H., 2005: Evaluation of the growth function of an empirical forest scenario model. *Forest Ecology and Management*, 204 (1): 51-66.
- Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Pfister, C., Volz, R., Beniston, M. & Dobbertin, M., 2009: Wind speed measurements and forest damage in Canton Zürich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *International Journal of Climatology*: in press.
- Vanclay, J. K., 1994: Sustainable timber harvesting - simulation studies in the tropical rain-forests of North Queensland. *Forest Ecology and Management*, 69 (3): 299-320.
- Waldner, P., Schaub, M., Graf Pannatier, E., Schmitt, M., Thimonier, A. & Walthert, L., 2007: Atmospheric deposition and ozone levels in Swiss forests: Are critical values exceeded? *Environmental Monitoring and Assessment*, 128 (1-3): 5-17.
- Wallman, P., Svennson, M. G. E., Sverdrup, H. & Belyazid, S., 2005: ForSAFE - an integrated process-oriented forest model for long-term sustainability assessments. *Forest Ecology and Management*, 207: 19-36.
- Walthert, L., Blaser, P., Lüscher, P., Luster, J. & Zimmermann, S., 2003: *Langfristige Waldökosystem-Forschung LWF in der Schweiz. Kernprojekt Bodenmatrix. Ergebnisse der ersten Erhebung 1994-1999.* E-Collection, <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=bericht&nr=276>, Vol. 276, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 340 p.
- Weber, P., Bugmann, H., Fonti, P. & Rigling, A., 2008: Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest succession. *Forest Ecology and Management*, 254: 96-106.
- Weber, P., Bugmann, H. & Rigling, A., 2007: Radial growth response to drought of *Pinus sylvestris* and *Quercus pubescens* in an inner-Alpine dry valley. *Ecological Modelling*, 210: 301-311.
- Zingg, A., 1996: Diameter and basal area increment in permanent growth and yield plots in Switzerland. In: H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl & J. P. Skovsgaard (eds.), *Growth Trends in European Forests*. Research Reports, Vol. 5. European Forest Institute. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 239-265.
- Zingg, A. & Bachofen, H., 1998: Wachstumsforschung an der WSL. *Schweizer Wald*, 134 (9): 15-23.
- Zingg, A. & Bürgi, M., 2008: Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 159 (10): 352-361.