

Diss. ETH ex. 3

Diss. ETH Nr. 12990

# **Modellierung, Simulation und Bewertung des regionalen Holzhaushaltes**

**Untersuchung zur Wald- und Holzbewirtschaftung  
in einer nachhaltigen Regionalentwicklung**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE  
ZÜRICH

vorgelegt von  
Daniel Beat Müller  
Dipl. Kultur-Ing. ETH

geboren am 23. Mai 1965  
von Gächlingen SH



Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. P. Baccini, Referent  
Prof. Dr. H.-R. Heinimann, Korreferent  
Dr. H.-P. Bader, Korreferent

1998

**Vertrieb**

EAWAG  
Bibliothek  
Überlandstr. 133  
CH-8600 Dübendorf

Tel.: ++41-1-823 55 31 / 32

Fax: ++41-1-823 50 28

E-mail: [bibliothek@eawag.ch](mailto:bibliothek@eawag.ch)

[http://www.eawag.ch/services/bibliothek/d\\_index.html](http://www.eawag.ch/services/bibliothek/d_index.html)

**Weitere Informationen**

Daniel B. Müller

E-Mail: [dmueller@smile.ch](mailto:dmueller@smile.ch)

<http://www.spectraweb.ch/~dmue/index.html>

*Jeder Schöpfungsakt...  
setzt eine neue Wahrnehmung voraus,  
befreit vom grauen Star  
der überlieferten Meinungen.*

*Arthur Koestler, "Die Nachtwandler"*

**Für meine Eltern**

## Dank

Eine ganze Reihe von Personen haben mich in den vergangenen Jahren begleitet und damit einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet.

Peter Baccini gab mir die Möglichkeit, in seiner multidisziplinären Forschungsabteilung für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik an der EAWAG Dübendorf und der ETH Zürich diese Arbeit auszuführen. Bei ihm konnte ich nicht nur die fachlichen Grundlagen des Stoffhaushaltes kennenlernen. In vielen Projekten, welche ich auch neben der Diss mit ihm ausführen durfte, hat er in mir vor allem die Faszination am disziplinenübergreifenden Forschen geweckt.

Hans Rudolf Heinimann gab mir die Gelegenheit, in seiner Professur für Forstliches Ingenieurwesen ein Gastsemester zu verbringen. Mit seiner Offenheit und seinem Engagement für den Praxisbezug hat er mich ermutigt, mich in diesem Grenzgebiet zwischen Forst- und Umweltwissenschaften zu vertiefen. In seiner Professur waren vor allem Thomas Hänggli und Markus Brunner die erste Anlaufstation, wenn es um forstliche oder organisatorische Fragen ging. Für ihre bereitwillige Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken.

Ohne die tatkräftige und kompetente Unterstützung von Hans-Peter Bader bei mathematisch anspruchsvollen Problemen und der Simulation mit Hilfe von Ruth Scheidegger wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Hans-Peter hat mich als Physiker aber auch sensibilisiert für die Schönheit von einfachen Modellen.

Franz Oswald von der Professur für Architektur und Städtebau der ETH Zürich machte die zahlreichen SYNOIKOS-Workshops in Münchenwiler mit seiner spontanen, ehrlichen Art und seinen manchmal harten, im Grunde aber immer konstruktiven Kritiken zu einem unvergesslichen Erlebnis. Ich möchte dem gesamten Synoikos-Team, insbesondere Jochen Jaeger, Stephanie Perrochet und Mireille Faist sowie Christoph Blaser, Mike Redle, Susanne Kytzia und Georg Henseler danken für die vielen fruchtbaren Diskussionen.

Hans-Jürg Steinlin hat das Manuskript gründlich gelesen und viele wertvolle Anregungen gegeben. Mit seinem tiefen Verständnis der forstlichen Ressourcenbewirtschaftung hat er mir geholfen, die Arbeit in den Kontext der historischen und der internationalen Entwicklung zu stellen. Auch Renato Lemm, Markus Ulrich, Gerhard Wagner, Stephanie Perrochet und Nicola Patzel haben aufgrund der Lektüre des Manuskriptes wertvolle Hinweise gegeben.

Im Winter 95/96 durfte ich die Diplomarbeiten von Thomas Lüthi, Peter Geiger und Laurent Graber betreuen. Diese haben wertvolle Grundlagen für eine Methode erarbeitet, um den Holzfluss durch das System Gebäude zu erfassen.

Bei der Datenbeschaffung und Interpretation haben mich sehr viele Leute unterstützt. Erwähnen möchte ich Werner Schwaller, Kreisförster von Olten und Balsthal-Gäu, M. Zanetti und Ch. Weber von der Sektion Wald- und Holzwirtschaft in der Eidgenössischen Forstdirektion sowie Frau I. Hunziker vom Verband der Schweizerischen Zellstoff-, Papier- und Kartonindustrie. Von Bibliothek-Seite bin ich Elisabeth Stüssi, Monika Zemp und Rosmarie Louis zu grossem Dank verpflichtet.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern für ihre bedingungslose Unterstützung, ihr Vertrauen und ihre Liebe. Karin Ritzmann möchte ich danken für ihren Mut und ihr tiefes Vertrauen. Thomas Müller ist für mich Vorbild in der Art, wie er Verantwortung übernimmt für sein Umfeld. Carolyn Hendriks hat mich in der Schlussphase der Arbeit mit der Textgestaltung und der Englischübersetzung unterstützt. Ihr möchte ich aber vor allem danken für ihr grosses Verständnis, ihre Offenheit und ihre Liebe.

# Inhaltsverzeichnis

<b>ABSTRACT</b>	<b>X</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>XI</b>
<b>KURZFASSUNG</b>	<b>XII</b>
<b>GLOSSAR</b>	<b>XVI</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1 Von der forstlichen Nachhaltigkeit zur nachhaltigen Entwicklung	1
1.2 Historischer Abriss der Holzbewirtschaftung im Schweizer Mittelland	4
1.3 Stand der Beschreibung des Holzhaushaltes	8
1.4 Arbeitshypothesen	9
1.5 Fragen	11
1.6 Aufbau der Arbeit	12
<b>2 METHODEN UND UNTERSUCHUNGSREGION</b>	<b>13</b>
2.1 Die Methode der Stoffflussanalyse	13
2.2 Stand der Modellierung	15
2.2.1 Waldentwicklungsmodelle	15
2.2.2 Ökonomische Forstsektormodelle	17
2.2.3 Umweltmanagementmodelle	21
2.2.4 Fazit	22
2.3 Anforderungen an ein Holzbewirtschaftungsmodell für eine nachhaltige Regionalentwicklung	23
2.3.1 Zeithorizont	23
2.3.2 Integration in übergeordnete Fragestellungen	23
2.3.3 Systemwahl	25
2.3.4 Vorgehen	26
2.4 Die Untersuchungsregion "Kreuzung Schweizer Mittelland"	27

<b>3 QUASISTATIONÄRES MODELL</b>	<b>31</b>
3.1 Einleitung	31
3.2 Modellbeschreibung	32
3.2.1 Systemwahl	32
3.2.2 Modellansatz	34
3.3 Daten	35
3.4 Resultate	36
3.4.1 Ausgangslage am Ende des 20. Jahrhunderts	36
3.4.2 Szenario 1: Verdopplung des Papierkonsums	37
3.4.3 Szenario 2: Vermehrte Holzbauweise	38
3.5 Fazit	42
<b>4 DYNAMISCHES MODELL "XYLOIKOS"</b>	<b>45</b>
4.1 Einleitung	45
4.1.1 Motivation	45
4.1.2 Transdisziplinärer Ansatz	46
4.1.3 Externe Zielvorgaben	48
4.1.4 Szenarien	48
4.1.5 Folgerungen für den Modellaufbau	49
4.1.6 Vorgehen beim Modellaufbau	49
4.2 Systemstruktur	51
4.2.1 Einleitung	51
4.2.2 Wald und Forstwirtschaft	52
4.2.3 Gebäudepark	56
4.2.4 Weitere Prozesse und Güter	58
4.3 Modellansatz	60
4.3.1 Prinzip der mathematischen Beschreibung	60
4.3.2 Wahl der Leitvariablen	61
4.3.3 Prinzipien zur Wahl der Modellansätze	65
4.3.4 Wald und Forstwirtschaft	66
4.3.5 Holzwirtschaft	67
4.3.6 Papierwirtschaft	72
4.3.7 Energieversorgung	74
4.3.8 Zusammenstellung der Parameter	76
4.4 Computerprogramm	77

4.5 Kalibrierung und Validierung	78
4.5.1 Einleitung	78
4.5.2 Bevölkerung	80
4.5.3 Wald und Forstwirtschaft	81
4.5.4 Holzwirtschaft	90
4.5.5 Papierwirtschaft	96
4.5.6 Energie	96
4.6 Kenngrößen und interne Zielwerte	98
4.7 Umbauszenarien	101
4.7.1 Einleitung	101
4.7.2 Standardszenario (S0)	101
4.7.3 Szenarien für den Umbau des Waldes (S1)	104
4.7.4 Szenarien für den Umbau des Gebäudeparkes (S2)	108
4.8 Fazit	112
<b>5 SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>113</b>
5.1 Beitrag zur Holzbewirtschaftung in einer nachhaltigen Regionalentwicklung	114
5.2 Beitrag zur Methodenentwicklung	115
5.2.1 Forstwirtschaft	115
5.2.2 Holz-/Bauwirtschaft	116
5.2.3 Abfallwirtschaft	117
5.2.4 Umweltmanagement	117
5.3 Künftige Funktionen von Wald und Holz	118
5.4 Vorschläge für eine Implementierung und Erweiterung des Modells	119
5.4.1 Forstwirtschaft	119
5.4.2 Holzwirtschaft und Altholzwirtschaft	120
5.4.3 Fazit	121
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>122</b>
<b>ANHANG</b>	
A Mathematische Beschreibung von XYLOIKOS	
B Kalibrierung und Validierung	
C Szenarien	
D Mathematische Beschreibung des quasistationären Modelles	

## **Abstract**

This thesis introduces and describes a dynamic model (XYLOIKOS), which simulates regional timber management over a 200 year period from 1900 to 2100. It is the first simulation model which links together forests, forestry, timber processing as well as consumption and disposal of wood products. The model was applied in the Swiss Lowlands region Olten-Oensingen-Zofingen. Restructuring scenarios for the two main timber stocks, forests and buildings, were developed and evaluated based on regional sustainable development criteria.

XYLOIKOS is a useful planning instrument for the development of long term strategies to coordinate forestry, timber, paper, construction and waste management. It can also be used to optimize monitoring programs for the entire timber management system. Various measurements can be complemented or even replaced by simulation results. Furthermore, the system structure of XYLOIKOS allows it not only to incorporate energy and other material flows such as wood substitutes, but also to be linked easily with geographical information systems.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein dynamisches Modell (XYLOIKOS) vorgestellt, welches den regionalen Holzhaushalt über eine Zeitspanne von 200 Jahren (von 1900-2100) simuliert. Es handelt sich um das erste Modell, welches den Wald, die Forstwirtschaft die Holzverarbeitung sowie den Konsum und die Entsorgung von Holzprodukten in Bezug auf technisch-naturwissenschaftliche Aspekte miteinander verknüpft. Das Modell wurde angewendet in der Region Olten-Oensingen-Zofingen im Schweizer Mittelland. Für die beiden grössten Holzlager, den Wald und den Gebäudepark, wurden Umbauszenarien entwickelt und in Bezug auf Kriterien einer nachhaltigen Regionalentwicklung bewertet.

XYLOIKOS eignet sich als Planungsinstrument zur Evaluierung von langfristigen regionalen Entwicklungsstrategien mit dem Ziel, Forst-, Holz-, Papier- sowie Bau- und Abfallwirtschaft miteinander zu koordinieren. Mit XYLOIKOS kann aber auch der Messaufwand des gesamten Holzbewirtschaftungssystems optimiert werden, indem verschiedene Messungen durch Simulationen ergänzt oder ganz ersetzt werden können. Die Systemstruktur von XYLOIKOS erlaubt nicht nur eine einfache Erweiterung durch Energie- und weitere Materialflüsse (z.B. Baumaterialien), sondern auch eine Verknüpfung mit geographischen Informationssystemen.

## Kurzfassung

In den meisten industrialisierten Ländern ist Holz heute keine knappe Ressource. Vor zweihundert Jahren herrschte hingegen vielerorts noch eine Holzknappheit, welche zu einer massiven Übernutzung der Wälder führte, obschon die Bevölkerungsdichte noch um rund einen Faktor fünf geringer war. Diese Veränderung hat damit zu tun, dass sich die Funktionen von Holz im regionalen Stoffwechsel gewandelt haben. Während Holz früher der wichtigste Energieträger war, ist es heute weitgehend durch fossile Energieträger (Erdöl, Erdgas und Kohle) ersetzt worden und spielt in der Energieversorgung nur noch eine untergeordnete Rolle. Auch als Baumaterial hat Holz gegenüber Beton, Backstein und Stahl an Bedeutung verloren. Hingegen ist seine Funktion als Informationsträger wegen des massiven Anstiegs des Papierverbrauches immer wichtiger geworden.

Mit der absehbaren Verknappung von verschiedenen Ressourcen im Verlaufe des 21. Jahrhunderts stellt sich erneut die Frage, welche Funktionen die einzelnen Rohstoffe künftig übernehmen können. In verschiedenen Untersuchungen wurde darauf hingewiesen, dass global längerfristig mit einer Erschöpfung der fossilen Energieträger gerechnet werden muss. Auch für Holz werden global Verknappungen vorausgesagt, vor allem bedingt durch das Bevölkerungswachstum. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Problem angegangen, indem für eine urbane Region mit hohem Waldanteil eine Abstimmung von Produktion und Konsum postuliert wird. Damit könnte einerseits der Verbrauch von Hinterland zur Holzproduktion in Grenzen gehalten, andererseits aber auch eine unerwünschte Unternutzung von Wäldern vermieden werden.

Ausgangspunkt bilden folgende Fragen:

1. Wie kann der Holzhaushalt urbaner Regionen im 20. Jahrhundert charakterisiert werden? Welches sind seine wichtigsten Einflussgrößen?
2. Welche Funktionen kann Holz künftig übernehmen, wenn Produktion und Konsum aufeinander abgestimmt werden sollen? Wie wirken sich unterschiedliche Entwicklungsszenarien für das 21. Jahrhundert auf den regionalen Holzhaushalt aus?
3. Inwiefern können physiologische Modelle der regionalen Holzbewirtschaftung zur Früherkennung von Veränderungen eingesetzt werden?

Am Beispiel einer typischen Region im Schweizer Mittelland wird zum ersten mal der gesamte Holzhaushalt (bestehend aus Wald, Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, Holzkonsum und Altholzentsorgung) mit Hilfe der Stoffflussanalyse untersucht und mittels eines dynamischen Simulationsmodelles beschrieben. Besonderes Gewicht wird auf die Holzlager in den Wäldern und im Gebäudepark gelegt, welche beide mit flächenbezogenen Jahrgangsklassen beschrieben werden. Das Modell beschreibt den Holzhaushalt und den mit der Holzbewirtschaftung verbundenen Energiehaushalt für den Zeitraum von 1900-2100. Die Kalibrierung des Modelles erfolgt anhand von Daten für das 20. Jahrhundert. Während für die Forstwirtschaft auf relativ gute Daten aus den Waldwirtschaftsplänen zurückgegriffen werden konnte, mussten die Daten zu Verarbeitung, Konsum und Entsorgung von Holz sowie zum Energieverbrauch aufgrund von Untersuchungen in anderen Regionen (zum Beispiel Schweiz oder Kanton Aargau) abgeschätzt werden. Mit Hilfe von Parametervariationen wurden die Auswirkungen von fehler- oder lückenhaften Datensätzen getestet, die Schlüsselgrößen des Systems identifiziert und die Parametersätze korrigiert. Anhand von Szenarien für das 21. Jahrhundert wurde untersucht, wie sich eine Veränderungen der Waldanordnung und ein Umbau des Gebäudeparkes zu einem solaren System (Wärmeversorgung ausschliesslich mit Sonnenkollektoren und Holz) auf den Holzhaushalt auswirken würden. Die wichtigsten Folgerungen sind:

1. Als Schlüsselgrösse für die Holzproduktion hat sich das Wachstumspotential bestimmter Baumarten auf bestimmten Waldstandorten (die sogenannte Bonität) erwiesen. **Gemäss Modellrechnungen anhand der Daten aus den Waldwirtschaftsplänen ist die Produktivität der Wälder im Verlauf des 20. Jahrhunderts um rund 60-70% angestiegen. Die Produktivitätssteigerung ist bisher nicht so klar zum Vorschein getreten, da gleichzeitig die Umtriebszeit von rund 80 auf etwa 120 Jahre erhöht wurde, was eine Verminderung der Ertragsleistung verursacht.** Mit dem Ansatz der *flächenbe-*

*zogenen Jahrgangsklassen* kann der Einfluss eines Umbaus der Altersstruktur, theoretisch auch der Baumarten oder der Umwelteinflüsse, herausgefiltert werden, was mit herkömmlichen Ansätzen wie dem Entwicklungsstufenmodell nicht möglich ist. Mit einem Jahrgangsklassenmodell können die Erkenntnisse der Bestandesmodellierung auch in der Waldentwicklungsplanung eingesetzt werden. Die Zunahme der Bonität korreliert relativ gut mit den Stickstoffeinträgen aus Verkehr, Landwirtschaft und Reisig in die Wälder. Ein eindeutiger Zusammenhang kann mit dem Modell jedoch nicht hergestellt werden. Das Modell zeigt aber, dass die künftige Entwicklung der Bonität einen entscheidenden Einfluss auf die Holzversorgung haben kann.

2. **Noch grösser ist dagegen der Einfluss des Gebäudeparkes auf den Holzhaushalt. Auch dieser Einfluss wurde bisher noch kaum spürbar, da das starke Wachstum des Gebäudeparkes in den letzten 50 Jahren einher ging mit einem kontinuierlichen Rückgang des Holzanteiles in den Gebäudekonstruktionen.** Die Dynamik des Gebäudeparkes wird in ökonomischen Modellen zur Untersuchung künftiger Holzverbräuche nicht berücksichtigt. Damit stellt die vorliegende Arbeit auch eine Alternative zu herkömmlichen Ansätzen der künftigen Holzverbrauchsabschätzung dar. Die aufgrund von Ökobilanzuntersuchungen - welche bisher weder einen regionalen Bezug aufweisen noch eine dynamische Betrachtung erlauben - aufgestellte Forderung nach vermehrtem Holzbau muss auf regionaler Ebene stark eingeschränkt werden. Wäre der heutige Gebäudepark ausschliesslich mit modernem (leichtem) Holzbau erfolgt, so wäre dazu rund die dreifache Waldfläche notwendig gewesen. Als Baumaterial kann Holz deshalb bei einer konstanten Bevölkerungsdichte und einer konstanten Pro-Kopf-Gebäudefläche künftig nicht mehr die gleiche Bedeutung erlangen wie noch vor einigen Jahrzehnten.
3. **Der Wald besitzt ein bisher ungenutztes Potential zur Verbesserung der Erholungs- und der Schutzfunktion, wenn er integriert wird in die Gestaltung der gesamten Kulturlandschaft.** Ein Umbau der Waldflächenanordnung müsste sehr langsam erfolgen und sich an der Umtriebszeit der Waldbestände orientieren, um keine grösseren Schwankungen in der Holzproduktion zu erzeugen. Ein langsamer Umbau der Waldstandorte hätte allerdings einen kleineren Einfluss auf die Holzproduktion als die Bonitätsveränderung.
4. **Als Energieträger könnte Holz künftig eine wichtige Rolle spielen bei einem Szenario, bei dem die bestehenden Gebäude konsequent ausgewechselt werden durch energiesparende Gebäude, welche ausschliesslich mit Sonnenkollektoren und regional verfügbarem Brenn- und Altholz**

**beheizt werden.** Dazu wären in der Untersuchungsregion Gebäude mit einer Wärmeenergiekennzahl von durchschnittlich unter  $130 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  erforderlich. Solche Werte können bei Neubauten heute schon erreicht werden, liegen aber **rund drei mal tiefer** als durch die Normen vorgegeben wird. Da diese Werte durch Renovationen von herkömmlichen Gebäuden in der Regel nicht erreicht werden können, kommt der Auswechslung des bestehenden Gebäudeparkes bei der Loslösung von fossilen Energieträgern eine wichtige Bedeutung zu. Eine Auswechslung des Gebäudeparkes innerhalb weniger Jahrzehnte würde zu massiven Schwankungen der Bauholzverbräuche, insbesondere bei Konstruktionsholz, führen. **Um grössere Schwankungen der Holzverbräuche zu vermeiden, muss ein entsprechender Umbau des Gebäudeparkes in einem Zeitrahmen von mindestens 50-100 Jahren erfolgen.** Dies liegt sowohl in der Grössenordnung der heute in der Schweiz üblichen Lebensdauer von Gebäuden als auch der geschätzten Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas.

5. Der Datenaufwand kann kleiner gehalten werden als bei einer isolierten Betrachtung der einzelnen Bereiche, da verschiedene gemessene Daten auch aus anderen Werten berechnet werden können. **Eine Verbesserung des Modelles müsste in Bezug auf das gesamte System in erster Linie bei einer Verfeinerung der Jahrgangsklassen des Gebäudeparkes ansetzen.** Dieser Schritt ist aber erst dann sinnvoll, wenn die Datenlage beim Gebäudepark und dem Endholzverbrauch verbessert wird. Das Modell ist so aufgebaut, dass weitere Baumaterialien ohne weiteres eingebaut werden können. Ausserdem erlaubt der Ansatz der Jahrgangsklassen mit ihrem festen räumlichen Bezug eine **Verknüpfung mit geografischen Informationssystemen.**
6. Die Untersuchung hat gezeigt, dass Modelle des regionalen Holzhaushaltes eingesetzt werden können zur **Früherkennung** bei der Holzproduktion, der Holzverarbeitung (Verbrauchsmengen) und der Altholzgenese. Für verschiedene Fragen bieten solche Modelle eine Alternative zu herkömmlichen Ansätzen (Entwicklungsstufenmodell der Forstwirtschaft, ökonometrische Ansätze bei der Ermittlung künftiger Verbrauchsmengen, Altholzprognosen und Ökobilanzen). Modelle des regionalen Holzhaushaltes haben daher ein grosses Potential zur Unterstützung der Entwicklung von Strategien einer nachhaltigen Regionalentwicklung.

# Glossar

## **Altersklassen**

Einteilung einer →Umtriebszeit in gleiche Zeitabschnitte bestimmter Dauer (meistens 20 Jahre). Dient der Zuteilung und Zusammenfassung von →Beständen mit entsprechendem Alter (BACHMANN 1996).

## **Aktivitäten**

Art und Weise, wie eine Gesellschaft ihre menschlichen Grundbedürfnisse befriedigt. Zur physiologischen Beschreibung der →Anthroposphäre unterscheiden (BACCINI und BRUNNER 1991) vier menschliche Aktivitäten: *Ernähren, Wohnen* und *Arbeiten, Transportieren* und *Kommunizieren* sowie *Reinigen*. MÜLLER et al. (1998) haben in ihrer Untersuchung zusätzlich die Aktivität *Erholen* eingeführt.

## **Anthroposphäre**

Lebensraum des Menschen, in dem seine von ihm gebauten und betriebenen biologischen und technischen Prozesse stehen und in dem seine →Aktivitäten stattfinden. Dieser Lebensraum kann auch als ein komplexes →System von Energie-, Materie- und Informationsflüssen verstanden werden. Er ist Teil der Biosphäre (BACCINI und BADER 1996).

## **Ausbauholz**

Holz in der Dachhaut, Aussenwandfassaden, Fenstern, Aussentüren, Sonnenschützen, Trennwänden und Innentüren, Schutzelementen, Bodenbelägen, Wandverkleidungen, Deckenverkleidungen, Einbauten und Küchen. In dieser Arbeit wurde ausserdem das Holz in Möbeln dazugezählt.

## **Bestand**

Kollektiv von Bäumen auf einer zusammenhängender Mindestfläche, das eine einheitliche Behandlung ermöglicht. In vielen Fällen ist er Bewirtschaftungseinheit und gleichzeitig Zustandserfassungs-, Planungs-, Buchungs- und Kontrollereinheit des laufenden Forsteinrichtungszeitraumes (KRAMER 1985). Ein Reinbestand weist, im Gegensatz zum Mischbestand, nur eine Baumart auf.

**Bonität  $\beta$** 

Mass zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines →Bestandes. Sie wird unterschiedlich definiert. In den →Ertragstafeln der Schweiz (Badoux, 1968) entspricht sie der →Oberhöhe eines Bestandes im Alter 50.

**Brusthöhendurchmesser  $d_{1,3}$** 

Mittlerer Querschnittsdurchmesser in 1.3 m über Boden.

**Bruttogeschossfläche (BGF)**

Baurechtliche Grösse, welche in den kantonalen Baugesetzen geregelt wird. Sie ist aber gesamtschweizerisch ähnlich. Sie beinhaltet alle der Nutzung dienenden Flächen (ober- und unterirdische Geschossflächen, Treppenhaus- und Lifтанlagen inkl. Mauer- und Wandquerschnitte). GABATHULER und WÜEST (1984) definieren die BGF durch das umbaute Volumen dividiert durch die mittlere Raumhöhe der jeweiligen Gebäudeart (= Bruttonutzfläche), abzüglich der nicht anrechenbaren Flächen wie Keller, Einstellräume, Maschinenräume usw. Zur Berechnung der BGF von Wohngebäuden aus der Wohnfläche wird ein Faktor 1.3 angegeben.

**Derbholz**

Oberirdische Holzmasse von Schaft und Ästen mit Durchmesser in Rinde über 7 cm (KRAMER 1985).

**Durchforstung**

Die Durchforstung dient der Pflege der →Bestände. Sie wird in der Forsteinrichtung häufig als synonyme Begriff für Vornutzung verwendet.

**Energiebezugsfläche**

Alle ober- und unterirdischen Geschossflächen, für deren Benutzung eine Beheizung notwendig ist. In erster Näherung entspricht sie der →Bruttogeschossfläche (WICK 1983). Aus der Energiebezugsfläche und der →Energiekennzahl lässt sich der Energieverbrauch von Gebäuden berechnen.

**Energiekennzahl (EKZ)**

Energieverbrauch pro Jahr und pro Quadratmeter →Energiebezugsfläche. In dieser Arbeit wird nur mit der EKZ Wärme gerechnet, welche sich auf Heizung und Warmwasserversorgung bezieht.

**Entwicklungsstufen**

Klassierung von →Beständen aufgrund des Höhen- oder Durchmesserzustandes im schlagweisen Hochwald. Die in der Untersuchungsregion verwendeten Entwicklungsstufen sind eingeteilt nach dem →Oberdurchmesser  $d_{dom}$ : Jungwuchs / Dichtung 0-10 cm, schwaches Stangenholz 10-20 cm, starkes Stangenholz 20-30

cm, schwaches Baumholz 30-40 cm, mittleres Baumholz 40-50 cm, starkes Baumholz >50 cm (BACHMANN 1996).

### **Ertragstafeln**

Vereinfachtes Modell einer Waldentwicklung. Die Schweizerischen Ertragstafeln (BADOUX 1968) beruhen auf gleichförmigen, reinen Hochwaldbeständen, die durch Auslesedurchforstung bestimmt sind (BACHMANN 1996).

### **Festmeter (Fm)**

Mass für das tatsächliche Holzvolumen. Für nicht kompakte Sortimenten (Sterholz, Schnittholz, Wellen) gelten Umrechnungsfaktoren.

### **Forsteinrichtung**

Fachgebiet, welches sich mit der gezielten Lenkung der Waldentwicklung beschäftigt. Als Synonyme werden neu auch Waldmanagement oder Waldressourcenmanagement verwendet.

### **Gut**

Systemelement der →Stoffflussanalyse (BACCINI und BRUNNER 1991). Güter sind hier Stoffe oder Stoffgemische, die vom Menschen bewertete Funktionen erfüllen. Sie werden als Flüsse pro Jahr gemessen.

### **Hiebsatz**

Im Betriebsplan festgesetzte planmässige Holznutzung, ausgedrückt als Menge von anfallendem Holz und/oder als zu behandelnde Fläche. Er lässt sich unterteilen in Durchforstungs- und Verjüngungshiebsatz (BACHMANN 1996).

### **Hauptnutzung**

Nutzung von kluppierten Bäumen bei der Kontrollmethode.

### **Hinterland**

Externe Gebiete einer Region, welche zur Aufrechterhaltung irgendwelcher Funktionen innerhalb der Region beansprucht werden (z.B. Wälder zur Versorgung mit Holz oder Deponien zur Entsorgung mit Abfällen oder Ozean zur Aufnahme von Kohlendioxid) (MÜLLER et al. 1998).

### **Homöostasie**

Eigenschaft eines Organismus oder eines →Systems, einen inneren Gleichgewichtszustand aufrechtzuerhalten (DUDEN 1990).

### **Jahrgangsklassen**

Einteilung eines Waldes in Klassen mit gleichem Jahrgang. Im Gegensatz zum →Altersklassen- oder →Entwicklungsstufenmodell bleibt ein →Bestand immer in derselben Klasse.

**Kalibrierung**

Schätzung und Eichung der Modellparameter und Konstanten mit dem Ziel, eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen dem Modell-Output und den Datensätzen zu erreichen (RYKIEL 1996).

**Kontrollstichproben-Verfahren**

Inventoryverfahren basierend auf einer systematischen Stichprobenerhebung mit permanent eingerichteten Probeflächen (BACHMANN 1996).

**Konstruktionsholz**

Holz in Tragkonstruktionen, Treppen, Podesten, Dachtragwerken, Stützen, Aussenwandkonstruktionen, tragenden und nichttragenden Innenwänden.

**Modell**

Vereinfachte Darstellung der Funktion eines Gegenstandes oder des Ablaufes eines Sachverhalts, die eine Untersuchung oder Erforschung erleichtert oder erst möglich macht (DUDEN 1990).

**Nutzung**

Sammelbegriff für alle aus dem Wald entnommenen Materialerträge (BACHMANN 1996). In dieser Arbeit wird sie synonym verwendet mit der Gesamtnutzung (Summe aus →Haupt- →Zwischen- und →Zwangsnutzungen).

**Oberdurchmesser  $d_{dom}$** 

Arithmetisches Mittel der →Brusthöhendurchmesser der stärksten 100 Bäume pro Hektare.

**Oberhöhe  $h_{dom}$** 

Mittlere Scheitelhöhe der 100 stärksten Bäume pro Hektare.

**Physiologische Modelle**

Mathematisch-physikalische Modelle, welche die Stoff- und Energieflüsse eines Systemes beschreiben (z.B. einer Region oder eines Industriebetriebs).

**Prozess**

Systemelement der →Stoffflussanalyse (BACCINI und BRUNNER 1991). Danach ist ein Prozess ein Bilanzvolumen, in welchem Stoffe oder Güter transportiert, transformiert oder gelagert werden oder ihren Wert verändern.

**Raummeter (Ster)**

Rauminhalt von geschichtetem Holz inklusive Hohlräumen zwischen den Holzstücken.

## **Stammholz**

Ausbeute an sägereiwürdigem Holz (auch Rundholz, Sagholz genannt) (BACHMANN 1996).

## **Stoffflussanalyse**

Methode zur Erfassung, Beschreibung und Interpretation von Stoffhaushaltssystemen (BACCINI und BRUNNER 1991).

## **Solares System**

→System, das für seine Energieversorgung weder auf ein →Hinterland noch auf eine Ressourcenzehrung innerhalb des Systemes angewiesen ist. Seine Energieversorgung beruht ausschliesslich auf erneuerbaren Quellen (z.B. direkte Sonneneinstrahlung, Biomasse, Wasserkraft, Wind).

## **System**

Menge von Elementen, zwischen denen bestimmte Beziehungen bestehen (DUDEN 1990). Bei der →Stoffflussanalyse bestehen die Systemelemente aus →Prozessen und →Gütern.

## **Tarif**

Volumentabelle für stehendes Holz mit dem →Brusthöhendurchmesser als Eingangsrösse. Je nach Baumart, Standort und Entwicklungsphase können verschiedene Tarife unterschieden werden.

## **Tariffestmeter (Silve)**

Mass für das stehende Holzvolumen.

## **Transdisziplinär**

Wissen oder Forschung, die sich aus ihren fachlichen bzw. disziplinären Grenzen löst, die ihre Probleme mit Blick auf ausserwissenschaftliche Entwicklungen disziplinenunabhängig definiert und disziplinenunabhängig löst. Dagegen "rücken im Fall von Interdisziplinarität nur auf Zeit partikulares Wissen und disziplinäre Sonderwege ein wenig zusammen" (MITTELSTRASS 1989).

## **Umbauen**

Sämtliche anthropogenen Eingriffe, welche zu einer Veränderung der Struktur →urbaner Systeme führen (z.B. Eingriffe am Wald wie Aufforstung, Verjüngung, Durchforstung oder am Gebäudepark wie Neubau, Abbruch, Renovation).

## **Umtriebszeit U**

Planmässig festgelegter Zeitraum zwischen Begründung und Endnutzung eines →Bestandes. Aus der Umtriebszeit lässt sich die nachhaltige jährliche Verjüngungsfläche ableiten (= Fläche : Umtriebszeit) (BACHMANN 1996).

## **Urbanes System**

Gross-System aus erdgeschichtlich entstandenen (natürlichen oder geogenen) und kulturell gestalteten (anthropogenen) Subsystemen. Es ist ein flächendeckendes, dreidimensionales Netzwerk von vielfältigen sozialen und physischen Verknüpfungen (BACCINI und OSWALD 1998b).

## **Validierung**

Nachweis, dass ein →Modell innerhalb seines Anwendungsbereiches eine für den Anwendungszweck ausreichend treffende Beschreibung des →Systems liefert (SARGENT 1984; CURRY ET AL. 1989).

## **Vollkluppierung**

Inventurverfahren, bei dem alle Bäume ab einem bestimmten →Brusthöhen-durchmesser (Kluppierungsschwelle) erfasst und in Durchmesserklassen eingeteilt werden.

## **Vorrat**

Holzmenge eines →Bestandes, ausgedrückt in →Tariffestmetern. Die Schweizer →Ertragstafeln weisen den Holzvorrat an →Derbholz einschliesslich Rinde (bei Fichte nur Schaftderbholz) aus.

## **Wohnfläche**

Summe der Fläche sämtlicher Zimmer, Küchen, Kochnischen, Badezimmer, Toilettenräume, Reduits (Abstellräume), Gänge, Veranden usw. Zusätzliche separate Wohnräume (z.B. Mansarden), offene Balkone und Terrassen sowie nicht bewohnbare Keller- und Dachgeschossräume fallen bei der Berechnung ausser Betracht. Die Wohnfläche kann in erster Näherung in →Bruttogeschossfläche umgerechnet werden durch Multiplikation mit dem Faktor 1.3 (GABATHULER und WÜEST 1984).

## **Zuwachs**

Laufender jährlicher Zuwachs verstanden (gegenwärtige Zuwachsleistung aufgrund der tatsächlichen Bestandesverhältnisse) (KRAMER 1985).

## **Zwangsnutzung**

Holzschläge, welche durchgeführt werden müssen, weil die Bäume bereits abgestorben sind oder so starke Schäden aufweisen, dass sie in absehbarer Zeit absterben werden (BACHMANN 1996).

## **Zwischennutzung**

Nutzung von Holzmengen, die bei der →Hiebsatzbestimmung nicht mitberücksichtigt wurden (BACHMANN 1996).

## Einleitung

### 1.1 Von der forstlichen Nachhaltigkeit zur nachhaltigen Entwicklung

Der Begriff der Nachhaltigkeit taucht nachweislich zum ersten mal um 1713 im Buch "Sylvicultura oeconomica" des sächsischen Berghauptmannes H.C. von Carlowitz auf (STEINLIN 1997):

*"Wird derhalben die grösste Kunst, Wissenschaft, Fleiss und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen, wie eine sothane Conservation und Anbau des Holzes anzustellen, dass eine continuierliche, beständige und nachhaltende Nutzung gebe, weilen es eine unentbehrliche Sache ist, ohne welche das Land in seinem Esse (=Wesen, Dasein) nicht bleiben mag."*

Darin wird das Ziel einer nachhaltenden Holznutzung formuliert, ohne aber genau zu sagen, wie dieses Ziel erreicht werden könnte. Erst um die folgende Jahrhundertwende wurden erste Modelle entwickelt (HARTIG 1795, 1808; COTTA 1804, 1820, HUNDESHAGEN 1826), mit deren Hilfe die forstliche Nachhaltigkeit

## 1. Einleitung

auch umgesetzt werden konnte<sup>1</sup>. Die Disziplin der Forstwissenschaften war geboren. Die Nachhaltigkeit wurde zuerst beschränkt auf die Schaffung und Erhaltung des Holzkapitales im Wald. Ein wichtiges Mittel dazu war die Festschreibung des Waldes in seiner Fläche. Heute wird der Begriff ausgeweitet auf sämtliche Funktionen des Waldes, namentlich neben der Nutzungsfunktion die Schutzfunktion (z.B. Artenschutz, Gewässerschutz, Erosionsschutz) und die Wohlfahrtsfunktion (z.B. Erholung). Die räumliche Anordnung des Waldes soll aber gemäss des Zweckartikels des Schweizerischen Waldgesetzes unverändert bleiben. Trotz der laufenden Veränderungen der Definition einer nachhaltigen Forstwirtschaft bleibt die Erhaltung des Waldes zentrales Anliegen.

Zu Beginn der Siebzigerjahre (Bericht des Club of Rome) und verstärkt in den Achtzigerjahren (World Conservation Strategy der IUCN, Bericht der Brundtland Kommission der UN) wurde auf internationaler Ebene deutlich gemacht, dass der Lebensstandard der entwickelten Welt kaum globalisierbar ist. Eine absehbare Weltbevölkerung von 8-10 Milliarden Menschen würde nicht über die dazu notwendigen Ressourcen verfügen. Mit der Konferenz von Rio de Janeiro der UN im Jahr 1992 wurde die nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development) zur Leitidee, um einen Kurswechsel zu propagieren (SCHMIDHEINY 1992).

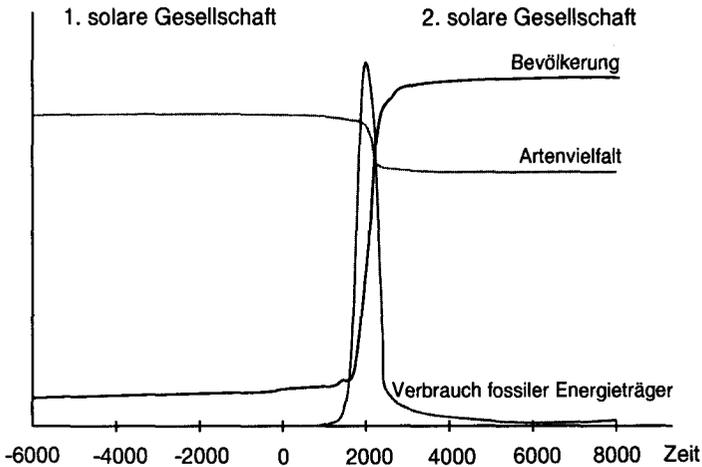
Ähnlich wie bei der forstlichen Nachhaltigkeit kommt die Motivation aus einer Besorgnis um das Wohl künftiger Generationen. Für die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung ist eine Gesellschaft dann nachhaltig, *"wenn sie den Erfordernissen der Gegenwart angemessen gerecht wird, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu beschränken, ihren eigenen Bedürfnissen nachzukommen"* (WCED 1987). Eine umfassende Definition einer nachhaltigen Entwicklung gibt es noch nicht. Einigkeit besteht hingegen darüber, dass die folgenden Prinzipien eingehalten werden müssen (IUCN et al. 1980; WCED 1987):

1. Die Biodiversität darf durch menschlichen Einfluss nicht verkleinert werden (Erhaltung der genetischen Vielfalt).
2. Die Nutzungsrate von Ressourcen darf deren Regenerationsrate nicht überschreiten (Erhaltung des Ressourcenkapitals).
3. Die Rate der Schadstoffemissionen darf die Kapazität zur Schadstoffadsorption der Umwelt nicht übersteigen (Vermeidung von Altlasten).

---

<sup>1</sup> Während sich in Deutschland das Modell des Hochwaldes durchsetzte, wurde in Frankreich unter Colbert bereits Ende des 17. Jahrhunderts das Modell des Mittelwaldes entwickelt und umgesetzt (STEINLIN 1997).

## 1. Einleitung



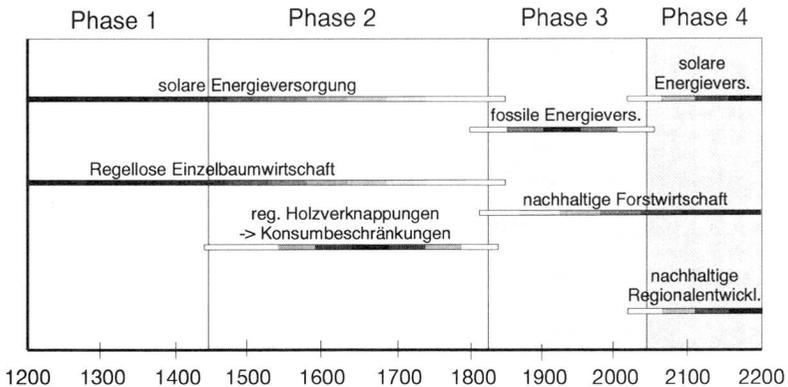
**Abb. 1.1:** Übergang von der 1. solaren Gesellschaft mit kleiner Bevölkerungszahl in eine 2. solare Gesellschaft mit hoher Bevölkerungszahl. Während für die begrenzten fossilen Energieträger die Sonnenenergie als Alternative zur Verfügung steht, kann der Verlust an Artenvielfalt nicht rückgängig gemacht werden. (Weiterentwickelte Grafik von (WINTER 1993) und (BACCINI 1998a).

Eines der zentralen Anliegen einer nachhaltigen Entwicklung ist die Loslösung vom Verbrauch fossiler Energieträger. Die heutige "fossile Gesellschaft" soll derart in eine "zweite solare Gesellschaft" überführt werden, dass dabei weder ökonomische, ökologische noch soziale Zusammenbrüche erzeugt werden (Abb. 1.1). Dieser Übergang muss während des stärksten Bevölkerungswachstums der Menschheitsgeschichte vollzogen werden. Gleichzeitig soll der starke Rückgang der Artenvielfalt aufgehalten werden. Die Komplexität einer Zielvorgabe zur Nachhaltigkeit hat sich stark vergrößert.

Bis heute existieren noch keine klaren Vorstellungen darüber, wie das globale Postulat einer nachhaltigen Entwicklung auf regionaler Ebene operationalisiert und umgesetzt werden kann. Die Zusammenhänge des zu steuernden Systems sind nur sehr bruchstückhaft bekannt. In den heute bekannten Szenarien spielen die erneuerbaren Rohstoffe eine besondere Rolle. Da sich ihre Nutzung an den Grenzen der Tragfähigkeit orientieren muss, stellt sich die Frage, welche Funktionen der Rohstoff Holz künftig übernehmen könnte. Dazu wird zuerst ein Blick auf die vergangene Entwicklung geworfen.

## 1.2 Historischer Abriss der Holzbewirtschaftung im Schweizer Mittelland

In der Geschichte der Holzversorgung haben sich Zeiten von Knappheiten und Überschüssen immer wieder abgewechselt. Dabei gab es oft grosse regionale Unterschiede. Stark vereinfacht können aber vier charakteristische Phasen unterschieden werden (Abb. 1.2).



**Abb. 1.2:** Schematische Darstellung der vier Phasen der Holzversorgung im Schweizer Mittelland. Phase 4 basiert auf einer Hypothese.

### Erste Phase: Regionale Holzversorgung ohne Knappheiten

Obschon sehr frühe Berichte von vereinzelt Holzverknappungen zeugen, kann davon ausgegangen werden, dass bis ins 15. Jahrhundert meist ausreichend Holz vorhanden war. Regelungen zur Holzbewirtschaftung waren nicht erforderlich, da bei zunehmendem Holzbedarf neue Waldungen erschlossen werden konnten. So berichtet z.B. eine handschriftliche Zürcherchronik des 15. Jahrhunderts, dass die Stadt Zürich im Jahr 1384 begonnen hat, ihre Holzversorgung auf den Sihlwald auszudehnen (MEISTER 1903). Die Holzversorgung erfolgte über eine regellose Einzelbaumwirtschaft (HAGEN 1960). Die Energieversorgung wurde fast ausschliesslich über Sonnenenergie sichergestellt, sei es in Form von Sonnenenergie, Wasserkraft, oder in beschränktem Masse Wind. Neben kleineren Mengen an Torf war Holz der einzige Energieträger zur Wärmeengewinnung (STEINLIN 1997).

## 1. Einleitung

### Zweite Phase: Regionale Holzversorgung mit Knappheiten

Es folgte eine Zeit mit zunehmenden regionalen Verknappungen. 1581 erklärte eine Fachkommission, *"der Sihlwald sei überhauen und habe derselbe auf unbestimmte Zeit zu ruhen"* (HAGEN 1960). Am 19. Oktober 1556 sandten die Güttinger Waldleheninhaber eine Petition an den Bischof von Konstanz. Darin beklagen sie sich, *"dass bald überall Holzmangel herrsche und der Wald ziemlich ausgehauen, zum Teil sogar holzlos sei"*. Holzimporte aus weiter entfernten Gebieten ohne Holzhandel waren oft zu teuer und zu energieaufwändig<sup>2</sup>. Um Produktion und Konsum regional aufeinander abzustimmen, wurden zuerst Gesetze über Konsumbeschränkungen eingeführt<sup>3</sup>. Schon im 17. Jahrhundert setzte sich die Erkenntnis durch, dass die Wälder so bewirtschaftet werden sollten, dass ein ewiger andauernder Ertrag möglich ist. Zu Beginn des 18. Jahrhunderts taucht der Begriff der Nachhaltigkeit in Bezug auf die Forstwirtschaft zum ersten mal in Deutschland auf (VON CARLOWITZ 1713). Erste Modelle zur nachhaltigen Bewirtschaftung der Wälder werden Ende des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts v.a. in Deutschland<sup>4</sup> und Frankreich<sup>5</sup> entwickelt. Die Forstwissenschaft wird als Lehr- und Forschungsdisziplin etabliert. Auch in der Schweiz erkennt man die Notwendigkeit einer nachhaltigen Forstwirtschaft, sie kann sich aber noch nicht konsequent durchsetzen. Im Verlaufe des 18. Jahrhunderts spitzt sich die Holznot drastisch zu.

---

<sup>2</sup> Die wichtigsten Gründe für den Bischof von Konstanz, nur in Ausnahmefällen Holz aus thurgauischen Ämtern zu importieren, waren die Transportkosten und das Preisgefälle (HAGEN 1960).

<sup>3</sup> In Kursachsen wurde bereits 1591 eine erste regionale Holzbilanz zur Abstimmung von jährlichen Erträgen und Bedürfnissen erstellt (KURTH 1993, S. 20).

<sup>4</sup> Nachdem Johann Christoph Paulsen 1787 in den Hannoverschen Forsten erstmals die Normalvorratsmethode anwendet, erscheinen in Deutschland die wichtigsten Grundlagenwerke für die Forsteinrichtung des 19. Jahrhunderts: HENNERT (1791), HARTIG G.L. (1795), COTTA (1804, 1820) und HUNDESHAGEN (1826).

<sup>5</sup> Unter Ludwig des XIV. entwickelte Colbert aus strategischen Gründen ein Energiekonzept für Frankreich, in dem die Entwicklung eines nachhaltig bewirtschafteten Mittelwaldes eine zentrale Rolle spielte (STEINLIN 1986).

## 1. Einleitung

### Dritte Phase: Globale Holzversorgung ohne Knappheiten

Erst die Verwendung von fossilen Energieträgern hat der Holzverknappung ein Ende bereitet. Die fossilen Energieträger haben dabei die Wälder in doppelter Hinsicht entlastet: zum einen haben sie Holz als wichtigsten Energieträger abgelöst. Zum anderen haben sie dazu beigetragen, dass Holz über grössere Distanzen transportiert werden kann. Regionale Knappheiten können durch die Erschliessung des globalen Hinterlandes mit einem weltweiten Holzhandel ausgeglichen werden. Die Forstwirtschaft des Schweizer Mittellandes leidet heute weniger unter einer Übernutzung als vielmehr unter einer Unternutzung der Wälder<sup>6</sup>.

Auch wenn für die Schweiz heute keine Holzknappheiten herrschen, kann die dritte Phase der Holzversorgung auf globaler Ebene nicht als nachhaltig bezeichnet werden, da vor allem die tropischen Wälder übernutzt werden. Viele Entwicklungsländer stehen heute noch in der zweiten Phase und können sich eine Holzversorgung aus dem globalen Hinterland<sup>7</sup> nicht leisten.

Die Schweizer Forstpolizeigesetzgebung von 1902, welche durch das Waldgesetz von 1991 abgelöst wurde, hat sich als eines der wirksamsten Instrumente zum Schutze des Waldes und sogar zur Vermehrung der Waldfläche erwiesen<sup>8</sup> (vgl. Abb. 2.7). Die bestehende Waldfläche wird in diesem Gesetz praktisch als unveränderlich festgelegt.

---

<sup>6</sup> Die Unternutzung hat vielerlei Ursachen. In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts und in der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts war eine Aufstockung des Vorrates notwendig, um eine optimale Holzproduktion zu erreichen. Deshalb wurden generell die Hiebsätze deutlich unter dem laufenden Zuwachs angesetzt. Um sicher zu gehen, wurde aber auch das Zuwachspotential tendenzmässig und systematisch unterschätzt (STEINLIN 1998). Heute tragen auch die niedrigen Holzpreise zur Unternutzung bei.

<sup>7</sup> Das Hinterland einer Region bezeichnet alle externen Gebiete, welche zur Aufrechterhaltung der menschlichen Aktivitäten innerhalb der Region in irgend einer Form beansprucht werden. (z.B. externe Waldgebiete zur Erholung oder zur Holzversorgung).

<sup>8</sup> Die Bewilligungspflicht für Rodungen hat zunehmend den Charakter eines Verbotes mit Bewilligungsvorbehalt angenommen (JAISSE S.M. 1994, S. 1).

## 1. Einleitung

### Vierte Phase: Globale Holzversorgung mit Knappheiten

Es gibt gute Gründe zur Annahme, dass die dritte Phase durch eine vierte abgelöst wird, in der global Holzknappheiten auftreten werden:

- Steigender Welt-Holzverbrauch<sup>9</sup>
- Netto-Abnahme der globalen Waldfläche<sup>10</sup>
- knapper werdende fossile Energieträger

Wie aus den Fussnoten (9,10) zu entnehmen ist, wird heute erst etwa ein Drittel bis die Hälfte des globalen jährlichen Holzzuwachses genutzt. Nicht der gesamte Zuwachs ist aber nutzbar. STEINLIN (1988) unterscheidet Einschränkungen technischer, wirtschaftlicher (Rentabilität) und rechtlicher Art (z.B. Nationalparks, Schutzgebiete oder Bannwälder). Wenn sich die Weltbevölkerung im Verlaufe des 21. Jahrhunderts verdoppelt, so ist abzusehen, dass der Handlungsspielraum in verschiedener Hinsicht massiv eingeschränkt wird:

- Die Artenvielfalt wird zunehmend bedroht durch die Nutzung von Primärwäldern.
- Die Wahl von Baumarten und Sortimenten wird eingeschränkt.
- Der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch erreicht physische Grenzen.

Die Entwicklung dicht besiedelter (urbaner) industrialisierter Regionen spielt dabei eine entscheidende Rolle, da sie bereits heute mehr als 80% des Ressourcenverbrauches verursachen. Die Frage nach dem neu begrenzten Hinterland zur Holzversorgung wird an Bedeutung gewinnen.

---

<sup>9</sup> Laut FAO-Erhebungen ist der Welt-Holzverbrauch von 1.9 Mia m<sup>3</sup>/a im Jahr 1961 auf 3.4 Mia m<sup>3</sup>/a im Jahr 1991 angestiegen. Für das Jahr 2010 rechnet sie mit einem Verbrauch von 5.1 Mia m<sup>3</sup>/a (FAO 1995). KALLIO und DYKSTRA (1987) berechneten den Welt-Holzverbrauch im Jahr 1987 bereits auf 4.4 Mia m<sup>3</sup>/a und schätzen den Verbrauch im Jahr 2025 auf 6.6 Mia m<sup>3</sup>/a (Das dazu verwendete Modell (GTM) wurde am IIASA entwickelt, vergleiche Kapitel 2.2.2). Dabei wird eine Effizienzsteigerung angenommen. Die Zunahme wird in erster Linie mit dem Bevölkerungswachstum erklärt (SHARMA 1992).

<sup>10</sup> Die globale bestockte Fläche wird von der FAO auf 5.3 Mia ha geschätzt, wovon 2.9 Mia ha geschlossener Wald, 0.7 Mia ha offener Wald und 1.7 andere bestockte Flächen sind (FAO 1995). Der Holzzuwachs dieser totalen bestockten Fläche wird von STEINLIN (1979) auf 7-9 Mia m<sup>3</sup>/a, von SHARMA (1992) auf 11 Mia m<sup>3</sup>/a geschätzt. Diese gesamte bestockte Fläche hat laut FAO-Statistik von 1980-1990 durchschnittlich netto um 11 Mio ha (0.2%) pro Jahr abgenommen. Sharma berichtet von neueren Untersuchungen, wonach die Tropenwaldzerstörung auf 17-20 Mio ha pro Jahr geschätzt werden, was einer globalen Netto-Waldflächenreduktion von rund 0.3% entsprechen würde. Bei einer konstanten Entwicklung würde die globale Waldfläche somit in den nächsten 50 Jahren um 10-15% abnehmen, womit der Zuwachs, sehr grob geschätzt, auf rund 6-10 Mia m<sup>3</sup>/a schrumpfen würde.

### 1.3 Stand der Beschreibung des Holzhaushaltes

Die Erfassung des Holzhaushaltes hat in der Schweiz eine lange Tradition. Seit dem 19. Jahrhundert werden Vorrat und Nutzung des Waldes auf forstbetrieblicher Ebene systematisch erfasst, um damit die Strategien der Waldbewirtschaftung zu unterstützen (z.B. Festlegung des Hiebsatzes). Auch die Holzwirtschaft verwendet seit langem Holzflussuntersuchungen der gesamten Verarbeitungskette auf regionaler Ebene (z.B. kantonale oder nationale), um damit verschiedene Entscheidungen zu unterstützen. In jüngerer Zeit werden auf kantonaler Ebene auch Untersuchungen der Altholzgenese gemacht. Diese sind vor allem motiviert durch die Frage der künftig anfallenden Altholzmenge aus Gebäudeabbrüchen beim Übergang von der wilden Entsorgung zur energetischen Verwertung (Planung von Entsorgungsanlagen). Die Erfassung der Altholzmengen basiert auf der Befragung von Abbruch- und Transportunternehmungen (DENDROPLAN 1990). WÜEST & PARTNER (1995) haben erstmals die Altholzmengen in Bezug zum Gebäudepark gebracht. Eine Verknüpfung mit der Holzwirtschaft besteht aber noch nicht.

Erfassung und Steuerung des Holzhaushaltes sind heute sektoriell orientiert. Damit sind diverse Nachteile verbunden:

1. Die Daten werden nicht miteinander verknüpft. Damit entsteht ein grösserer Aufwand für jeden Sektor, "seine" Daten selbst zu erheben.
2. Die Auswirkungen von einzelnen Veränderungen auf den gesamten Holzhaushalt können dadurch nicht erfasst werden.
3. Eine gezielte Regelung des gesamten Holzhaushaltes ist auf dieser Ebene nicht möglich.

## 1.4 Arbeitshypothesen

Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeiten für dicht besiedelte, waldreiche Regionen wie das Schweizer Mittelland - sogenannte urbane Systeme<sup>11</sup> - das globale Postulat einer nachhaltigen Entwicklung in Bezug auf den Holzhaushalt umzusetzen. Sie beruht auf folgenden Arbeitshypothesen:

1. Das Konzept der forstlichen Nachhaltigkeit muss ersetzt werden durch eine umfassendere Definition einer nachhaltigen Regionalentwicklung, welche die Wälder als Bestandteile urbaner Systeme miteinschliesst.
2. Produktion und Konsum von Holz sollen regional aufeinander abgestimmt werden. Dies ist *ein* Ansatz zur regionalen Umsetzung desjenigen Kriteriums, welches die Nutzung der erneuerbaren Ressourcen global begrenzen will. Damit soll gewährleistet werden, dass der Hinterlandbedarf urbaner Regionen in Grenzen gehalten werden kann und die Möglichkeiten schwächerer Regionen nicht beeinträchtigt werden. Die Kriterien für eine geeignete Regionswahl zur Abstimmung von Produktion und Konsum werden hier nicht weiter untersucht.
3. Dazu sind physiologische Modelle der Holzbewirtschaftung erforderlich, welche Produktion, Verarbeitung, Konsum und Entsorgung miteinander verknüpfen. Die physiologischen Modelle der Holzbewirtschaftung sollten sich aber nicht an einer "Optimierung" der Holzflüsse, sondern an einer nachhaltigen Regionalentwicklung orientieren, bei der der Holzhaushalt Teil eines umfassenderen Systems ist.
4. Die räumliche Anordnung der Wälder innerhalb der gesamten Kulturlandschaft soll neu diskutiert werden. Die heutigen Wälder des Schweizer Mittelandes sind das Resultat eines kulturellen Prozesses, in dem ihre Rolle als Ressource immer wieder neu definiert wurde. Sie erfüllen verschiedene und sich in ihrer Bedeutung verändernde Funktionen für den Menschen. In den vergangenen Jahrzehnten haben sie eine zunehmende Bedeutung als Erholungsraum und als Habitat für verschiedene Tierarten erhalten (Kriterium der

---

<sup>11</sup> Ein urbanes System ist ein Gross-System, zusammengesetzt aus erdgeschichtlich entstandenen (natürlichen oder geogenen) und kulturell gestalteten (anthropogenen) Subsystemen. In einem urbanen System verschwindet die klare Trennung zwischen Stadt und Land, obwohl die land- und forstwirtschaftlichen Flächenanteile dominieren können (BACCINI und OSWALD 1998).

## 1. Einleitung

Biodiversität). Die forstlichen Biozöosen werden hier nicht in Frage gestellt, wohl aber gewisse Standorte.

5. Die Untersuchung geht davon aus, dass eine weitgehende Loslösung von fossilen Energieträgern während des 21. Jahrhunderts unumgänglich ist (Kriterium der Nutzung von Ressourcen). Dies ist verbunden mit einem Umbau der gesamten Infrastruktur (BACCINI und OSWALD 1998b). Ein zu überprüfender Ansatz besteht darin, den gesamten Gebäudepark in ein "regional solares System" umzubauen. Als Energiequellen für die Wärmeversorgung stünden dafür die direkte Sonneneinstrahlung (Nutzung z.B. durch Sonnenkollektoren) sowie regional produzierte Biomasse zur Verfügung. Die Rolle von Holz als Baumaterial und Energieträger müsste dabei neu überdacht werden.
6. Es wird angenommen, dass die heute im Pilotmasstab erprobten Technologien (Inventionen) in einem Zeitraum von 50 Jahren realisiert werden können (Innovationen). Heute noch rein spekulative technische Systeme werden nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass solche Innovationen auch wirtschaftlich sein werden, ohne dies näher zu untersuchen.

## 1.5 Fragen

Ziel der Arbeit ist es, ein regionales Modell zu entwickeln, welches Wald, Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, -konsum und -entsorgung miteinander verknüpft, um damit anhand von Szenarien verschiedene künftige Funktionen von Holz zu diskutieren. Die Arbeit beschränkt sich auf dasjenige Kriterium einer nachhaltigen Entwicklung, welches die Nutzung von Ressourcen begrenzt. Folgende Fragen sollen dabei beantwortet werden:

1. Inwiefern können physiologische Modelle der Holzbewirtschaftung einen Beitrag zur Diskussion einer nachhaltigen Regionalentwicklung leisten?
2. Wie kann der Holzhaushalt einer urbanen Region im 20. Jahrhundert charakterisiert werden? Welches sind seine wichtigsten Einflussgrößen?
3. Welchen Einfluss haben unterschiedliche regionale Entwicklungsszenarien für das 21. Jahrhundert auf den Holzhaushalt? Welche Funktionen können Wald und Holz künftig übernehmen?

## 1.6 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 werden methodischen Grundlagen zum Aufbau der Holzbewirtschaftungsmodelle und zur Wahl der Szenarien beschrieben. Im 3. Kapitel wird ein einfaches quasistationäres Modell präsentiert, mit dessen Hilfe erste zeitunabhängige Szenarien (Zustände) diskutiert werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse über die Systemeigenschaften bilden die Grundlage für das im 4. Kapitel beschriebene dynamische Holzbewirtschaftungsmodell XYLOIKOS. Mit dessen Hilfe wird insbesondere die Dynamik der Holzlagerbestände (Wald und Gebäudepark) untersucht. Mit XYLOIKOS wird die Entwicklung der Holzbewirtschaftung von 1900 bis 2100 simuliert. Die Simulation des 20. Jahrhunderts dient zur Kalibrierung und Validierung des Modelles. Verschiedene Entwicklungen für das 21. Jahrhundert werden in Form von Szenarien diskutiert. Im Zentrum stehen eine Veränderung von Waldstandorten zur Verbesserung der Erholungseignung und der Artenvielfalt sowie ein Umbau des Gebäudeparkes zu einem "solaren System". In Kapitel 5 werden inhaltliche und methodische Folgerungen aus den Modellen gezogen. Eine ausführliche Formulierung von XYLOIKOS befindet sich im Anhang.

## ***Methoden und Untersuchungsregion***

### **2.1 Die Methode der Stoffflussanalyse**

Die Stoffflussanalyse ist eine Methode zur Erfassung der Stoff- und Energieflüsse von anthropogenen Systemen. Stoffhaushaltsmodelle werden für die Untersuchung von Regionen, aber auch von Produkten, Dienstleistungen oder Unternehmen eingesetzt. BACCINI und BRUNNER (1991) beschreiben den anthropogenen Stoffwechsel mit Hilfe von "menschlichen Aktivitäten". Dabei handelt es sich um Grundbedürfnisse, welche als Kulturkonstanten erhalten bleiben und nicht substituiert werden können, sich aber in der Art ihrer Befriedigung laufend verändern können. Es sind dies Ernähren, Wohnen & Arbeiten, Transportieren & Kommunizieren und Reinigen. Für die Holzbewirtschaftung sind vor allem die Aktivitäten Wohnen & Arbeiten (Bau- und Möbelholz) und Transportieren & Kommunizieren (Papier) von Bedeutung. Mit dem Ansatz der menschlichen Aktivitäten können Veränderungen über grosse Zeiträume von mehreren Generationen untersucht werden. In einem normativen Schritt werden Indikatoren (Stoffe oder Energie) ausgewählt. Mit Hilfe der mathematischen Beschreibung

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

von Stoffhaushaltssystemen (BACCINI und BADER 1996) lassen sich solche Systeme quasistationär oder dynamisch simulieren.

Bis heute existieren noch keine eingehenden Untersuchungen der Holzbewirtschaftung mittels Stoffhaushaltsmodellen. Trotzdem besteht eine Tradition der Erfassung und Bewertung von Holzflüssen, jedoch mit anderen Zielsetzungen.

### Nomenklatur

Mit der Stoffflussanalyse wird der Stoffwechsel anthropogener Systeme mittels genau definierter Systemelemente beschrieben (BACCINI und BADER 1996). Es sind dies Prozesse, Güter und Stoffe oder Energie.

- Prozesse sind Bilanzvolumen, in denen Transport, Transformation, Lagerung oder Wertveränderungen von Stoffen und Gütern auftreten können. Sie werden durch Rechtecke symbolisiert.
- Güter sind Stoffe und Stoffgemische, die vom Menschen bewertete Funktionen erfüllen. Es handelt sich um Flüsse zwischen zwei Prozessen. Sie werden durch Pfeile symbolisiert.
- Stoffe sind chemische Elemente und chemische Verbindungen.

Die Mathematische Beschreibung erlaubt, das Stoffhaushaltssystem quantitativ zu untersuchen für den stationären und den dynamischen Fall inklusive der Diskussion der inneren Eigenschaften und ihres Einflusses auf die Entwicklung des Systems.

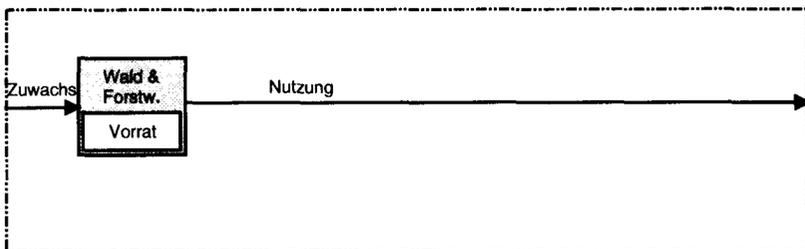
Die auf Stoffhaushaltssystemen basierenden mathematischen Modelle gehören zu den Prozessmodellen. Es handelt sich dabei um mechanistische Modelle, welche bestimmte Phänomene erklären können (BOSSEL 1996). Aus einem Stoffhaushaltssystem können die Bilanzgleichungen über sämtlichen Prozessen abgeleitet werden und umgekehrt. Die Bilanzgleichungen gewährleisten, dass die Art der Verknüpfungen der einzelnen Prozesse (die Systemstruktur) erhalten bleibt. Sie sagen aber noch nichts aus über das *Systemverhalten*. Um dieses zu beschreiben, braucht es neben den Bilanzgleichungen weitere Systemgleichungen, die sogenannten *Modellansätze*. In diesen tauchen die *Systemparameter* auf (z.B. Bevölkerungsentwicklung, Pro-Kopf-Konsum, Recyclingrate). Die Systemparameter selbst haben in der Regel rein beschreibenden Charakter.

## 2.2 Stand der Modellierung

Im folgenden werden Ansätze von bekannten Holz- und Umweltmanagementmodellen diskutiert. Die jeweiligen Systeme werden in stark vereinfachter Form in der Nomenklatur des Stoffhaushaltes dargestellt.

### 2.2.1 Waldentwicklungsmodelle

Die Forstwirtschaft orientiert sich vor allem an Modellen, welche das System "Wald & Forstwirtschaft" betrachten. Vereinfacht ausgedrückt beschreiben diese Modelle die Wechselwirkung von Zuwachs, Vorrat und Nutzung von Holz (Abb. 2.1). Dabei muss unterschieden werden zwischen regionalen oder betrieblichen Untersuchungen und Untersuchungen an Einzelbeständen. Erkenntnisse über das Wachstum werden vorwiegend an Einzelbeständen gewonnen. Betriebliche und regionale Entscheidungen orientieren sich dagegen eher an betrieblichen Untersuchungen. Dazu werden Entwicklungsstufenmodelle eingesetzt. Die Erkenntnisse aus den Einzelbestandesuntersuchungen fließen nur sehr bedingt in die betrieblichen Modelle ein. In Kapitel 4.2.2 wird von der Systembeschreibung her erläutert, warum diese Verknüpfung erschwert wird. Im folgenden wird die Entwicklung in der Bestandesmodellierung behandelt.



**Abb. 2.1:** Vereinfachte Darstellung des Systemes von Waldwachstumsmodellen.

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

Moderne Waldwachstumsmodelle beschreiben diese Grössen in ihrer Abhängigkeit von den Umweltkompartimenten Boden, Wasser und Luft. Sie behandeln aber nicht ganze Wälder einer Region, sondern einzelne Bestände.

### Ertragstafeln

Bereits Ende des 18. Jahrhunderts wurden die ersten Ertragstafeln von G.L. Hartig und J.C. Paulsen entwickelt (KRAMER et al. 1988). Es handelt sich dabei um Erfahrungswerte, die für verschiedenen Altersperioden die Nutzung und den Vorrat des verbleibenden Bestandes angeben. Dieses Prinzip wurde in der Folge durch die Anlage von unterschiedlichsten Dauerversuchsflächen verfeinert und findet heute immer noch breite Anwendung in den Ertragstafeln für gleichaltrige Reinbestände (z.B. BADOUX 1968).

### Empirische Modelle

Die elektronische Datenverarbeitung und statistische Methoden ermöglichten die Entwicklung von *Bestandessimulatoren*, welche die Bestandesentwicklung in mathematischen Funktionen ausdrücken. Beispiele sind CACTOS (WENSEL 1987), FOREST (EK und MONSERUD 1974), MELA (SIITONEN 1983), PROGNOISIS (WYKOFF 1982) und STEMS (BELCHER et al. 1982). *Empirische Modelle* sind wie Ertragstafeln beschreibende Modelle. Sie sind strenggenommen nur bei Versuchsbedingungen gültig. LEMM (1991) entwickelte ein auf Regressionsmethoden beruhendes Simulationsmodell auf forstbetrieblicher Ebene, mit dessen Hilfe verschiedene Waldentwicklungen für unterschiedliche Waldschäden langfristig nach Sortimenten prognostiziert und mit Erlösen und Kosten monetär bewertet werden können.

### Prozessmodelle

Erst neuere Entwicklungen in der Messtechnik und der Prozessmodellierung ermöglichten eine physiologische Beschreibung des Pflanzenwachstums (z.B. Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik). Prozessmodelle haben stärker erklärenden Charakter und können gültige Aussagen auch dann liefern, wenn sich die äusseren Bedingungen verändern. Damit eignen sie sich, um Auswirkungen von Umweltveränderungen auf das Waldwachstum zu simulieren. Seit Beginn der 80er Jahre wurde eine grosse Anzahl solcher Modelle entwickelt (AGREN und AXELSSON 1980; MC MURTRIE und WOLF 1983; MOHREN 1983; MÄKELÄ und HARI 1986;

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

WEST 1987; VALENTINE 1990; SIEVÄNEN 1992; BOSSEL 1994). Heute zeichnet sich ein Übergang ab von einer massenleistungsorientierten Ertragskunde, die Zuwachsprozesse in strukturarmen Reinbeständen dendrometrisch verfolgt, zu einer systemorientierten Waldwachstumsforschung, die biologische Erklärungsmuster und ökologische Steuerprogramme für das Wachstum strukturreicher Rein- und Mischbestände anstrebt (PRETZSCH 1995). Dabei kommen vermehrt *einzelbaumorientierte Wachstumssimulatoren* zur Anwendung (z.B. SILVA von PRETZSCH 1995), welchen ein Strukturgenerator (z.B. STRUGEN von PRETZSCH 1993) vorgeschaltet wird.

### Fazit

Es besteht ein grosser Erfahrungsschatz in der Modellierung von Waldökosystemen. Diese Modelle tragen zum Systemverständnis der Wechselwirkungen zwischen Waldwachstum und den Umweltkompartimenten bei. Sie basieren auf der Untersuchung von Einzelbeständen. Auf forstbetrieblicher oder regionaler Ebene werden Entwicklungsstufenmodelle eingesetzt. Diese verwerten die Erkenntnisse aus den Einzelbestandesuntersuchungen nur sehr beschränkt.

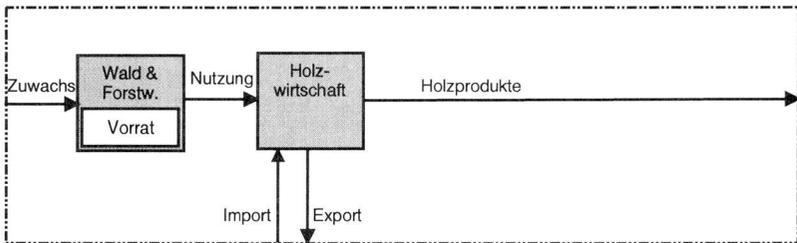
### 2.2.2 Ökonomische Forstsektormodelle

Nachdem die schnell wachsende Holzwirtschaft in Skandinavien und USA in den Sechziger- und Siebzigerjahren zunehmend an die Grenzen ihrer eigenen Holzvorkommen zu stossen drohte, stieg das Bewusstsein für eine Abstimmung von Holzproduktion und Holzverarbeitung. Dazu wurden Forstsektormodelle entwickelt. Dabei handelt es sich um Modelle, welche sowohl die Forst- als auch die Holzwirtschaft sowie ihre Wechselwirkungen beschreiben (SOHLBERG 1986). KALLIO et al. (1987) identifizieren vier Komponenten eines integralen Forstsektormodells: Holzproduktion, Holzverarbeitung, Nachfrage nach Holzprodukten und Handel mit anderen Regionen (Abb. 2.2).

BUONGIORNO (1996) unterscheidet drei Methoden, welche in der Forstsektormodellierung eingesetzt werden: Ökonometrie, lineare Programmierung und System Dynamics. Diese Methoden werden seit den 80er Jahren vermehrt auch kombiniert. Eines der ersten grossen Forstsektormodelle war das SOS-Modell (die Initialen bedeuten Gesellschaft und Forstwirtschaft auf Norwegisch) in Norwe-

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

gen (RANDERS und LÖNNSTEDT 1979; LÖNNSTEDT und RANDERS 1979). Dabei handelte es sich um ein System Dynamics Modell. Das wohl bekannteste Forstsektormodell ist TAMM (Timber Assessment Market Model), welches Ende der 70er Jahre in den USA entwickelt (ADAMS und HAYNES 1980) und später ausgebaut wurde (ADAMS und HAYNES 1986). TAMM ist ein räumliches Marktmodell, welches auf ökonometrischen Methoden und historischen Daten beruht. Das letzte grosse Forstsektormodell ist das am IIASA entwickelte GTM (Global Trade Model) (KALLIO et al. 1987). Es beschreibt den globalen Holzfluss für die nächsten 30-50 Jahre bei unterschiedlichen politischen Strategien (z.B. Zölle, Investitionen in Aufforstungen). Dazu wurde die Erde in 18 Produktions- und Konsum-Regionen unterteilt. Ökonometrische Methoden wurden kombiniert mit Methoden der linearen Programmierung. Der Holzkonsum wird ausschliesslich durch eine Funktion des Realeinkommens abgeschätzt.



**Abb. 2.2:** Vereinfachte Darstellung des Systemes von Forstsektormodellen

Neben diesen drei Methoden wurden zahlreiche einfache stationäre Input-Output-Modelle für den Forstsektor entwickelt. In der Schweiz ist ULRICH (1984) und in Deutschland BRAUTZSCH (1985) zu erwähnen.

### Ökonometrische Modelle

Ein ökonometrisches Modell ist ein Satz von Gleichungen, der das Verhalten der ökonomischen Variablen (z.B. Menge und Preis) erklärt (BUONGIORNO 1996). Die Verwendung ökonometrischer Modelle im Forstsektor begann in den USA in den 50er Jahren mit Studien über Teilsektoren von PRINGLE (1954) und ROBINSON (1960). Die erste Arbeit über den gesamten Forstsektor wurde von MCKILLOP (1967), einem Doktoranden Pringles, geschrieben. In der Folge wurden zahl-

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

reiche weitere ökonomische Modelle entwickelt (ADAMS 1974; HAYNES 1975; ADAMS und HAYNES 1980; ADAMS 1985; BROOKS 1985; GILLES und BUONGIORNO 1987; KALLIO et al. 1987; NEWMAN 1987; BUONGIORNO 1990; BUONGIORNO et al. 1994; BROOKS et al. 1995). Es wurden aber auch Grenzen von rein ökonomischen Modellen offensichtlich.

1. Die Märkte werden in ökonomischen Modellen meist explizit in Form von Angebots- und Nachfragefunktionen modelliert, während die zu Grunde liegende Struktur eher implizit gegeben ist und damit auf einem schwachen theoretischen Fundament steht. Als Folge davon bestehen beträchtliche Probleme, die Parameter zu schätzen (BINKLEY 1987).
2. Die Auswirkungen technologischer Veränderungen auf die Angebotsfunktion können nur bechränkt erfasst werden (BUONGIORNO 1996).

### Lineare Programmierung

Der Ansatz der linearen Programmierung wurde nach dem 2. Weltkrieg durch das von G.B.Dantzig entwickelte Simplex-Verfahren zu einem der am meisten eingesetzten Methoden im Operations Research (DANTZIG und THAPA 1997). Vereinfacht wird dabei ein System mit verschiedenen Prozessen aufgestellt. Die Flüsse entsprechen den Variablen des Systems. Die Systemgleichungen bestehen aus Bilanzgleichungen, Nebenbedingungen und zeitabhängige Transferkoeffizienten sowie einer Zielfunktion, welche es zu optimieren gilt (z.B. Minimierung der Kosten). Die Nebenbedingungen können entweder zu erreichende Ziele oder beschränkte Ressourcen ausdrücken. Die lineare Programmierung ist eine sehr verbreitete Methode in der Forstsektor-Modellierung (KALLIO et al. 1986a; KALLIO et al. 1986b), vor allem wenn die räumliche Verteilung der Märkte wichtig ist (OBIYA et al. 1986). *Die lineare Programmierung hat aber auch Grenzen:*

1. Wegen der vorgegebenen Zielfunktion handelt es sich um normative Modelle.
2. Die Modelle sind in der Regel statisch (lineare Gleichgewichtssysteme). Sie sind damit geeignet, verschiedene Gleichgewichtszustände zu vergleichen, nicht aber um Übergänge zwischen zwei Gleichgewichtszuständen zu beschreiben.
3. Es wird angenommen, dass der Preis exogen vorgegeben wird (BUONGIORNO 1996).
4. Die Input-Output-Koeffizienten sowie die Input-Kosten sind schwer zu ermitteln (BUONGIORNO 1996).

### System Dynamics

Im Gegensatz zur Ökonometrie und zur Linearen Programmierung liegt beim System Dynamics Ansatz (FORRESTER 1961) der Fokus nicht in der Untersuchung von Zuständen, sondern von Veränderungen. Ein System wird durch einen Satz von gewöhnlichen Differentialgleichungen bestimmt. Der Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt wird durch Zustandsvariablen (Lager) beschrieben. Die Veränderungen der Zustandsvariablen werden durch Raten beschrieben, welche Funktionen der Zustandsvariablen und weiterer Parameter sind. Die System Dynamics Methode wurde in verschiedenen regionalen und nationalen Forstsektoranalysen angewandt (LÖNNSTEDT und RANDERS 1979; LÖNNSTEDT 1986; LÖNNSTEDT und PEYRON 1989; HOFSTAD 1990; SCHWARZBAUER 1992). Trotz seiner dynamischen und vielseitigen Anwendungen werden beim System Dynamics Ansatz auch Mängel erwähnt:

1. In System Dynamics Modellen werden neben "harten" quantitativen Daten meist auch "weiche" Daten und Konzepte berücksichtigt (BUONGIORNO 1996). Daher ist die traditionelle Modellvalidierung irrelevant (FORRESTER 1980).
2. Veränderungen der Zustandsvariablen (Lager) werden grundsätzlich durch Raten beschrieben. Dieses Konzept stösst bei der Modellierung anthropogener Systeme oft an Grenzen. So ist beispielsweise eine Beschreibung von Lagerveränderungen durch Vorgabe von Input und Aufenthaltszeiten nicht möglich.
3. Das Gleichgewicht von Menge und Preis wird vernachlässigt. Damit wird ihre Aussagekraft für die Modellierung konkurrierender Märkte eingeschränkt (BUONGIORNO 1996).
4. Bestehende Forstsektormodelle sind nicht darauf ausgelegt, einen Umbau der Waldstandorte zu simulieren.

### Fazit

Auch in der Modellierung des Systemes Wald-Forstwirtschaft-Holzwirtschaft bestehen bereits erste Erfahrungen. Forstsektormodelle zielen darauf ab, die Holzwirtschaft auf das regionale Holzvorkommen abzustimmen. Für die gewählte Fragestellung eignen sich diese Modelle allerdings nur bedingt:

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

1. Die Nachfrage nach Holzprodukten wird durch die Bevölkerungsentwicklung und ökonomische Parameter wie Bruttosozialprodukt pro Kopf, Realeinkommen und das Preisverhältnis gegenüber Substitutionsprodukten erklärt. Die Dynamik des Lagerbestandes von Konsumgütern wird aber nicht berücksichtigt. Für sehr langfristige Betrachtungen von 50-100 Jahren haben sie daher eine schwache Aussagekraft.
2. Sie sind auf die Gestaltung der Holzwirtschaft ausgerichtet, integrieren diese aber nicht in ein umfassenderes System, welches externe Zielvorgaben eines Umbaus urbaner Systeme einschliesst. Die bestehenden Forstsektormodelle sind nicht darauf ausgerichtet, einen Umbau der Waldstandorte zu beschreiben. Der Gebäudepark wird ganz vernachlässigt.
3. Ausser den Prozessmodellen gehen alle Modelle von der Methode aus und nicht von den Phänomenen.

### 2.2.3 Umweltmanagementmodelle

#### Lebenszyklusanalysen oder Ökobilanzen

Ökobilanzen oder Lebenszyklusanalysen (LCA) werden für die Beurteilung von Produkten, Dienstleistungen oder Unternehmen eingesetzt. Sie beschreiben die gesamten Stoffflüsse "von der Wiege bis zur Bahre" und beurteilen deren Auswirkungen auf die Umwelt. Durch normierte Bewertungen lassen sich klare Aussagen ableiten, welche Produkte gesamthaft ökologischer sind. Die LCA-Methode ist im industriellen Bereich weit verbreitet (HEIJUNGS 1997). Sie hat ihren Niederschlag in der ISO-Norm 14040ff gefunden. Im Bereich von Holz wurden schon zahlreiche LCA bzw. Ökobilanzen erstellt (RICHTER und SELL 1992, WINKLER 1997, KNECHTLE 1997, KÜNNIGER und RICHTER 1998). Für die Untersuchung einer nachhaltigen Regionalentwicklung sind sie aber aus folgenden Gründen nicht ausreichend:

1. LCA gehen von einem unveränderlichen Ressourcenkapital aus (statische Bedingungen) und sind damit nicht in der Lage, künftige Knappheiten frühzeitig zu erkennen.

## *2. Methoden und Untersuchungsregion*

2. Herkömmliche LCA wiesen keinen regionalen Bezug auf. Durch den Produkt- oder Dienstleistungsbezug sind sie somit auf die Optimierung von Teilsystemen ausgerichtet. Die Optimierung von Teilsystemen führt aber in der Regel nicht zur Optimierung des Gesamtsystems (vgl. Kapitel 3).
3. Sie sind statisch in ihrer Betrachtungsweise. Es ist nicht möglich, Übergänge zwischen verschiedenen Zuständen zu beurteilen. Dynamische Effekte und Nichtlinearitäten kann die LCA im Gegensatz zur Stoffflussanalyse nicht abbilden.
4. Produkte und Dienstleistungen können bei einem Betrachtungszeitpunkt von mehreren Generationen substituiert werden.
5. Die Frage der Bewertung bleibt weitgehend offen, da die Auswahl der Indikatoren ein normativer Vorgang ist und damit nie abschliessend gemacht werden kann.

### **2.2.4 Fazit**

Es existieren bereits mehr oder weniger ausgereifte Modelle für die Beschreibung des Waldes, der Forst- und der Holzwirtschaft. Für Teilbereiche der Holzbewirtschaftung wurden Ökobilanzen entwickelt, welche aber keinen regionalen Bezug haben und keine Simulation von Veränderungen zulassen.

Es existieren aber noch keine Holzbewirtschaftungsmodelle, welche in übergeordnete Strategien einer nachhaltigen Regionalentwicklung integriert sind. Es bestehen ausserdem noch keine Modelle, welche neben dem Wald, der Forst- und der Holzwirtschaft auch den Konsum und dessen Lagerdynamik berücksichtigen.

## 2.3 Anforderungen an ein Holzbewirtschaftungsmodell für eine nachhaltige Regionalentwicklung

### 2.3.1 Zeithorizont

Es wird angenommen, dass eine nachhaltige Regionalentwicklung langfristige Entwicklungsperspektiven und Zielvorgaben mit einem Zeithorizont von mehreren Generationen erfordert. Modelle, welche den Zielfindungsprozess auf der Basis von Entwicklungsszenarien unterstützen sollen, müssen in der Lage sein, einen entsprechend grossen Zeitraum zu erfassen.

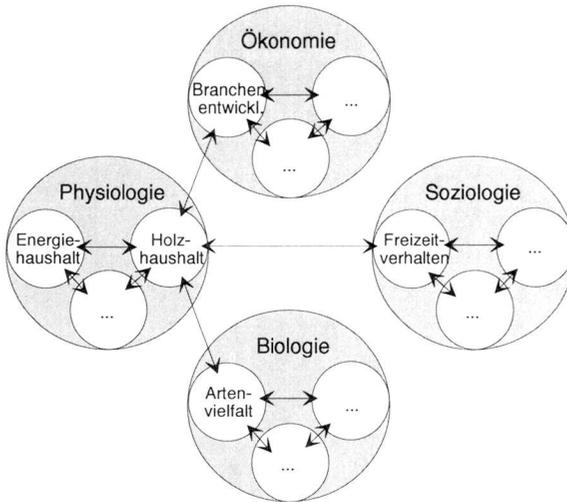
Bei einem so grossen Zeithorizont können viele unvorhersehbare Veränderungen auftreten. So können einzelne Güter, zum Teil auch Funktionen, ihre Bedeutung verändern oder ganz ersetzt werden. Der Fokus sollte daher auf unveränderliche menschliche Grundbedürfnisse (menschliche Aktivitäten<sup>12</sup>) gelegt werden.

### 2.3.2 Integration in übergeordnete Fragestellungen

Der Holzhaushalt ist nur ein Teil eines urbanen Systems. Eine Optimierung von Teilsystemen führt aber in der Regel nicht zu einer Optimierung des ganzen Systems. Die Optimierung des Holzhaushalts kann somit nicht oberstes Anliegen sein. Um mögliche Rollen der Holzbewirtschaftung in einer nachhaltigen Regionalentwicklung zu untersuchen, müssen Wechselwirkungen mit anderen Aspekten (z.B. andere Ressourcen wie Energieträger, Kies oder andere Disziplinen wie Ökonomie oder Soziologie) mit einbezogen werden (Abb. 2.3).

---

<sup>12</sup> BACCINI und BRUNNER (1991) beschreiben den urbanen Metabolismus mit vier Aktivitäten: Ernähren, Wohnen & Arbeiten, Transportieren & Kommunizieren, Reinigen. Für den Holzhaushalt sind die Aktivitäten "Wohnen & Arbeiten" (Holz in Gebäudekonstruktionen und Inneneinrichtungen sowie Brennholz) und "Transportieren & Kommunizieren" (Holz zur Papierherstellung) von Bedeutung. Für die Beschreibung von Kulturlandschaften haben MÜLLER et al. (1998) die Aktivität Ernähren um Erholen ergänzt, wo der Wald eine wichtige Rolle spielt.



**Abb. 2.3:** Integration des Holzhaushaltes in ein urbanes System. Der Holzhaushalt steht im Umfeld anderer physischer Ressourcen (z.B. Energie, Wasser, Kies), welche ebenfalls mit physiologischen Modellen beschrieben werden können. Andererseits stehen die physiologischen Phänomene aber auch im Umfeld von weiteren Phänomenen, welche durch andere Methoden und Disziplinen beschrieben werden, hier exemplarisch dargestellt durch Biologie, Soziologie und Ökonomie.

Wechselwirkungen zwischen zwei Ressourcen können mit Hilfe von erweiterten physiologischen Modellen beschrieben werden. Übergeordnete Fragestellungen, welche die Wechselwirkungen mit anderen Disziplinen betreffen, können nicht disziplinär untersucht werden. Ein erster Schritt einer Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen besteht darin, in einem transdisziplinären Verfahren übergeordnete Zielvorgaben zu formulieren. Diese Zielvorgaben werden in Entwürfen oder Szenarien umgesetzt, welche disziplinär auf ihre Konsequenzen untersucht werden können (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Zielvorgaben betreffen hier exemplarisch die Veränderung des Landnutzungsmusters und den Umbau des Gebäudeparkes.

### 2.3.3 Systemwahl

Das Modell muss so aufgebaut werden, dass einerseits der gesamte Holzhaushalt erfasst wird, dass es andererseits aber auch Antworten geben kann auf die Auswirkungen der externen Zielvorgaben.

Um den gesamten Holzhaushalt zu erfassen, muss das System gegenüber den Forstsektormodellen (Abb. 2.2) um den Konsum von Holzprodukten inklusive Entsorgung erweitert werden (Abb. 2.4). Neu ist an diesem Ansatz einerseits, dass durch den Einbezug des Konsumes zwei Holzlager auftreten (Holz im Wald und Holz in Konsumgütern). Die Holzwirtschaft wird als Zwischenglied zwischen diesen zwei Lagern verstanden. Neu ist andererseits auch, dass mit dem Recycling eine Rückkopplung auftaucht.

Um die Auswirkungen der externen Zielvorgaben aufzuzeigen, muss das Modell auf regionaler Ebene Veränderungen der Waldstandorte und Veränderungen der Umtriebszeit erfassen können. Dazu muss ein neuer Ansatz entwickelt werden. Trotzdem kann zu einem grossen Teil auf die Literatur der Forsteinrichtung zurückgegriffen werden.

Um die externen Zielvorgaben zum Umbau des Gebäudeparkes zu berücksichtigen, muss die Dynamik des Holzkonsums in ein Modell zur Beschreibung des Gebäudeparkes integriert werden. Dazu kann nicht auf die Literatur zurückgegriffen werden. Ein entsprechender Ansatz muss neu entwickelt werden.

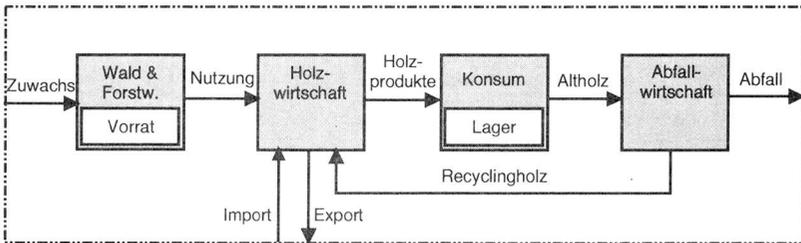


Abb. 2.4: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Systems (nur Holzflüsse).

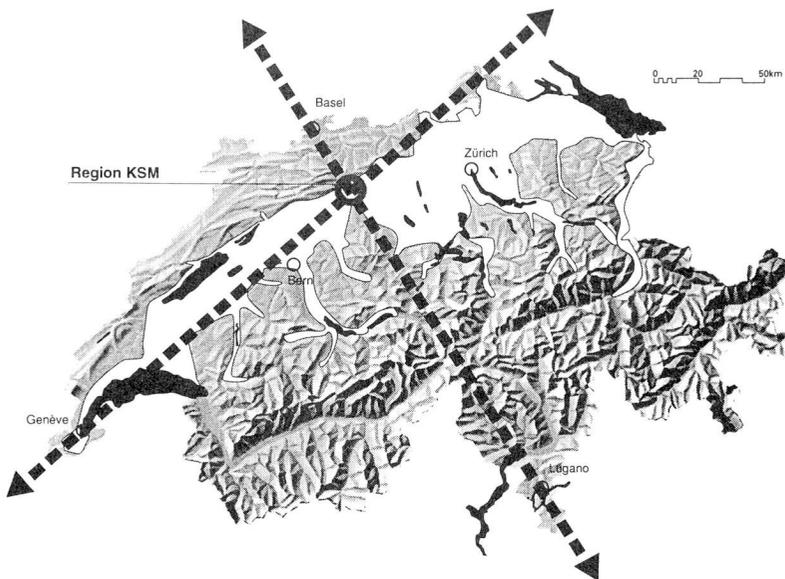
### 2.3.4 Vorgehen

Es wird in zwei Schritten vorgegangen:

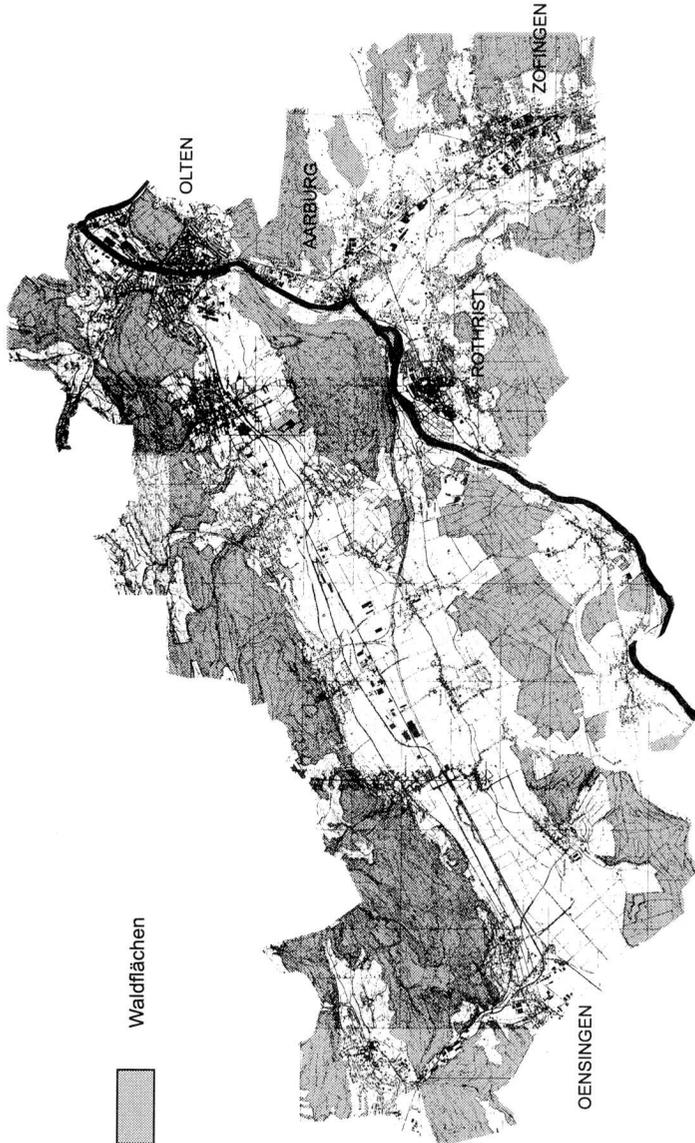
1. *Entwicklung eines quasistationären Modelles* (Kapitel 3): Mit dem quasistationären Modell wird ein erster Überblick über den Holzhaushalt am Ende des 20. Jahrhunderts gewonnen. Darauf aufbauend werden einfache Szenarien eines veränderten Holzhaushaltes diskutiert. Die Szenarien haben aber nicht den Anspruch, Antworten auf übergeordnete Fragestellungen einer nachhaltigen Regionalentwicklung zu liefern.
2. *Entwicklung eines dynamischen Modelles* (Kapitel 4): Das dynamische Modell soll den Holzhaushalt des 20. Jahrhunderts mit seinen Veränderungen abbilden. Damit hat es stärker erklärenden und weniger beschreibenden Charakter als das quasistationäre Modell. In Szenarien für das 21. Jahrhundert wird aber nicht mehr nur der Holzhaushalt für sich allein "optimiert". Das dynamische Modell zeigt exemplarisch auf, wie sich externe Zielvorgaben auf den Holzhaushalt auswirken können und welche neuen Rollen Holz in einer nachhaltigen regionalen Wirtschaft übernehmen könnte. Die externen Zielvorgaben wurden im Rahmen des transdisziplinären Forschungsprojektes SYNOIKOS entwickelt und betreffen die Veränderung des Landnutzungsmusters und den Umbau des Gebäudeparkes.

## 2.4 Die Untersuchungsregion "Kreuzung Schweizer Mittelland"

Die Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "SYNOIKOS - transdisziplinäre Methoden für den Umbau urbaner Systeme" (BACCINI und OSWALD 1998b) durchgeführt. Als Studienobjekt wurde eine etwa 200 km<sup>2</sup> grosse Region im Schweizer Mittelland gewählt und auf den Namen "Kreuzung Schweizer Mittelland" (KSM) getauft. KSM liegt am Jurasüdfuss (Abb. 2.5) und wird durch die Ortschaften Olten-Oensingen-Zofingen begrenzt (Abb. 2.6). Sie liegt peripher zu den vier wichtigsten Wirtschaftsräumen der deutschsprachigen Schweiz (Zürich, Basel, Bern-Mittelland und Zentralschweiz). Trotzdem weist sie, wie das gesamte Mittelland, hohe Energie- und Stoffflüsse auf. Sie wird als Teil des urbanen Systems des Schweizer Mittellandes verstanden.



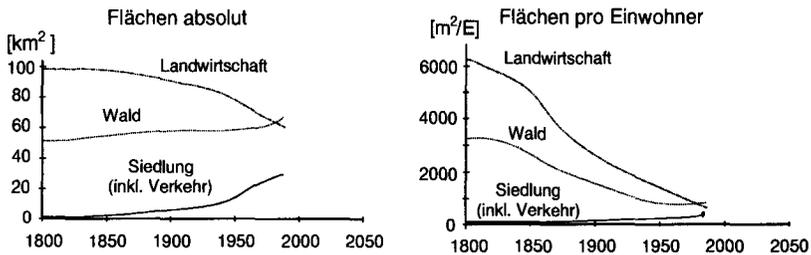
**Abb. 2.5:** Lage der Region KSM im Schweizer Mittelland beim Schnittpunkt der Nord-Süd- und der West-Ost-Transversalen durch die Schweiz. Bildquelle: BACCINI und OSWALD (1998).



**Abb. 2.6:** Untersuchungsregion "Kreuzung Schweizer Mittelland" (KSM). Bildquelle: S. Perrochet in MÜLLER et al. (1998).

## 2. Methoden und Untersuchungsregion

Trotz einer Verfünffachung der Bevölkerung seit 1800 und einer Zunahme der Siedlungsfläche um mehr als das Zehnfache dominieren heute flächenmässig immer noch die land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen mit je etwa 40% Flächenanteilen (Abb. 2.6 und 2.7). Die Ansprüche an die Landschaft haben sich in den letzten zweihundert Jahren stark verändert. Die Verknappung der Ressource Holz und die Besorgnis um die langfristige Holzversorgung waren die Hauptmotive, um im Forstpolizeigesetz von 1902 - heute abgelöst durch das Waldgesetz von 1991 - die Waldflächen gesetzlich zu schützen und dauerhaft festzulegen. Das vor allem in den Fünfzigerjahren rasante Wachstum der Siedlungen (Verdoppelung der Siedlungsflächen seit 1950) erfolgte deshalb fast ausschliesslich auf Kosten der Landwirtschaftsflächen. Die Pro-Kopf-Siedlungsfläche hat sich seit 1800 mehr als verdoppelt. Gleichzeitig ist die Pro-Kopf-Waldfläche rund drei mal kleiner geworden, die Pro-Kopf-Landwirtschaftsfläche ist gar acht mal kleiner geworden (Abb. 2.7).



**Abb. 2.7:** Entwicklung der Flächen in der Region KSM. Die absolute Waldfläche ist zwar leicht angewachsen (das Siedlungswachstum erfolgte ausschliesslich auf Kosten der Landwirtschaftsfläche), die Pro-Kopf-Waldfläche ist dagegen wegen des Bevölkerungswachstums um einen Faktor 4 gesunken. Ab 1914 sind die Flächendaten aus den Arealstatistiken (ESA 1914, 1953, 1972; BfS 1992) entnommen, die früheren Daten wurden aufgrund von alten Landkarten und vereinzelter Gemeindestatistiken abgeschätzt. Die Einwohnerdaten stammen aus den Bevölkerungsstatistiken (BfS 1993b, 1997a).

Beim Wald handelt es sich fast ausschliesslich um Hochwald im Femelschlagbetrieb. Die Fichte ist mit rund 80% die dominante Baumart. Durch Naturverjüngung wird ein allmählicher Umbau in Richtung Laubwald (v.a. Buche) angestrebt.

Leer - Vide - Empty

## ***Quasistationäres Modell***

### **3.1 Einleitung**

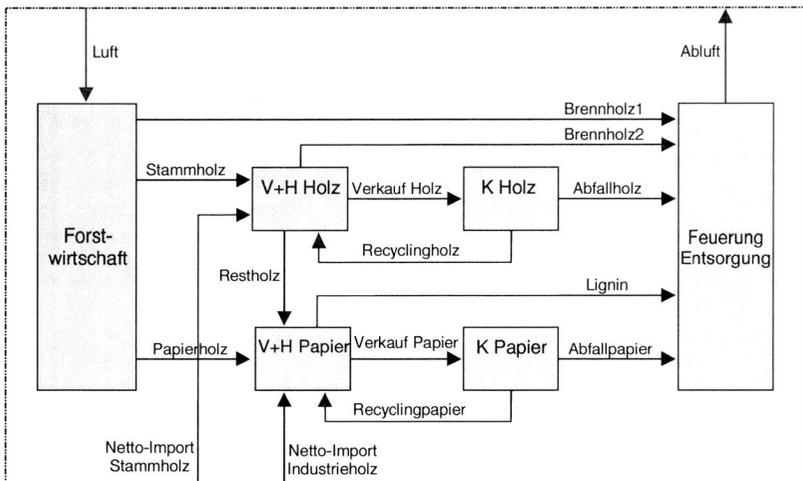
Ein quasistationäres Modell zeichnet sich dadurch aus, dass die Flüsse zeitunabhängig sind. Im Gegensatz zu stationären Modellen, bei denen alle Systemvariablen zeitunabhängig sind (Fließgleichgewichte), können sich beim quasistationären Modell die Lager linear verändern.

Ziel des hier vorgestellten quasistationären Modelles ist es, den Holzflux der Region KSM am Ende des 20. Jahrhundert anhand von wenigen Prozessen grob zu charakterisieren. Mit Hilfe von einfachen Annahmen zum Systemverhalten werden am Beispiel von zwei Szenarien Überlegungen zur Steuerung gemacht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für den Aufbau des dynamischen Modelles.

## 3.2 Modellbeschreibung

### 3.2.1 Systemwahl

Zur Beschreibung des Holzhaushaltes wird ein Modell mit 6 Prozessen gewählt. Ausserhalb der Systemgrenzen liegen die Umweltkompartimente Atmosphäre, Hydrosphäre und Pedosphäre sowie das Hinterland. Die Prozesse sind verknüpft durch 16 Güter.



**Abb. 3.1:** Systemstruktur zur Beschreibung des regionalen Holzhaushaltes mit dem quasistationären Modell.

Der Prozess "**Forstwirtschaft**" umfasst den regionalen Wald und dessen Bewirtschaftung (Pflege, Zwischen- und Endnutzung). Zur Vereinfachung wird nur das Derbholz bilanziert. Die übrigen Bestandteile der Bäume sowie die Umweltkompartimente Boden, Wasser und Luft liegen ausserhalb des betrachteten Systems.

Mit "**V+H Holz**" werden sämtliche Verarbeitungsschritte von Holz (1. und 2. Verarbeitungsstufe, jedoch ohne Faserstoffproduktion zur Papierherstellung) und den Handel mit Rohholz, Halbfabrikaten und Endprodukten bezeichnet. Die

### 3. Quasistationäres Modell

Holzwirtschaft zugeordnet. Bilanziert wird die gesamte Holzwirtschaft, welche die in der Region konsumierten Güter herstellt, unabhängig davon, ob die Betriebe innerhalb oder ausserhalb der Region angesiedelt sind.<sup>13</sup>

Analog sind im Prozess "**V+H Papier**" die Verarbeitungsschritte zur Papierproduktion (Faserstoffgewinnung, Papierproduktion, Herstellung von Papierprodukten) und der Handel mit Papierholz, Faserstoffen und Papier zusammengefasst. Auch hier werden diejenigen Teile der Papierherstellung bilanziert, welche durch den regionalen Konsum verursacht werden.

Die Prozesse "**K Holz**" und "**K Papier**" beschreiben den Konsum von Holz- und Papierprodukten. Sie bilden zugleich die Lager von Holz- und Papierprodukten (z.B. in Gebäudekonstruktionen, Möbel, Bücher).

Im Prozess "**Feuerung und Entsorgung**" werden der Abbruch von Gebäuden, die Entsorgung von Holz- und Papierabfällen sowie die Verfeuerung von Brennholz zusammengefasst. Dabei wird nicht unterschieden, ob die bei der Verfeuerung entstehende Abwärme genutzt wird oder nicht.

#### Indikatorwahl

Die Indikatorwahl ist ein normativer Vorgang. Im folgenden wird nur der Fluss der **Trockensubstanz (TS)** verfolgt, während andere Stoffe und die Energie vernachlässigt werden. Je nach Branche sind sehr unterschiedliche Masseinheiten gebräuchlich (Festmeter, Rohholzäquivalente, Kilogramm). Die Trockensubstanz hat gegenüber diesen Masseinheiten folgende Vorteile:

- Sie ist wie Festmeter robust gegenüber den schwankenden Wassergehalten.
- Sie ist einfach umzurechnen in Emissionen und Energie. Die chemische Zusammensetzung und damit auch der obere Heizwert sind in erster Näherung bei verschiedenen Holzarten gleich und verändern sich nicht während der Verarbeitung und der Nutzung.

---

<sup>13</sup> Für kleinere Regionen mit einer untypischen Holz- und Papierwirtschaftsstruktur (z.B. ohne Sägereibetriebe oder ohne Zellstoffproduktionsanlagen) wird damit eine Nivellierung der Holzflüsse gegenüber den umliegenden Regionen erzielt. Ausserdem werden dadurch die Produktionsabfälle (z.B. Lignin bei der Zellstoffherstellung) internalisiert und das System spiegelt den tatsächlichen regionalen Holzverbrauch wider (Import von Holz, nicht aber von Zellstoff, welches nur etwa 50% der Holz-Trockensubstanz ausmacht).

#### 3.2.2 Modellansatz

Das gewählte System wird durch 22 Systemvariablen (6 Prozesse  $M^{(n)}(t)$  und 16 Güterflüsse  $A_{ij}(t)$ ) beschrieben. Da ein Lager durch zwei Unbekannte beschrieben wird ( $M^{(n)}(t) = M_0 + \dot{M} * t$ ), treten insgesamt 28 Unbekannte auf, welche mit gleich vielen Systemgleichungen beschrieben werden. Neben den 6 Bilanzgleichungen fehlen somit noch 22 Gleichungen, welche als Modellansatz bezeichnet werden und die inneren Eigenschaften des Systems abbilden. Dazu werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Bevölkerung bleibt konstant.
- Die Waldfläche, der Zuwachs der Wälder und die Bewirtschaftungsweise der Wälder bleibt konstant. Bei der dynamischen Betrachtungsweise in Kapitel 4 wird deutlich, dass die Annahme eines unveränderten Zuwachses eine sehr markante Vereinfachung darstellt.
- Die Flüsse "Restholz" und "Brennholz 2" aus dem Prozess "V+H Holz" sind proportional zum gesamthaft verarbeiteten Holz.
- Der Fluss "Lignin" aus dem Prozess "V+H Papier" ist proportional zur verarbeiteten Holzmenge bei der Faserstoffherstellung. Bei der Verarbeitung von Altpapier wird kein Lignin freigesetzt.
- Der Fluss "Recyclingholz" ist proportional zum gesamthaft anfallenden Altholz.
- Der Fluss "Recyclingpapier" ist proportional zum gesamthaft anfallenden Altpapier.
- Der Holz- und Papierkonsum werden als gegeben betrachtet.

Die Systemgleichungen und ihre analytische Lösung sind in Anhang D aufgeführt. Das Modell ist auf EXCEL programmiert.

## 3.3 Daten

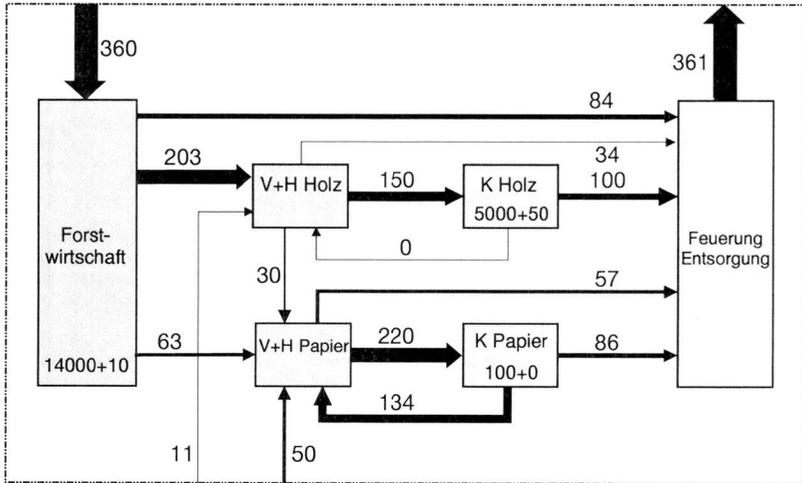
Bis heute gibt es noch keine Region, in der Messungen sämtlicher relevanten Holzflüsse erhoben wurden. Für die Region KSM bedeutet dies, dass viele Daten abgeschätzt werden müssen. Dazu werden verschiedene Methoden angewendet:

- Die Daten aus den Waldwirtschaftsplänen der Bürgergemeinden werden als repräsentativ für den gesamten Wald angenommen. Die Bürgergemeinden besitzen in der Region KSM etwas mehr als 80% der Waldfläche.
- Das Pro-Kopf-Konsumverhalten der KSM-Bewohner wird mangels regionaler Daten aus gesamtschweizerischen Erhebungen entnommen.
- Das Holzlager im Gebäudepark wurde anhand einer Untersuchung im Kanton Aargau (WÜEST & PARTNER 1995) sowie speziell darauf ausgerichteten Diplomarbeiten (GEIGER 1995; LÜTHI 1995) abgeschätzt. Lüthi untersuchte die Holzdicke von alten Gebäuden anhand von Gebäudeabbrüchen. Geiger untersuchte die Holzdicke junger Gebäude anhand von Devis (Werkverträgen der Architekten) nach der Elementkostengliederung (EKG).
- Aus der Bilanzierung eines Prozesses kann jeweils eine Grösse (Fluss oder Lagerveränderung) aus den anderen Input- und Outputflüssen berechnet werden. Sind Messungen von allen Flüssen vorhanden, kann die Bilanzierung zum Fehlerausgleich verwendet werden.

Die zur Parameterberechnung verwendeten Daten sind im Anhang D6 aufgelistet. Dabei werden ausserdem die geschätzten Fehler der Parameter angegeben. Diese liegen bei durchschnittlich 20-30%, in einigen Fällen bis zu 50%. Die Auswirkungen von Parameterfehlern auf die Systemvariablen kann mit Hilfe der mittleren Gauss'schen Fehlerfortpflanzung berechnet werden (siehe Anhang D7). Angesichts der relativen Ungenauigkeit der Daten ist es wichtig, diese bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

### 3.4 Resultate

#### 3.4.1 Ausgangslage am Ende des 20. Jahrhunderts



**Abb. 3.2:** Holzflux von KSM am Ende des 20. Jahrhunderts. Lager in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1}]$  Lagerveränderungen und Fluxe in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$ .

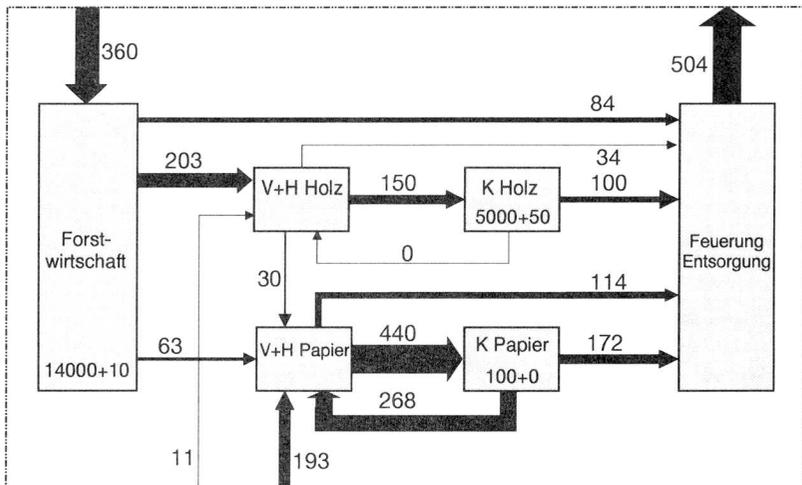
Das grösste Holzlager<sup>14</sup> besitzt die betrachtete Region in den Wäldern mit rund  $14 \text{ t TS} \cdot \text{E}^{-1}$ . Etwa drei mal kleiner ist das Holzlager in den Holzprodukten ( $5 \text{ t TS} \cdot \text{E}^{-1}$ ) - vor allem in den Holzkonstruktionen der Gebäude - und zwei Grössenordnungen kleiner ist das Papierlager ( $0.1 \text{ t TS} \cdot \text{E}^{-1}$ ). Sowohl das Holzlager der Wälder als auch das Lager des verbauten Holzes wachsen leicht mit rund  $0.1\%$  und  $1\%$  pro Jahr. Die durchschnittliche Aufenthaltszeit beträgt beim Papierkonsum weniger als ein Jahr, beim Holzkonsum und bei der Forstwirtschaft liegt sie in der Grössenordnung 10-100 Jahre.

<sup>14</sup> Der Begriff "Holzlager" wird hier in rein physikalischem Sinne verwendet ohne Wertung, ob z.B. beim Wald ein Mindestproduktionsvorrat erreicht ist und das Holz zur Disposition steht.

### 3. Quasistationäres Modell

Der Verkauf von Holzprodukten ( $150 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$ ) und Papierprodukten ( $220 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$ ) liegt in der gleichen Grössenordnung. Das Recyclingsystem beim Papier führte dazu, dass sich sowohl der Holzbedarf ( $30+63+50 = 143 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$ ) als auch die Abfallmenge ( $57+86 = 143 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$ ) verkleinert haben. Ein entsprechendes Recyclingsystem beim Altholz hat sich noch nicht etabliert. Die regionseigenen Wälder liefern rund drei bis vier mal mehr Stamm- als Industrieholz. Das Verhältnis des importierten Holzes ist gerade etwa umgekehrt. Netto importiert die Region rund  $60 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$ . Bei einem Gesamtverbrauch von  $410 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$  entspricht dies einem Selbstversorgungsgrad (SVG) von 85%.

#### 3.4.2 Szenario 1: Verdopplung des Papierkonsums



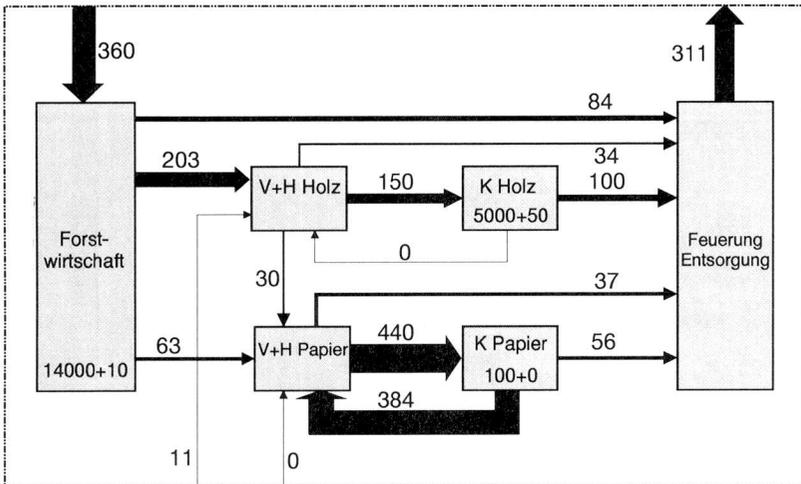
**Abb. 3.3:** Holzflux in KSM bei einer Verdoppelung des heutigen Papierkonsums und gleichbleibender Recyclingrate von 61%. Lager in  $[\text{kg TS}^*E^{-1}]$  Lagerveränderungen und Fluxe in  $[\text{kg TS}^*E^{-1} * a^{-1}]$ .

Bei diesem Szenario wird angenommen, dass der Papierkonsum von heute 220 auf  $440 \text{ kg TS}^*E^{-1}*a^{-1}$  ansteigt. Die Auswirkungen auf den regionalen Holzhaushalt unter den in Kapitel 3.3 beschriebenen Annahmen sind in Abb. 3.3 darge-

### 3. Quasistationäres Modell

stellt. Der Netto-Import von Industrieholz steigt um einen Faktor 3-4 (von 50 auf  $184 \text{ kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ), wogegen der Netto-Import von Stammholz nicht verändert wird. Der SVG mit Holz sinkt damit von 85% auf 65%.

Verschiedene Massnahmen wären möglich, um sich vollständig selbst mit Papierholz zu versorgen. Allein mit einer Erhöhung der Papierrecyclingrate von 61% auf 87% wäre kein Papierholzimport mehr erforderlich (Abb. 3.4). Voraussetzung dafür ist, dass mit den recycelten Faserstoffen eine ausreichende Papierqualität erreicht werden kann.



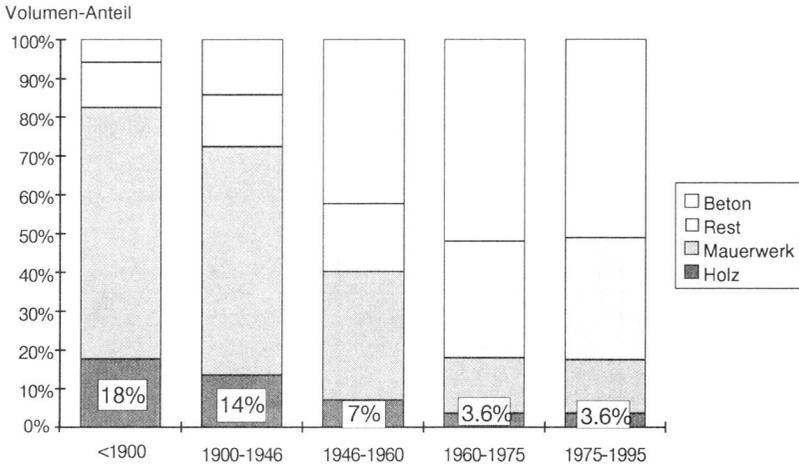
**Abb. 3.4:** Holzflux von KSM bei doppeltem Papierkonsum und Erhöhung der Papierrecyclingrate von 61% auf 87%. Lager in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1}]$  Lagerveränderungen und Fluxe in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$ .

#### 3.4.3 Szenario 2: Vermehrte Holzbauweise

In Ökobilanzen wurde gezeigt, dass Holz für verschiedene Anwendungen ökologische Vorteile hat gegenüber anderen Baumaterialien (z.B. kleine Verarbeitungsenergie, ist erneuerbarer Rohstoff). Es stellt sich daher die Frage, wie sich ein vermehrter Holzbau auf den Holzhaushalt auswirken könnte. Der Holzanteil an den Baumaterialien ist in den letzten 100 Jahren von 18% auf 3,6% gesunken (Abb. 3.5). Für das zweite Szenario wird angenommen, dass bei gleich bleibender

### 3. Quasistationäres Modell

Bautätigkeit der Holzanteil wieder auf 18% ansteigt. Dies entspricht einer Verfünffachung des Bauholzverkaufes von heute 90 auf 450 kg TS\*E<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>. Der Verkauf der anderen Holzprodukte bleibe unverändert bei 60 kg TS\*E<sup>-1</sup>\*a<sup>-1</sup>.

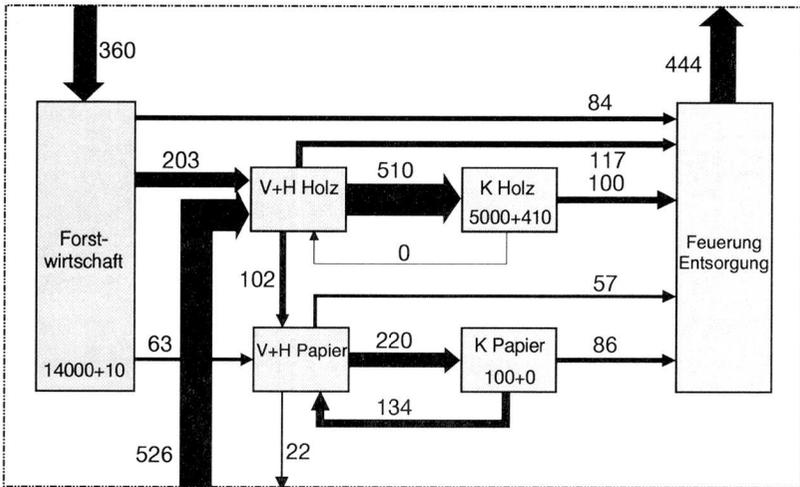


**Abb. 3.5:** Zusammensetzung der Baumaterialien im Gebäudepark des Kt. Aargau (Daten aus WÜEST & PARTNER 1995).

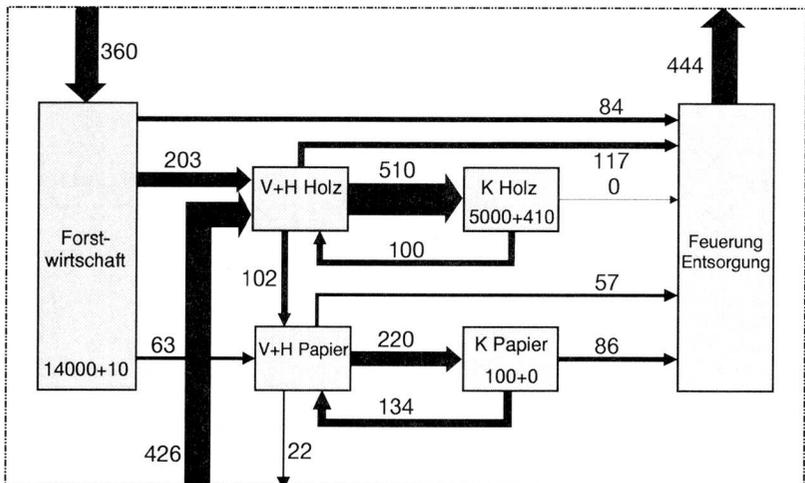
Wie Abb. 3.6 zu entnehmen ist, würde sich der Netto-Import von Stammholz verfünffachen. Durch den erhöhten Restholzanfall würde die Region gleichzeitig zur Exporteurin von Industrieholz. Insgesamt säne der SVG aber von 85% auf 30%.

Die Region müsste eine externe Waldfläche beanspruchen, die mehr als doppelt so gross ist wie ihre eigene Waldfläche. Bei schlechteren Produktionsstandorten als in KSM vergrössert sich diese Fläche entsprechend. Mit einer Zunahme der Siedlungsdichte (Anzahl Gebäude pro Region) muss sich also auch die Konstruktionsweise der Gebäude verändern, wenn der Selbstversorgungsgrad erhalten bleiben soll. Interessanterweise hat sich diese Veränderung im Schweizerischen Mittelland während dem Bauboom in den 50er bis 70er Jahren von selbst ergeben (Abb. 3.5).

### 3. Quasistationäres Modell



**Abb. 3.6:** Holzflux in KSM für Szenario "Gebäudekonstruktionsweise mit 18% Holzanteil". Lager in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1}]$  Lagerveränderungen und Fluxe in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$ .



**Abb. 3.7:** Holzflux bei erhöhtem Bauholzverbrauch mit 100% Altholzrecycling. Lager in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1}]$ , Lagerveränderungen und Fluxe in  $[\text{kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}]$ .

### 3. Quasistationäres Modell

Selbst ein 100%-iges Holzrecycling könnte in diesem Fall den SVG vorerst nur minim von 40 auf 45% erhöhen (Abb. 3.7), da die Altholzmenge erst nach einer gewissen Zeitverzögerung - entsprechend der Lebensdauer der Holzprodukte - ansteigt.

Wirkungsvoller wäre in diesem Fall eine Baumaterialherstellung aus Rest- und Brennholz. Dies hat natürlich zur Folge, dass zum Teil qualitative Einbussen (Altholz) und ein vermehrter Einsatz von industriell verarbeitetem Holz (Rest- und Brennholz) in Kauf genommen werden müsste. Ferner würde eine Erhöhung des Papierrecyclings zur Kompensation des fehlenden Restholzes beitragen. Bei diesem Szenario kann es entscheidend werden, Holz kaskadenartig (Baustoff -> Werkstoff -> Energieträger) zu nutzen. Auch hier müsste überprüft werden, wie gross der Spielraum von forstlichen Massnahmen zur erhöhten Holzproduktion wäre. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass eine rasche Erhöhung des Bauholzverbrauchs regional viel schwieriger aufzufangen ist als eine rasche Erhöhung des Papierverbrauchs.

## 3.5 Fazit

### Inhaltliche Folgerungen

1. Die Untersuchungsregion versorgt sich heute netto zu rund 85% selbst mit Holz und dessen Folgeprodukten. Die eigenen Wälder sind dabei die wichtigste Quelle ( $350 \text{ kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ). An zweiter Stelle folgt das Altpapier ( $140 \text{ kg TS} \cdot \text{E}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ). Altholz ist als Bau- und Werkstoff derzeit von untergeordneter Bedeutung. Rund drei Viertel des Holzlagers der Region ist in den Wäldern und ein Viertel ist in den Gebäuden gespeichert. Das Papierlager ist rund zwei Größenordnungen kleiner.
2. *Einem erhöhten Papierverbrauch könnte durch regionale Massnahmen wirkungsvoll begegnet werden.* Eine Verdopplung des Papierverbrauchs könnte ohne Holzimport erreicht werden, wenn die Papierrecyclingrate von 61% auf 87% angehoben würde.
3. *Einem rasch erhöhten Bauholzverbrauch könnte durch regionale Massnahmen kaum begegnet werden.* Ein Anstieg des Holzanteiles an den Baumaterialien auf das Niveau von 1900 hätte zur Folge, dass der Selbstversorgungsgrad auf 40% absinken würde. Selbst ein 100%-iges Altholzrecycling könnte in diesem Fall den Selbstversorgungsgrad vorerst nur auf 45% anheben. Das Altholzrecycling kann dann gewichtiger werden, wenn sich die Abbruchrate der Neubaurate nähert und die Altholzqualitäten ein stoffliches Recycling zulassen. Die Bauholzproduktion müsste daher stärker als die Papierproduktion mit der regionalen Forstwirtschaft abgestimmt werden.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass eine nachhaltige Waldbewirtschaftung allein nicht ausreicht für eine nachhaltige regionale Holzbewirtschaftung. Wenn die Holzversorgung längerfristig nicht auf das globale Hinterland abgestützt werden soll, dann ist eine gegenseitige Abstimmung von Produktion, Verarbeitung, Konsum und Entsorgung erforderlich.

#### Methodische Folgerungen

Mit Hilfe eines quasistationären Modelles konnten bereits erste Erkenntnisse über das Systemverhalten des regionalen Holzhaushaltes gewonnen werden. Zwei Aspekte konnten damit aber nicht erklärt werden:

1. Das Modell macht keine Aussagen darüber, wie sich verschiedene Parameter im Laufe von grösseren Zeiträumen verändern und auf den Holzhaushalt auswirken können. Als Folge davon besteht eine grosse Unsicherheit darüber, wie realistisch die Annahmen zum Modellansatz sind. Um Veränderungen beschreiben zu können, muss ein dynamisches Modell entwickelt werden.
2. Das Modell kann nur Auswirkungen von "internen" (den Holzhaushalt direkt betreffenden) Veränderungen aufzeigen. Externe Zielvorgaben, welche den Umbau des Waldes und des Gebäudeparkes betreffen, können damit nicht diskutiert werden. Dazu muss die Dynamik der Holzlagerbestände im Wald und im Gebäudepark auf geeignete Weise erfasst werden.

Leer - Vide - Empty

## ***Dynamisches Modell “XYLOIKOS”***

### **4.1 Einleitung**

Ein dynamisches Modell hat die Eigenschaft, dass die Variablen (Flüsse und Lager) echt oder nichttrivial zeitabhängig sind. Damit können Veränderungen eines Systems, aber auch dynamische Gleichgewichte, beschrieben werden.

#### **4.1.1 Motivation**

Ziel des XYLOIKOS-Holzhaushalt-Simulationsmodell ist es,

- den Holzhaushalt im 20. Jahrhundert mit seinen Veränderungen zu beschreiben und die wichtigsten Einflussfaktoren zu ermitteln (Systemverständnis);
- mit Hilfe von Szenarien für das 21. Jahrhundert zu untersuchen, welche Rolle Holz als Baumaterial und Energieträger künftig übernehmen könnte;
- als Früherkennungsinstrument künftige Entwicklungen von “Neuholz-” und Altholzflüssen sowie Holzverknappungen und -überschüssen bei unterschiedlichen Szenarien zu erfassen.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Das Modell kann keine Prognosen einer künftigen Holzbewirtschaftung erstellen. Modellszenarien für das 21. Jahrhundert können aber einen Diskussionsbeitrag liefern zur Frage, wie der Holzhaushalt in einer nachhaltigen Regionalentwicklung aussehen könnte. Dazu muss der Holzhaushalt als Teil eines umfassenderen Systems verstanden werden (siehe Kapitel 2.4.2). Das Gesamtsystem wird hier insofern berücksichtigt, als im Rahmen eines transdisziplinären Forschungsprojektes exemplarisch einige übergeordnete - für den Holzhaushalt externe - Zielvorgaben formuliert wurden. XYLOIKOS ist so aufgebaut, dass Auswirkungen von ausgewählten externen Zielvorgaben auf den Holzhaushalt in Form von Szenarien aufgezeigt werden können. Externe Zielvorgaben und Szenarien wurden in einem transdisziplinären Verfahren ermittelt, das im folgenden kurz erläutert wird.

##### 4.1.2 Transdisziplinärer Ansatz

Im Rahmen des transdisziplinären Forschungsprojektes SYNOIKOS (BACCINI und OSWALD 1998b) wurde ein Teilprojekt zur Frage von "Ernähren und Erholen mit knapper werdender Landschaft" (MÜLLER et al. 1998) ausgeführt. Das Team<sup>15</sup> stand vor der Aufgabe, langfristige Szenarien der Landschaft von zu entwickeln, welche neben der Versorgung mit Nahrungsmitteln und Holz auch Aspekte der Gestaltung, der Erholung und des Biotopverbundes berücksichtigen. Eine der schwierigsten Aufgaben bestand darin, eine Form der Zusammenarbeit zu finden, bei der eine echte Verknüpfung der unterschiedlichen Disziplinen entstehen konnte. Der in Abb. 4.1 dargestellte Ablauf kristallisierte sich im Verlaufe der Arbeit als geeigneter transdisziplinärer Ansatz heraus.

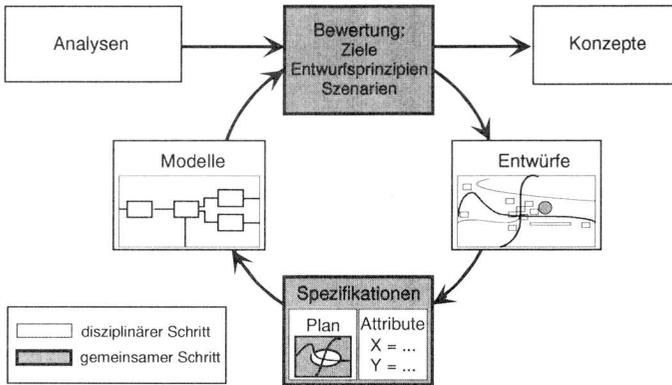
Der transdisziplinäre Ansatz beinhaltet disziplinäre und gemeinsame Schritte in abwechselnder Reihenfolge. Disziplinäre Analysen bilden die Grundlage für einen ersten gemeinsamen Schritt, in dem die Landschaft bewertet wird und übergeordnete Zielvorgaben aufgestellt werden. In einem Try-and-Error-Verfahren

---

<sup>15</sup> Im SYNOIKOS-Teilprojekt "Ernähren und Erholen" waren neben dem Autor Stephanie Perrochet (Landschaftsarchitektin), Mireille Faist (Umweltnaturwissenschaftlerin) und Jochen Jaeger (auf Landschaftszerschneidung spezialisierter Physiker) beteiligt. Viele Ideen stammen aber auch aus Diskussionen und Workshops mit weiteren SYNOIKOS-Teilnehmern.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

werden nun Szenarien entwickelt. Entwürfe für künftige Landschaften und deren Analyse mittels Modellen (zu Stoffhaushalt, Zerschneidung und Gestalt) wechseln sich dabei ab. Der Übersetzungsschritt von gestalterischen Entwürfen zu mathematischen Stoffhaushalts- und Zerschneidungsmodellen kann über Spezifikationen mit Hilfe eines Planes mit genau definierten Elementen und zugehörigen Attributen erfolgen. Für den umgekehrten Schritt müssen von den einzelnen Disziplinen aus "Entwurfprinzipien" formuliert werden, welche der Erreichung einzelner Ziele dienen können. Eine detaillierte Beschreibung der transdisziplinären Methode befindet sich in MÜLLER et al. (1998). Im folgenden werden exemplarisch übergeordnete Zielvorgaben und Szenarien ausgewählt, um das Vorgehen zu illustrieren.



**Abb. 4.1:** Transdisziplinäre Methode zur Verknüpfung von Landschaftsgestalt, Physiologie und Landschaftszerschneidung. In einem "transdisziplinären Loop" werden architektonische Entwürfe (rechte Seite) und Modelle zur Physiologie und zur Landschaftszerschneidung (linke Seite) über gemeinsame Arbeitsschritte (dunkel markiert) miteinander verknüpft.

### 4.1.3 Externe Zielvorgaben

Es wurden folgende normative Zielvorgaben formuliert (leicht abgeändert):

1. Die Landschaft soll als Ganzes so umgestaltet werden, dass der Naherholungsbedarf (Ortswechsel und Tages-/Wochenendausflüge) der Bewohner weitgehend in der Region gedeckt werden kann.
2. Die Landschaft soll als Ganzes so umgestaltet werden, dass die Biotopvernetzung verbessert wird<sup>16</sup>.
3. Der Gebäudepark soll bis zum Jahr 2050 vollständig mit regional verfügbarer Solarenergie betrieben werden können.
4. Die Region soll sich langfristig zu 80% mit Nahrungsmitteln und Holz aus eigener Produktion versorgen können.

### 4.1.4 Szenarien

Das Vorgehen wird exemplarisch an zwei Szenarien aufgezeigt:

1. Veränderung des Landnutzungsmusters bis 2050, so dass die Erholungsmöglichkeiten der Bevölkerung und die Biotopvernetzung verbessert werden.
2. Umbau des Gebäudeparkes bis 2050 in ein regionales solares System. Als Energieträger stehen neben Sonnenkollektoren auf der Dachfläche regional anfallendes Brenn- und Altholz zur Verfügung.

Das Modell soll die Auswirkungen dieser Szenarien auf den Holzhaushalt aufzeigen können.

---

<sup>16</sup> Als Maß zur Beurteilung der Biotopvernetzung wurde der *Zerschneidungsindex nach Jaeger* verwendet. Eine kurze Beschreibung dazu befindet sich in MÜLLER et al. (1998). Weitere Publikationen und eine Dissertation dazu sind geplant von Jaeger auf 1999.

### 4.1.5 Folgerungen für den Modellaufbau

#### Veränderung des Landnutzungsmusters

Um den Einfluss einer Veränderung des Landnutzungsmusters auf den regionalen Holzhaushalt aufzuzeigen, soll das Modell Rodungen und Aufforstungen berücksichtigen können. Weder die gebräuchlichen forstlichen Entwicklungsstufenmodelle noch die ökonomischen Forstsektormodelle sind dazu in der Lage. Es muss somit ein neuer Ansatz zur Beschreibung des Waldes entwickelt werden.

#### Umbau des Gebäudeparkes

Um die Loslösung von fossilen Energieträgern beim Gebäudebetrieb beurteilen zu können, wird neben der Holztrockensubstanz die **Energie als zweiter Indikator** eingeführt. Das Modell soll den Energiefluss und den Holzfluss miteinander in Beziehung setzen. Bis heute existieren noch keine Modelle, welche dazu in der Lage sind. Auch für den Gebäudepark muss daher ein neuer Ansatz entwickelt werden.

### 4.1.6 Vorgehen beim Modellaufbau

Der Modellaufbau erfolgt in einem iterativen Verfahren. Als erstes wird die *Fragestellung* festgelegt, welche weitgehend auch die zu wählende *Systemstruktur* (Anhang A1) bestimmt. Die Systemstruktur kann in die *Bilanzgleichungen* übersetzt werden (Anhang A3.2). Auch die *intrinsischen Beziehungen* können direkt aus der Systemstruktur abgeleitet werden (Anhang A3.2). Anschliessend werden Annahmen zu den *inneren Eigenschaften* des Systems getroffen (Anhang A3.3). Diese Annahmen werden in ihrer mathematischer Form *Modellansatz* genannt. Bei der darauf folgenden *Kalibrierung* wird eine erste Schätzung des Parametersatzes vorgenommen (Anhang B). Die Resultate der damit vorgenommenen Modellsimulation geben Hinweise darauf, ob die Daten, die inneren Eigenschaften und die Systemstruktur für den Modellzweck sinnvoll gewählt wurden oder ob entsprechende Korrekturen erforderlich sind (*Validierung*). So zeigt zum Beispiel erst die Modellsimulation, wie fein die Jahrgangsklassen zur Beschreibung des Waldes und des Gebäudeparkes gewählt werden müssen, um die interessierenden

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Phänomene noch adäquat abzubilden, oder ob eine bestimmte Fragestellung gar nicht beantwortet werden kann. Auch der Einfluss des Modellansatzes wird erst aufgrund von Modellsimulationen sichtbar. Für aktive<sup>17</sup> Parameterfunktionen wird nach Möglichkeit ein feinerer Ansatz gewählt als für inaktive. In anderen Fällen wird durch die Modellsimulation auch deutlich, wo allenfalls Ungenauigkeiten in der Kalibrierung von Parametern liegen könnten. Die iterative Verfeinerung von Systemstruktur, Modellansatz und Parameterwerten wird in der Regel begrenzt durch die Verfügbarkeit von Daten. Nach beendeter Verfeinerung des Modelles wird ein *Standardszenario* festgelegt, welches als Referenz für die verschiedenen *Umbauszenarien* dient.

---

<sup>17</sup> Unter einem aktiven Parameter versteht man einen Parameter mit grossem Einfluss auf eine bestimmte Systemvariable.

## 4.2 Systemstruktur

### 4.2.1 Einleitung

Die Systemstruktur von XYLOIKOS ist allgemein gewählt, so dass damit der Holzhaushalt einer beliebigen Region beschrieben werden kann. In unterschiedlichen Regionen können über grössere Zeiträume zwar sehr unterschiedliche Holzflüsse auftreten. Diese können jedoch alle mit dem gewählten System beschrieben werden. XYLOIKOS ist somit ein **generisches Modell**.

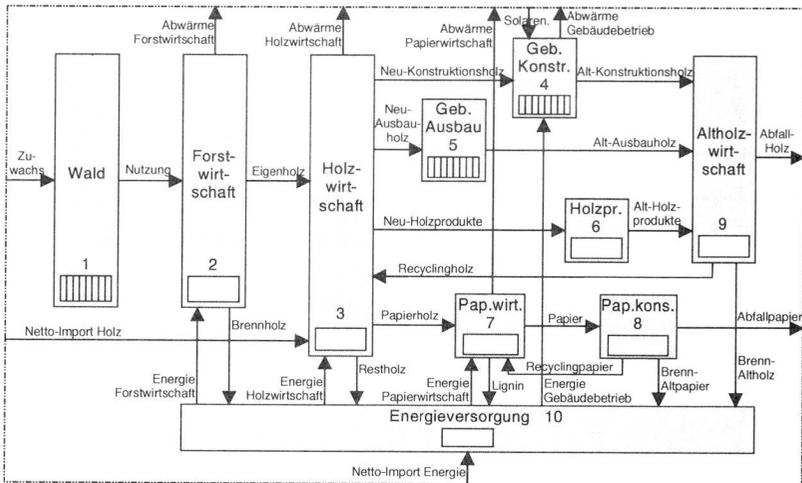


Abb. 4.2: System des Holzhaushalt-Simulationsmodelles XYLOIKOS.

Die Systemstruktur von XYLOIKOS ist in vereinfachter Form in Abbildung 4.2 dargestellt. Eine detaillierte Darstellung befindet sich in Anhang A1. Das vereinfachte System besteht aus 10 Prozessen, nämlich Wald, Forstwirtschaft, Holzwirtschaft, Gebäudekonstruktion, Gebäudeausbau, übrige Holzprodukte, Papierwirtschaft, Papierkonsum, Altholzwirtschaft und Energieversorgung. Prozesse mit den wichtigsten Holzlagerbeständen (Wald, Gebäudekonstruktion, Gebäudeausbau) werden ihrerseits durch Subprozesse beschrieben. Insgesamt besteht das System aus  $7 + n_w + 2n_g$  Prozessen, wobei  $n_w$  die Anzahl Subprozesse zur Be-

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

schreibung des Waldes und  $n_c$  die Anzahl Subprozesse der Gebäudekonstruktion bzw. des Gebäudeausbaus ist.

Im Gegensatz zum quasistationären Modell werden hier der Wald und die Forstwirtschaft getrennt betrachtet. Der Holzkonsum wird unterteilt in Gebäudekonstruktion (Konstruktionsholz<sup>18</sup>) und Gebäudeausbau (Ausbauholz<sup>19</sup>) sowie übrige Holzprodukte. Zusätzlich wird ein Prozess Energieversorgung eingeführt, welcher die Verteilung sämtlicher zum Betrieb des gesamten Holzhaushaltes erforderlichen Energieträger enthält. Die Solarenergie (nur Wärmeversorgung mittels Sonnenkollektoren) wird direkt dem Prozess "Gebäudekonstruktion" zugeführt. Damit können Umbauszenarien für den Gebäudepark in Bezug auf die Energieversorgung beurteilt werden.

#### 4.2.2 Wald und Forstwirtschaft

XYLOIKOS beschreibt schlagweise Hochwälder oder Femelwälder (dominant im Schweizer Mittelland) mit einem **Jahrgangsklassenmodell**, welches nur den Raum diskretisiert. Der Wald wird als Mosaik von Landschaftselementen verstanden, welche in der mathematischen Beschreibung als Bilanzvolumen (Prozesse) behandelt werden (MÜLLER et al. 1998). Die Landschaftselemente bestehen aus **gleichaltrigen Reinbeständen**<sup>20</sup>, welche in Jahresklassen von 20 Jahren zusammengefasst werden (Abb. 4.3 und 4.4).

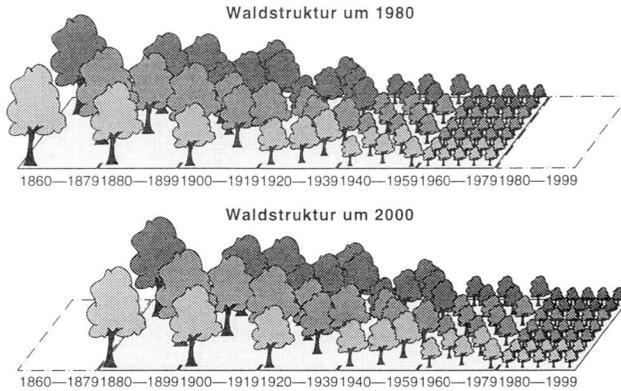
---

<sup>18</sup> Unter Konstruktionsholz wird Holz in Tragkonstruktionen, Treppen und Podesten, Dachtragwerken, Stützen, Aussenwandkonstruktionen, tragenden und nichttragenden Innenwänden verstanden.

<sup>19</sup> Ausbauholz umfasst Holz in der Dachhaut, Aussenwandfassaden, Fenstern, Aussentüren, Sonnenschützen, Trennwänden und Innentüren, Schutzelementen, Bodenbelägen, Wandverkleidungen, Deckenverkleidungen, Einbauten und Küchen. Ausserdem wurde auch das Holz in Möbeln zum Ausbauholz gezählt.

<sup>20</sup> Ein Reinbestand ist ein Bestand mit nur einer Baumart

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.3:** Schematische Darstellung eines nachhaltig bewirtschafteten Hochwaldes mit gleichaltrigen Reinbeständen mit einer Umtriebszeit von 120 Jahren. Bei der "Flächennachhaltigkeit" sind die Flächen aller Jahresklassen gleich gross. Zwischen 1980 und 2000 werden die ältesten Bestände (Jahrgangsklasse 1860-1879) verjüngt und bilden im Jahr 2000 die jüngsten Bestände (1980-1999).

Der Prozess Forstwirtschaft umschreibt sämtliche Eingriffe in die Bestände (z.B. Pflege, Zwischennutzung, Endnutzung). Das anfallende Holz wird in der Holzwirtschaft weiterverarbeitet ("Eigenholz") oder als Brennholz verwertet. Nach der Endnutzung einer *Jahrgangsklasse* haben deren Zuwachs, Lager und Nutzung den Wert null. Nach der Verjüngung eines Bestandes erscheint dieser in einem "neuen" Prozess entsprechend dem Verjüngungsjahr. Diese Wahl der Waldbeschreibung beinhaltet verschiedene Annahmen, welche die Aussagekraft des Modelles beeinflussen. Es ist daher wichtig, diese Einschränkungen zu kennen.

- Das Modell beschreibt das Wachstum gleichaltriger Reinbestände mit homogenen Wuchsbedingungen und homogener Bewirtschaftung. Um verschiedene Wuchsbedingungen, Bewirtschaftungsarten und Baumarten in Reinbeständen zu berücksichtigen, müsste der räumliche Bezug der Bestände noch verfeinert werden, z.B. mit Hilfe eines geografischen Informationssystems. Methodisch könnte aber analog vorgegangen werden, indem weiter differenzierte Jahrgangsklassen gebildet werden. Viel komplexer wäre hingegen die Berechnung von ungleichaltrigen und Mischbeständen (PRETZSCH 1992; PRETZSCH 1993; PRETZSCH 1995). Aber auch hier könnten vom Prinzip her Landschaftselemente nach verschiedenen Kriterien ausgeschieden werden.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

- Weder externe noch interne Störungen des Systems<sup>21</sup> werden durch diese einfache Waldbeschreibung erfasst. Auch hier müsste auf viel komplexere Modelle wie z.B. BOSSEL (1994) zurückgegriffen werden. Externe und interne Störungen könnten bei Bedarf in das bestehende Modell eingebaut werden.
- Das Modell unterscheidet weder Holzarten noch Holzsortimente. Eine entsprechende Erweiterung könnte problemlos in die gewählte Modellstruktur eingebaut werden (siehe z.B. LEMM (1991)). Der Berechnungsaufwand würde dadurch erheblich vergrößert. Für den gewählten Modellzweck ist die Erweiterung aber nicht essentiell.
- Blätter, Nadeln und Wurzeln sowie die Umweltkompartimente Atmosphäre, Pedosphäre und Hydrosphäre liegen ausserhalb der Systemgrenzen. Auch hier wäre eine entsprechende Modellerweiterung vom Prinzip her einfach möglich, würde aber nicht zur Erfüllung des gewählten Modellzweckes beitragen.

#### Vergleich des Jahrgangsklassen- mit dem Altersklassenmodell

Der gewählte Ansatz unterscheidet sich von anderen Ansätzen zur regionalen Waldbeschreibung. Den meisten differenzierteren Forstsektormodellen liegt ein Altersklassenmodell zugrunde, das auch demjenigen der Erfassung durch die Kreisforstämter entspricht (Abb. 4.4 oben).

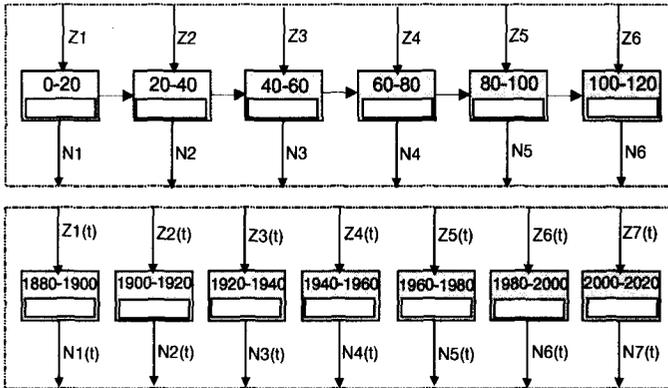
Im *Altersklassenmodell* durchläuft ein Bestand während seiner Lebensdauer sämtliche Prozesse. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass er mit einer kleinen Anzahl Prozessen auskommt (sechs in diesem Beispiel). Ausserdem kann für verschiedene Altersklassen mit einem konstanten Zuwachs pro Hektare gerechnet werden, was den Modellierungsaufwand nochmals stark verkleinert. Ein Nachteil besteht darin, dass der räumliche Bezug der Bilanzvolumen (Prozesse) laufend verändert wird, was zu einer Diskretisierung der Zeit führt. Dies äussert sich darin, dass für jedes Jahr Annahmen gemacht werden müssen, wieviel Waldfläche von einem Prozess in den nächsten gelangen. Diese Beschreibung ist vor allem dann kritisch, wenn Veränderungen des Waldes diskutiert werden sollen. So können z.B. Veränderung der Umtriebszeit, Aufforstungen und Rodungen oder Veränderung der Bonität nur näherungsweise und mit grossem Aufwand beschrieben werden. Der in der Forsteinrichtung verwendete Entwicklungsstufen-

---

<sup>21</sup> Externe Störungen kommen aus der Atmosphäre, der Geosphäre und der Hydrosphäre (Stürme, Feuer, Stoffeintrag, Steinschlag, Lawinen usw.), während interne Störungen aus Ökosystemfunktionen hervorgehen (Krankheiten, Vitalität usw.).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

aufbau (Kategorien Jungwuchs/Dickung, Stangenholz, junges Baumholz, mittleres Baumholz, starkes Baumholz und starkes Baumholz aufgelöst) entspricht in etwa dem Altersklassenmodell. Zur Kategorienbildung wird aber nicht das Bestandesalter, sondern der Brusthöhendurchmesser verwendet.



**Abb. 4.4:** Vergleich des Altersklassenmodelles (oben) mit dem Jahrgangsklassenmodell (unten). Im Altersklassenmodell durchläuft ein Bestand während seiner Lebensphase alle Prozesse (Altersklassen). Im Jahrgangsklassenmodell (XYLOIKOS) werden Bestände mit gleichem Jahrgang (Jahr der Verjüngung oder Aufforstung) zusammengefasst. Ein Bestand bleibt während seiner Lebensdauer in demselben Prozess.

Im Jahrgangsklassenmodell (Abb. 4.4 unten) bleibt ein Bestand während seiner ganzen Lebensdauer in demselben Prozess. Dies hat zur Folge, dass die Anzahl Prozesse mit zunehmender Simulationszeitspanne zunimmt. Ausserdem sind die Zuwächse und Nutzungen zeitabhängig. Dafür bleibt die räumliche Zuordnung insofern erhalten, als ein Bestand während seiner ganzen Lebensdauer in demselben Bilanzvolumen bleibt. Die Zeit wird dadurch beim Jahrgangsklassenmodell nicht diskretisiert. Dieser Ansatz erlaubt eine viel elegantere Beschreibung von Veränderungen (z.B. Aufforstungen, Rodungen, Veränderung der Altersstruktur, Bonitätsveränderungen). Die Bewirtschaftungsphilosophie des Jahrgangsklassenmodelles ist identisch mit derjenigen des Altersklassenmodelles, nicht aber seine Form der Beschreibung.

### 4.2.3 Gebäudepark

Während für die Beschreibung des Waldes auf forstwissenschaftliche Untersuchungen seit über 200 Jahren zurückgegriffen werden kann, existieren für die Beschreibung des Gebäudeparkes weder eine wissenschaftliche Basis noch eine entsprechende Erfahrung. In XYLOIKOS wird ein Ansatz gewählt, der analog ist zum gewählten Modell der Waldbeschreibung. Der Gebäudepark wird ebenfalls in **Jahrgangsklassen** eingeteilt. Auch hier werden die Gebäude nach "Jahrgängen" (Baujahr) zusammengefasst zu Prozessen (Bilanzvolumen). Der räumliche Bezug bleibt damit insofern erhalten, als die Zuordnung eines Gebäudes zu einem Prozess während seiner ganzen Lebensdauer erhalten bleibt. Die Zeit wird damit nicht diskretisiert wie bei einem Altersklassenmodell. Als Bezugsfläche wird analog zum Wald die Fläche verwendet, in diesem Fall die Bruttogeschossfläche. Die Wahl der Bruttogeschossfläche als Bezugsgröße ermöglicht ausserdem die Verknüpfung von Material- und Energieflüssen.

Eine Gebäudejahrgangsklasse wird ihrerseits nochmals unterteilt in Konstruktionsholz und Ausbauholz. Das Konstruktionsholz wird vorwiegend in Zimmereien, das Ausbauholz mehrheitlich in Schreinereien produziert. Diese Unterscheidung soll ermöglichen, unterschiedliche Entwicklungen in diesen Branchen zu beschreiben.

Eine wichtige Frage ist, wieviele Jahrgangsklassen mindestens gebildet werden müssen, um das Problem noch adäquat behandeln zu können. Das Modell wurde für eine, zwei ( $> 2000$ ,  $< 2000$ ), vier (Klassen à 50 Jahre) und elf Jahrgangsklassen (Klassen à 20 Jahre) erprobt. Es hat sich gezeigt, dass bei vier und weniger Jahrgangsklassen die berechneten realen Schwankungen nicht zu unterscheiden sind von Schwankungen infolge der Jahrgangsgrenzen (z.B. wegen der Sprünge in der Gebäudezusammensetzung). Die folgenden Berechnungen beziehen sich daher nur noch auf das Modell mit 11 Jahrgangsklassen.

Auch bei der Gebäudebeschreibung wurden viele Vereinfachungen gemacht, welche zu Einschränkungen der Modellaussagen führen:

- XYLOIKOS unterscheidet weder Baustiele noch unterschiedliche Nutzungen. Es erlaubt daher nur Aussagen zum gesamten Gebäudepark.
- Es werden weder Holzarten (z.B. Fichte, Buche) noch Holzqualitäten (z.B. Geometrie, chemische Behandlung) unterschieden.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

### Vergleich der Lagerbeschreibungen von Wald und Gebäudepark

Zur Beschreibung des Holzlagers im Gebäudepark wurde ein analoger Ansatz zum Wald gewählt (Tab. 4.1). Beide Lagerbestände werden mit Jahrgangsklassen beschrieben. Als Bezugsgrösse dient in beiden Fällen die Fläche. Die kleinste Bewirtschaftungseinheit ist im Wald der Bestand, im Gebäudepark das einzelne Gebäude<sup>22</sup>. Flächenwachstum einer Jahrgangsklasse wird im Wald durch Verjüngung oder Aufforstung, beim Gebäudepark durch Neubau erzeugt. Flächenverminderung einer Jahrgangsklasse erfolgt im Wald durch Endnutzung oder Rodung, im Gebäudepark durch Abbruch. In beiden Fällen gibt es auch flächenneutrale Eingriffe: die Zwischennutzung beim Wald und die Renovation beim Gebäudepark. Ein Unterschied besteht im Zuwachs des Holzlagers. Während der Waldbestand während seiner gesamten Umtriebszeit einen Zuwachs erfährt, wächst das Holzlager eines Gebäudes nur während der Bau- bzw. Renovationsphase.

**Tab. 4.1:** Vergleich der Lagerbeschreibung von Wald und Gebäudepark

	<b>Wald</b>	<b>Gebäudepark</b>
Bezugsgrösse	Waldfläche	Bruttogeschossfläche
kleinste Bewirtschaftungseinheit	Bestand	Einzelgebäude, selten Quartiere
Flächenwachstum einer Jahrgangsklasse	Verjüngung / Bestandesbegründung	Neubau
Flächenreduktion einer Jahrgangsklasse	Endnutzung / Rodung	Abbruch
Flächenneutrale Eingriffe	Zwischennutzung	Renovation
Zuwachs Holzlager	während ges. Lebensdauer des Bestandes	nur bei baul. Veränd. (Neubau o. Renovation)

<sup>22</sup> Es muss noch untersucht werden, ob mit der Einteilung z.B. in Quartiere mit ähnlicher Altersstruktur und Baustilen eine ausreichend grosse Genauigkeit erreicht werden kann.

### 4.2.4 Weitere Prozesse und Güter

#### Papier und Karton

Als Rohstoffe setzt die Papierwirtschaft Papierholz und Recyclingpapier ein. Bei der Papierproduktion (Zellulosegewinnung) fällt Lignin als Nebenprodukt an, welches vorwiegend energetisch verwertet wird. Altpapier kann entweder stofflich (Recyclingpapier) oder energetisch (Brennaltpapier) verwertet oder als Abfall (Abfallpapier) entsorgt werden.

#### Übrige Holzprodukte

Unter "übrige Holzprodukte" werden alle Holzprodukte zusammengefasst, welche nicht unter Gebäudepark und Papier/Karton fallen. Beispiele sind Holzverpackungen, Holzgefährte, Eisenbahnschwellen oder Bauhilfsmaterialien. Ihr Verwendungszweck kann sehr unterschiedlich sein und starken Wandlungen unterliegen.

#### Holzwirtschaft und Altholzwirtschaft

Die Holzwirtschaft bezieht ihre Rohstoffe aus der eigenen Forstwirtschaft (Eigenholz), aus Importen (Netto-Importholz) und aus Recyclingholz. Da die Holzwirtschaft auch Holz exportieren kann, wird nur der Netto-Fluss betrachtet. Die Holzwirtschaft erzeugt Bauholz (Neu-Konstruktionsholz und Neu-Ausbauholz), Neu-Holzprodukte und Papierholz. Dabei fällt Restholz an, welches energetisch verwertet wird.

#### Energieversorgung

Neben den Holzflüssen berücksichtigt XYLOIKOS auch die Energieflüsse der gesamten Holzverarbeitungskette (Prozessenergien). Im Falle des Holzkonsumes wurde der Energieaufwand für die Gebäudewärmeversorgung<sup>23</sup> mitberücksichtigt. Neben fossilen Energieträgern wurden auch Holz und Sonnenkollektoren berücksichtigt. Die Sonnenkollektorenergien werden direkt dem Gebäudepark

---

<sup>23</sup> Die Wärmeversorgung der Gebäude umfasst die Heizung und die Warmwasserversorgung, nicht aber die Stromversorgung (z.B. kochen).

#### *4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"*

zugeführt. Es wird angenommen, dass die erforderlichen Anlagen in den Gebäudepark integriert werden.

Um den Umbau der gesamten Aktivität Wohnen & Arbeiten in ein solares System zu beurteilen, müssten zusätzlich die Energieaufwände zur Herstellung der übrigen Baumaterialien erfasst werden. Ausserdem müsste zusätzlich der Stromverbrauch mitberücksichtigt werden werden (REDLE 1999; REDLE und BACCINI (1998). Diese Erweiterungen wären sehr einfach in das bestehende Modell einzufügen, was aber für den gewählten Modellzweck nicht erforderlich ist.

## 4.3 Modellansatz

### 4.3.1 Prinzip der mathematischen Beschreibung

XYLOIKOS beschreibt den regionalen Holzhaushalt mit  $7+n_W+2n_G$  Prozessen und  $22+2n_W+7n_G$  Gütern (Abb. 4.2).  $n_W$  ist dabei die Anzahl Jahrgangsklassen des Waldes,  $n_G$  ist die Anzahl Jahrgangsklassen des Gebäudeparkes. Die Güter und Prozesse werden durch je eine Systemvariable  $A(t)$  bzw.  $M(t)$  beschrieben, wobei  $M(t)$  aus zwei Unbekannten (Anfangszustand und Veränderung des Lagers) besteht. Insgesamt besteht das System also aus  $36+4n_W+11n_G$  Unbekannten. es wird durch einen Satz von gleich vielen unabhängigen Systemgleichungen vollständig beschrieben. Dazu werden drei Typen von Gleichungen verwendet:

$7+n_W+2n_G$	Intrinsische Beziehungen
$11+n_W+2n_G$	Bilanzgleichungen (davon 4 Energie-Bilanzen)
$18+2n_W+7n_G$	Modellansätze

Die **intrinsischen Beziehungen** beschreiben die Abhängigkeiten zwischen  $M(t)$  und  $\dot{M}(t)$ . Sie haben folgende Form (vgl. Anhang A3.1):

$$M^{(n)}(t) = M_0^{(n)} + \int_{t_0}^t \dot{M}^{(n)}(t') dt' \quad (4.1)$$

Die **Bilanzgleichungen** bilden die Struktur des Systems ab und haben folgende Form:

$$\dot{M}^{(n)}(t) = \sum_{i=1}^{N_{Ip}} A_{i-n}(t) - \sum_{j=1}^{N_{Op}} A_{n-j}(t) \quad (4.2)$$

$A_{i-n}(t)$  sind Input-Flüsse aus den Prozessen  $i$  zum Prozess  $n$ ,  $A_{n-j}(t)$  sind Output-Flüsse vom Prozess  $n$  zu den Prozessen  $j$ . Die Bilanzgleichungen garantieren, dass die Masse und die Energie zu jeder Zeit erhalten bleiben und sorgen gleichzeitig für die Erhaltung der Systemstruktur (siehe Kapitel 4.2 und Anhang A3.2).

Die **Modellansätze** beschreiben die inneren Eigenschaften des Systems. Ausgewählte Systemvariablen, sogenannte Leitvariablen (siehe Kapitel 4.3.2), werden durch die Modellansätze in Beziehung mit den Systemparametern gebracht. Die Modellansätze von XYLOIKOS werden in den Kapiteln 4.3.4 - 4.3.7 beschrieben und sind in Anhang A3.3 zusammengestellt.

### 4.3.2 Wahl der Leitvariablen

Die Bilanzgleichungen sind verantwortlich, dass nicht alle Systemvariablen unabhängig voneinander sind. So können z.B. beim Wald nicht Zuwachs, Vorrat und Nutzung frei gewählt werden. Aus der Bilanzgleichung folgt, dass nur zwei der drei Variablen vorgegeben werden dürfen. Es stellt sich die Frage, durch welche zwei Variablen das Systemverhalten am treffendsten beschrieben werden kann. Es geht also darum, diejenigen Variablen zu identifizieren, welche unabhängig sind von anderen Variablen und direkt durch einen Parametersatz beschrieben werden können. Diese Variablen werden im folgenden **Leitvariablen** genannt.

Die Wahl der Leitvariablen in XYLOIKOS beruht auf der Annahme von Selbstregulationsmechanismen (**Homöostasen**) des Waldes und der menschlichen Aktivitäten. Es wird angenommen, dass bestimmte Funktionen oder Grössen trotz verschiedenen Eingriffen in das System aufrecht erhalten bleiben. Diese Grössen werden als Leitvariablen gewählt. Die Selbstregulationsmechanismen werden in XYLOIKOS angenommen, nicht aber beschrieben. Das Modell ist daher nur gültig innerhalb von dem Bereich, wo der Selbstregulationsmechanismus noch funktioniert. Bei sehr starken Eingriffen in das System kann er zusammenbrechen. Dieser Effekt kann durch XYLOIKOS nicht beschrieben werden.

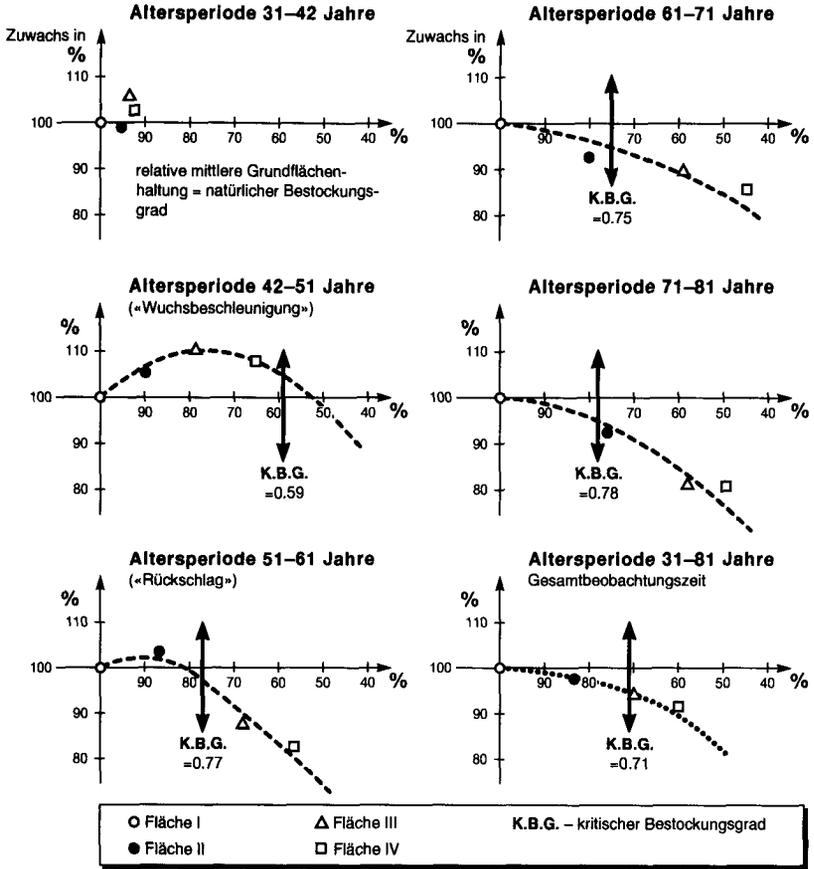
#### 1. Selbstregulation beim Wald

Der Zusammenhang von Zuwachs, Vorrat und Nutzung wird in allen wichtigen Lehrbüchern der Forsteinrichtung behandelt (ASSMANN 1961; MITSCHERLICH 1970; KRAMER et al. 1988; WENK et al. 1990). Als bisher beste Datengrundlage dazu wird übereinstimmend der *Schwedische Fichten-Durchforstungsversuch Nr. 54, Dalby* (CARBONNIER 1957) erwähnt (Abb. 4.5 und 4.6).

Der Versuch von Dalby zeigt, dass Durchforstungen - extreme Eingriffe ausgeschlossen - in erster Näherung keinen Einfluss auf den Zuwachs haben. Der Wald besitzt offenbar einen selbstregulierenden Mechanismus, *kleine "Wunden"* im Blätterdach aufgrund von Durchforstungen schnell zu "heilen", sodass die Photosyntheseaktivität und damit der Zuwachs nicht gross beeinflusst werden. Es besteht somit eine **Homöostase des Zuwachses**. Der Vorrat wird hingegen durch die Nutzung beeinflusst. Das Subsystem Wald wird durch die Leitvariablen

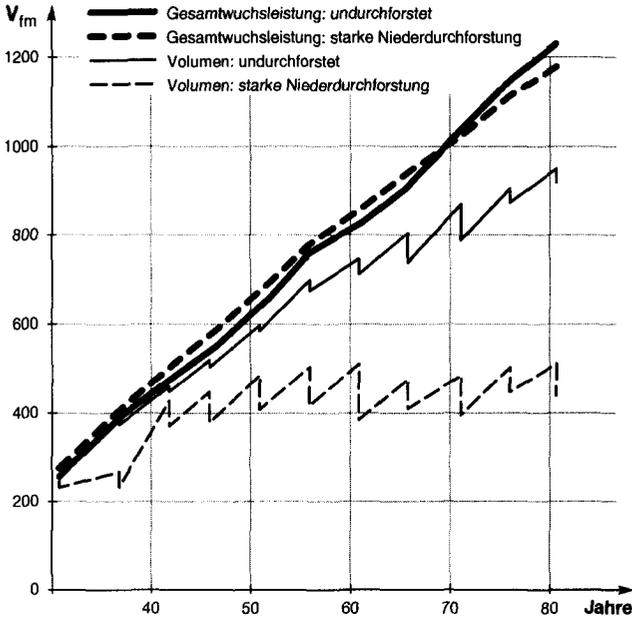
#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

"Zuwachs" und "Nutzung" beschrieben. Die Vorratsentwicklung wird als geführte Größe gewählt.



**Abb. 4.5:** Prozentuale Veränderung des Zuwachses in Abhängigkeit der Durchforstungsintensität in unterschiedlichen Altersperioden. Während in jungen Beständen durch eine mässige Durchforstung eine kleine Zuwachssteigerung erzielt wird, führt sie bei älteren Beständen immer zu einer Zuwachsminderung. Der kritische Bestockungsgrad gibt die Durchforstungsintensität an, bei der die Abweichung vom undurchforsteten Bestand 5% beträgt. Bei normalen Durchforstungen sind Zuwachsveränderungen von weniger als 5% zu erwarten. Die Grafik stammt aus WENK et al. (1990).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.6:** Entwicklung der Volumenfestmeter eines Bestandes in Funktion seines Alters. Einfluss einer starken Niederdurchforstung auf die Entwicklung des Vorrates (Volumen) und der Gesamtwuchsleistung im schwedischen Fichten-Durchforstungsversuch Nr. 54, Dalby (CARBONNIER 1957). Die Grafik stammt aus ASSMANN (1961). Die Durchforstung beeinflusst den Verlauf des Vorrates, kaum aber die Gesamtwuchsleistung.

## 2. Selbstregulation der menschlichen Aktivitäten

Bei menschlichen Siedlungen sind keine entsprechenden Untersuchungen zu Homöostasen bekannt. Hingegen weiss man, dass Siedlungen so aufgebaut sind, dass verschiedene Funktionen erfüllt werden können, auch wenn kleinere Störungen des Systems auftreten. Zur Erfüllung dieser Funktionen werden in einigen Fällen Güterlager (z.B. Strassen, Gebäude, Automobile), in anderen Güterflüsse (z.B. Energieträger für den Betrieb von Gebäuden und Automobilen) benötigt. Die Konsumgüter werden ihrer Funktion entsprechend eingeteilt in Strukturträger, Energieträger und Informationsträger, für die entsprechend ihrer Funktion unterschiedliche Homöostasegrössen angenommen werden (Tab. 4.2).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

*Strukturträger* sind Gebrauchsgüter, die die Funktion haben, eine Infrastruktur aufrechtzuerhalten. So ist es z.B. für eine Familie entscheidend, dass sie ein bestimmtes Lager an Automobilen besitzt, welches ihnen bestimmte Funktionen erfüllt. Sie ist aber nicht primär am Automobilfluss interessiert. Dieser ist eine Folge davon, dass das Lager seine Funktion nicht mehr erfüllen kann. Im Gegensatz dazu sind *Energie-* und *Informationsträger* Verbrauchsgüter, welche erst als Inputflüsse ihre Funktionen aufrechterhalten können.

**Tab. 4.2:** Klassifizierung der Konsumgüter nach ihrer Homöostastfunktion und ihrer Homöostasegrösse

Konsumgüter	Homöostase-Funktion	Homöostase-Grösse
"Strukturträger"	Infrastruktur aufrechterhalten	Lager / Struktur
Energieträger	z.B. Raumtemperatur aufrechterhalten	Input
Informationsträger	z.B. Informationsstand aufrechterhalten	Input

Bauholz wird beispielsweise in erster Linie zum Aufbau und Unterhalt der Infrastruktur eingesetzt. Für Bauholz ist daher die Homöostase der Infrastruktur und des Gebäudebestandes massgebend. Bauholz kann zwar theoretisch durch andere Baumaterialien vollständig substituiert werden, nicht aber die Gebäudefläche. Brennholz wird dagegen als Energieträger zur Aufrechterhaltung einer Raumtemperatur eingesetzt. Die Homöostase bezieht sich daher auf die Raumtemperatur, welche sich bei einem fixen Gebäudepark durch den Energieverbrauch (=Input) manifestiert. Auch Brennholz kann theoretisch vollständig durch andere Energieträger ersetzt werden (oder umgekehrt), nicht aber die Energie, welche pro Jahr zum Betreiben der Infrastruktur eingesetzt wird. Analog wird auch für Papier als Informationsträger eine Homöostase des Inputs angenommen.

### 4.3.3 Prinzipien zur Wahl der Modellansätze

#### Annahme von Sättigungserscheinungen

Über grössere Zeithorizonte treten sowohl bei natürlichen als auch bei anthropogenen Wachstumsprozessen Sättigungserscheinungen auf. So weiss man z.B. aus Erfahrung, dass "die Bäume nicht in den Himmel" wachsen, sondern sich einem Wert asymptotisch annähern. Analog werden auch für die Bevölkerung und deren Bedürfnisse Sättigungserscheinungen postuliert. Die Führungsgrössen werden daher mit S-Kurven (in der Regel mit logistischem Wachstum) beschrieben. Dieser Ansatz ist weniger spektakulär als der meist gebräuchliche Ansatz mit exponentiellem Wachstum (MEADOWS und MEADOWS 1992). Über einen kleineren Zeithorizont hat allerdings auch das logistische Wachstum einen praktisch exponentiell verlaufenden Abschnitt. Das Niveau des Einpendelns ist in der Regel jedoch nicht bekannt, da auch die Sättigungsmechanismen zu wenig bekannt sind. Es wird daher mit unterschiedlichen Varianten gerechnet, um den Auswirkungsbereich auszuloten.

#### Zurückführung auf Leitparameter

Der Bedarf an Holz ist kein Grundbedürfnis wie z.B. der Bedarf an Nahrungsmitteln oder Wasser. Hingegen kann Holz zur Befriedigung von verschiedenen Grundbedürfnissen eingesetzt werden. Damit ist Holz im Gegensatz zu Nahrungsmitteln oder Wasser substituierbar durch andere Rohstoffe. Um die Substitution von Holz durch andere Rohstoffe zu beschreiben, wurden die als Leitvariablen gewählten Holzflüsse und -lager zurückgeführt auf drei Leitparameter.

$$\text{Holzfluss/-lager} = \text{Bevölkerung} * \text{Grundbedürfnis} * \text{Kultur/Technik}$$

Anwendung: Holzlager Gebäude = Bevölkerung \* BGF/E \* kg Holz/BGF

Die Gebäude gehören zur Aktivität Wohnen & Arbeiten. Diese wird vereinfacht mit der dazu benötigten Bruttogeschossfläche pro Einwohner (BGF/E) beschrieben (= Führungsgrösse für W&A). Der dritte Term (kg Holz/BGF) zeigt, mit welchen Bautechniken und Baustilen diese Bruttogeschossfläche erzeugt wird.

### 4.3.4 Wald und Forstwirtschaft

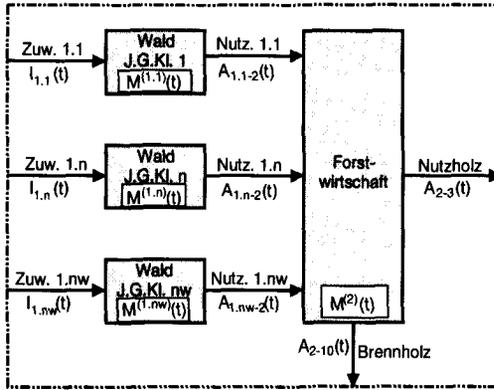


Abb. 4.7: Struktur des Teilsystems "Wald und Forstwirtschaft"

Vorgegeben werden der Zuwachs  $I_{1,n}(t)$  und die Nutzung  $A_{1,n-2}(t)$  jeder Jahrgangsklasse (vgl. Kap. 4.3.1). Unter der Annahme, dass sich das Holzlager im Prozess "Forstwirtschaft" nicht verändert (Gleichung 4.3), ergeben sich die Lagerbestände sämtlicher Jahrgangsklassen  $M^{(1,n)}(t)$  sowie die gesamte Nutzholzmenge  $A_{2-3}(t)$  aus den Bilanzgleichungen.

$$\dot{M}^{(2)}(t) = 0 \quad (4.3)$$

#### Zuwachs

Der Zuwachs einer Jahrgangsklasse  $n$   $I_{1,n}(t)$  wird berechnet als Produkt aus der Waldfläche  $FW_n(t)$ , einer Volumenzuwachsfunktion pro Fläche  $ZV_n(t)$  und der durchschnittlichen Holzdicke  $\rho_{\text{Holz},n}$ .

$$I_{1,n}(t) = FW_n(t) * ZV_n(t) * \rho_{\text{Holz},n} \quad (4.4)$$

Der Volumenzuwachs wird durch eine vorgegebene Funktion beschrieben (vgl. Kapitel 4.5.2). Wachstumsfunktionen beschreiben das Wachstum unter bestimmten Voraussetzungen, erklären es aber nicht. Um Aussagen über den Wachstumsverlauf bei sich verändernden Umweltbedingungen zu erhalten, sind verfeinerte Prozess-Modelle erforderlich, wie sie z.B. von BOSSEL (1994) entwickelt wurden. Prozess-Modelle sind nicht an einen so engen Gültigkeitsbereich gebunden wie

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

beschreibende (statistische) Modelle, sie sind aber bei konstanten Bedingungen weniger genau. Dieser Modellansatz setzt auch voraus, dass der Zuwachs unabhängig von der Nutzung ist (vgl. Kap. 4.3.1).

### Nutzung

Die Nutzung setzt sich zusammen aus der *Zwischennutzung* und der *Endnutzung*. Die *Zwischennutzung* wird als Anteil des stehenden Vorrates in Funktion der Zeit vorgegeben. Die *Endnutzung* wird über die Erntefläche definiert.

$$A_{1,n-2}(t) = PNV_n(t) * M^{(1,n)}(t) + \frac{FWAB_n(t) * M^{(1,n)}(t)}{FW_n(t)} \quad (4.5)$$

Dabei ist  $PNV_n(t)$  der Verlauf der jährlichen Volumennutzungsprozente der Jahrgangsklasse  $n$ .  $FW_n(t)$  ist die Waldfläche der Jahrgangsklasse  $n$  und  $FWAB_n(t)$  diejenige Waldfläche der Jahrgangsklasse  $n$ , welche einer *Endnutzung* oder einer *Rodung* zugeführt werden.

Das jährliche Volumennutzungsprozent  $PNV_n(t)$  wird durch eine mit Hilfe der Ertragstafeln (BADOUX 1968) empirisch entwickelten Funktion beschrieben (siehe Anhang B2.3).

### Brennholz

Die Brennholzmenge wird proportional zur gesamten Nutzung definiert:

$$A_{2-10}(t) = k_{2-10}(t) * \sum_{n=1}^{n_w} A_{1,n-2}(t) \quad (4.6)$$

#### 4.3.5 Holzwirtschaft

Vorgegeben werden die Lagerbestände von Konstruktions- und Ausbauholz  $M^{(4,n)}(t)$  und  $M^{(5,n)}(t)$ , die Neu-Holzprodukte  $A_{3-6}(t)$ , die Altholzmengen  $A_{4,n-9}(t)$ , die Kuppelprodukte  $A_{3-10}(t)$ ,  $A_{9-3}(t)$  und  $A_{9-10}(t)$  sowie die Zusammenhänge zwischen Input und Output von  $A_{5,n-9}(t)$  und  $A_{6-9}(t)$ .

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

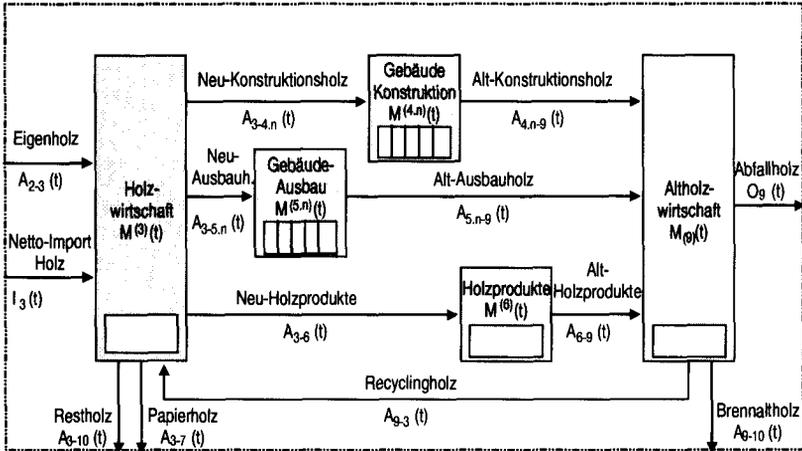


Abb. 4.8: Struktur des Teilsystems "Holzwirtschaft"

#### Vorgegebene Lager

Die Holzlager der Holz- und Altholzwirtschaft werden als vernachlässigbar klein betrachtet:

$$\dot{M}^{(3)}(t) = 0 \quad (4.7)$$

$$\dot{M}^{(9)}(t) = 0 \quad (4.8)$$

Das Holzlager von Konstruktions- und Ausbauholz dient der Aufrechterhaltung des Gebäudeparkes (vgl. Kap. 3.4). Für den Gebäudepark wird eine Homöostase der Pro-Kopf-Gebäudefläche ( $fg$ , angegeben in  $m^2$  Bruttogeschossfläche pro Einwohner) angenommen, welche als Leitgrösse für die Beschreibung des Gebäudeparkes verwendet wird. Gemäss der Formel in Kapitel 4.3.2 gilt

$$\dot{M}^{(4,n)}(t) = B(t) * f_{gn}(t) * mkn \quad (4.9)$$

$$\dot{M}^{(5,n)}(t) = B(t) * f_{gn}(t) * man \quad (4.10)$$

$B(t)$  ist die Bevölkerung der Untersuchungsregion. Sie wird in Anhang B1 beschrieben.

$f_{gn}(t)$  ist die Pro-Kopf-Gebäudefläche der Jahrgangsklasse  $n$ . Die Beziehungen zwischen der gesamten Gebäudefläche  $FG(t)$ , der Pro-Kopf-Gebäudefläche  $fg(t)$  und den Gebäudeflächen der einzelnen Jahrgangsklassen  $f_{gn}(t)$  sowie mit den Abbruchflächen ( $FGAB(t)$ ,  $fgab(t)$ ,  $fgabn(t)$ ) sind im Anhang B3.1 beschrieben.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

"mkn" und "man" sind die durchschnittlichen Holzdichten von Konstruktions- und Ausbauholz in den Gebäuden der Jahrgangsklasse n. "mkn" und "man" sind die Ausbauholz in den Gebäuden der Jahrgangsklasse n. Sie werden innerhalb einer Jahrgangsklasse als homogen und unveränderlich angenommen.

#### Altholz aus dem Gebäudepark

Konstruktionsholz und Ausbauholz besitzen unterschiedliche Aufenthaltszeiten im Gebäudepark. Für die Altholzentstehung werden daher zwei verschiedene Ansätze gemacht. Es wird angenommen, dass Konstruktionsholz die gleiche Lebensdauer besitzt wie die Gebäude. Die Entwicklung von Konstruktionsaltholz aus der Jahrgangsklasse n wird damit proportional zur abgebrochenen Gebäudefläche  $FGABn(t)$ .

$$A_{4,n-9}(t) = FGABn(t) * mkn \quad (4.11)$$

Demgegenüber kann Ausbauholz entweder durch Gebäudeabbruch (1. Term) oder durch Renovationen (2. Term, wird später mit  $O_{Renovation}(t)$  bezeichnet), welche einer Auswechslung von Holzbauteilen entsprechen. Der Renovationsanteil sei dadurch bestimmt, dass die Ausbauholzteile unabhängig vom Gebäudeabbruch eine bestimmte Lebensdauer besitzen. Mathematisch kann diese wie folgt formuliert werden:

$$A_{5,n-9}(t) = FGABn(t) * man + \int_{t_R}^t k_{5,n-9}(t,t') * A_{3-5,n}(t') dt' \quad (4.12)$$

$k_{5,n-9}(t,t')$  Transferfunktion des Inputs  $A_{3-5,n}(t)$  auf  $A_{5,n-9}(t)$

$t$  Outputzeit

$t'$  Inputzeit

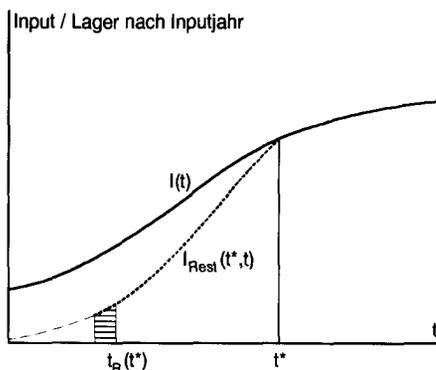
$t_R(t)$  Jahrgang des ältesten, noch nicht abgebrochenen Gebäudes

Der erste Term stellt den Altholzanfall aus Abbruch ( $O_{abbruch}(t)$ ), der zweite Term denjenigen aus Renovation dar. Der Jahrgang des ältesten, noch nicht abgebrochenen Gebäudes lässt sich aus folgender Differentialgleichung berechnen (BADER 1998):

$$\frac{dt_R}{dt} = \frac{O_{Abbruch}(t)}{A_{3-5,n}(t_R(t)) * \left[ 1 - \int_{t_R(t)}^t k_{5,n-9}(t',t_R(t)) dt' \right]} \quad (4.12a)$$

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Der Nenner beschreibt diejenige Holzmenge, welche noch übrig ist vom Input  $A_{3-5,n}(t_R(t))$  zur Zeit  $t$  (Abb. 4.9). Diese Gleichung unterstellt, dass stets die ältesten verfügbaren Gebäude einer Jahrgangsklasse abgebrochen werden.



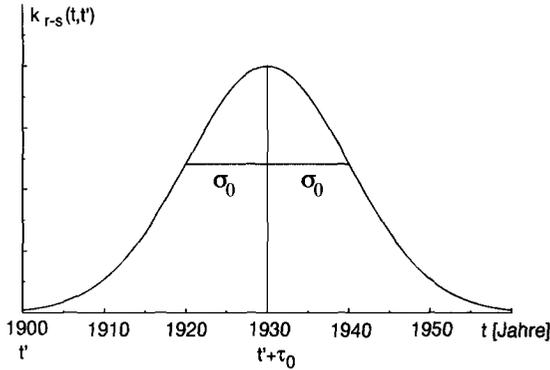
**Abb. 4.9:** Berechnung des Renovationsaltholzes  $O_{Renovation,n}(t)$  mit Hilfe einer Transferfunktion und verschobener unterer Integrationsgrenze  $t_R(t)$ .  $I(t)$  beschreibt den Input zur Zeit  $t$ ,  $I_{Rest}(t^*, t)$  den zum Zeitpunkt  $t^*$  verbleibenden Anteil im Lager. Es wird angenommen, dass zuerst der älteste Anteil in den Output transferiert wird. Das Abbruchaltholz  $O_{Abbruch,n}(t)$  trägt nicht mehr zum Renovationsaltholz bei und wird daher vom Renovationsaltholz verursachenden Input abgezogen. Die untere Integrationsgrenze  $t_R(t)$  verschiebt sich entsprechend der Abbruchmenge nach rechts.

Für die Transferfunktion  $k_{5,n-9}(t, t')$  wird eine normalverteilte Lebensdauer eingesetzt. Der Ausbau-Altholzanfall entspricht der Summe aller Ausbauholz-Inputs zu früheren Zeiten  $t'$ , welche mit vorgegebener zeitlicher Verzögerung zur Zeit  $t$  den Prozess wieder verlassen. Es wird also angenommen, dass das Ausbauholz unabhängig vom Gebäudealter eine konstante Lebensdauer besitzt und laufend erneuert werden muss. Dieser Ansatz wird in BACCINI und BADER (1996) ausführlicher beschrieben.

$$k_{5,n-9}(t, t') = \frac{1}{N_0} * e^{-\frac{(t-t'-\tau_0)^2}{2\sigma_0^2}}, \text{ wobei } N_0(t') = \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\tau_0(t'))^2}{2(\sigma_0(t'))^2}} dt \quad (4.13)$$

- $N_0$  Normierungsfaktor
- $\tau_0$  durchschnittliche Lebensdauer
- $\sigma_0$  Varianz der Lebensdauer

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.10:** Veranschaulichung der Gaussfunktion als Transferfunktion. Der Input im Jahr 1900 ( $t'$ ) wird mit einer Verzögerung von durchschnittlich 30 Jahren ( $\tau_0$ ) und einer Varianz von 10 Jahren ( $\sigma_0$ ) auf den Output verteilt. Der gesamte Output zu einer Zeit  $t$  ist die Summe der Outputs zu allen möglichen Inputzeiten  $t'$ .

#### Holzprodukte

Da die Produktpalette der Kategorie "übrige Holzprodukte" sehr breit ist und stark variieren kann, werden die Holzmengen nicht zurückgeführt auf Parameterfunktionen, welche die Grundbedürfnisse bzw. deren Befriedigung beschreiben. Vorgegeben werden die Neu-Holzprodukte pro Kopf und Jahr  $khp(t)$ .

$$A_{3-6}(t) = B(t) * khp(t) \quad (4.14)$$

Ferner wird eine normalverteilte Lebensdauer angenommen:

$$A_{6-9}(t) = \int_{t_0}^t k_{6-9}(t, t') * A_{3-6}(t) dt' \quad (4.15)$$

$$\text{mit } k_{6-9}(t, t') = \frac{1}{N_0} * e^{-\frac{(t-t'-\tau_0)^2}{2\sigma_0^2}} \quad (4.15a)$$

#### Kuppelprodukte

Die Produktion von Restholz zur energetischen Verwertung wird proportional zur gesamten verarbeiteten Holzmenge angenommen.

$$A_{3-10}(t) = k_{3-10}(t) * (A_{2-3}(t) + I_3(t) + A_{9-3}(t)) \quad (4.16)$$

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

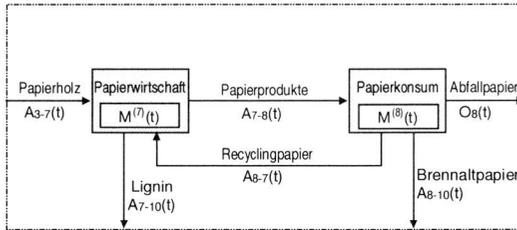
Die stofflich und energetisch verwerteten Altholzmengen ( $A_{9-3}(t)$ ,  $A_{9-10}(t)$ ) werden durch Transferfunktionen vorgegeben.

$$A_{9-3}(t) = k_{9-3}(t) * \left[ \sum_{n=1}^{n_G} (A_{4,n-9}(t) + A_{5,n-9}(t)) + A_{6-9}(t) \right] \quad (4.17)$$

$$A_{9-10}(t) = k_{9-10}(t) * \left[ \sum_{n=1}^{n_G} (A_{4,n-9}(t) + A_{5,n-9}(t)) + A_{6-9}(t) \right] \quad (4.18)$$

Die Summe der beiden Transferfunktionen  $k_{9-3}(t)$  und  $k_{9-10}(t)$  darf zu keiner Zeit den Wert 1 übersteigen.

#### 4.3.6 Papierwirtschaft



**Abb. 4.11:** Schema der Produktion und des Konsumes von Papierprodukten.

Auch hier wird der Papierkonsum als Motor für den Papierhaushalt angenommen. Daher werden der Konsum  $A_{7-8}(t)$ , der Ligninanfall  $A_{7-10}(t)$ , die Recyclingmenge  $A_{8-7}(t)$  sowie das energetisch verwertete Altpapier  $A_{8-10}(t)$  vorgegeben. Die erforderliche Holzmenge und die Abfallpapiermenge ergeben sich unter der Voraussetzung, dass sich die Lager in den Prozessen "Papierwirtschaft" und "Papierkonsum" nicht verändern, aus den Bilanzgleichungen.

$$\dot{M}^{(7)} = 0 \quad (4.19)$$

$$\dot{M}^{(8)} = 0 \quad (4.20)$$

### Neu-Papierprodukte

Papier wird in erster Linie als Informationsträger verwendet. In den meisten Fällen verlieren die übermittelten Informationen relativ schnell an Aktualität und damit an Wert. Ein Beispiel dafür ist der Konsum von Tageszeitungen. Bücher mit einem dauerhaften Wert bilden die Ausnahme. Der Konsum von Informationen bzw. das Grundbedürfnis danach wird daher nicht durch das Lager, sondern durch den Input von neuen Informationen beschrieben. Es handelt sich also im Gegensatz zum Gebäudepark um einen *Inputkonsum* (vgl. Kap. 4.3.1). Der Papierkonsum sei proportional zur Bevölkerung  $B(t)$ :

$$A_{7-8}(t) = B(t) * kp(t) \quad (4.21)$$

Durch diese einfache Beschreibung kann zwar der Einfluss verschiedener Entwicklungen des Papierflusses auf den Holzhaushalt untersucht werden, hingegen können keine Szenarien für die Substitution von Papier durch andere Informationsträger diskutiert werden.

### Lignin

Der Ligninanfall sei proportional zur Papierholzmenge.

$$A_{7-10}(t) = k_{3-7-10}(t) * A_{3-7}(t) \quad (4.22)$$

Durch diese Vereinfachung wird angenommen, dass der Anteil an ligninhaltigem bzw. ligninfreiem Papier konstant bleibt.

### Recyclingpapier und Brennaltpapier

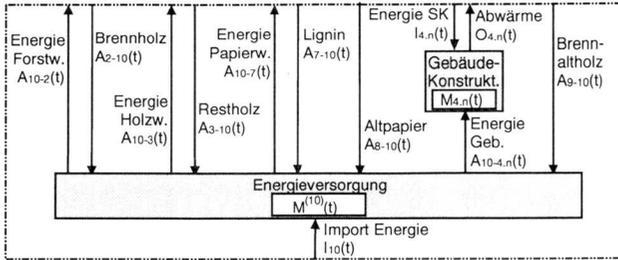
Die Recyclingpapiermenge und die Brennaltpapiermenge seien proportional zum Papierkonsum:

$$A_{8-7}(t) = k_{8-7}(t) * A_{7-8}(t) \quad (4.23)$$

$$A_{8-10}(t) = k_{8-10}(t) * A_{7-8}(t) \quad (4.24)$$

Die Transferfunktionen  $k_{8-7}(t)$  und  $k_{8-10}(t)$  müssen dabei so gewählt werden, dass deren Summe  $\leq 1$  ist.

### 4.3.7 Energieversorgung



**Abb. 4.12:** Struktur des Teilsystems "Energieversorgung"

Zusätzlich wird die Energie zur Wärmeversorgung der Gebäude (Heizung und Warmwasser) eingeführt. Um die unterschiedlichen Energieträger (z.B. Erdöl, Holz, Lignin, Altpapier oder Sonnenkollektoren) miteinander zu verrechnen, werden sie alle in Holzäquivalente umgerechnet. Der Energiebedarf von Forstwirtschaft  $A_{10-2}(t)$ , Holzwirtschaft  $A_{10-3}(t)$ , Gebäudeheizung  $A_{10-4,n}(t)$  und Papierherstellung  $A_{10-7}(t)$  wird vorgegeben. Die Energieträger aus Holz  $A_{2-10}(t)$ ,  $A_{3-10}(t)$ ,  $A_{7-10}(t)$ ,  $A_{8-10}(t)$  und  $A_{9-10}(t)$  sind alle gegeben durch das Holzhaushaltsmodell. Der Netto-Import zusätzlicher Energieträger  $I_{10}(t)$  und sämtliche Abwärmen sind somit durch die Bilanz bestimmt, sofern keine Lagerveränderungen stattfinden.

$$\dot{M}^{(10)}(t) = 0 \quad (4.25)$$

Diese Art der Energieversorgung berücksichtigt nicht, welche Energieträger in welchem Verhältnis eingesetzt werden.

#### Energieverbrauch von Forst-, Holz- und Papierwirtschaft

Der Energieverbrauch von Forst- und Holzwirtschaft wird proportional zur verarbeiteten Holzmenge angesetzt. Es handelt sich dabei um eine grobe Vereinfachung, welche z.B. den Stückvolumeneffekt<sup>24</sup> nicht berücksichtigt.

<sup>24</sup> Schwachholznutzung benötigt rund vier mal mehr Energie als Starkholznutzung (HEINIMANN 1998).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

$$A_{10-2}(t) = e_{FW}(t) * \sum_{n=1}^{nW} A_{1,n-2}(t) \quad (4.26)$$

$$A_{10-3}(t) = e_{HW}(t) * (A_{2-3}(t) + I_3(t) + A_{9-3}(t)) \quad (4.27)$$

Bei der Papierwirtschaft wird eine Differenzierung gemacht, jenachdem ob Frischfasern oder Recyclingpapier als Ausgangsmaterial verwendet werden.

$$A_{10-7}(t) = e_{RP}(t) * A_{8-7}(t) - e_{FF}(t) * (A_{7-8}(t) - A_{8-7}(t)) \quad (4.28)$$

#### Energieverbrauch Gebäudepark (nur Wärme)

Der Wärmeenergieverbrauch einer Gebäude-Jahrgangsklasse ( $A_{10-4,n}(t) + I_{4,n}(t)$ ) sei proportional zu deren Bruttogeschossfläche  $FG_n(t)$ .

$$A_{10-4,n}(t) + I_{4,n}(t) = e_{G,n}(t) * FG_n(t) \quad (4.29)$$

Nach WÜEST und GABATHULER (1989) entspricht die beheizte Fläche gerade etwa der Bruttogeschossfläche. Damit entspricht  $e_{G,n}(t)$  gerade der in der Bau-branchen üblichen Energiekennzahl Wärme ( $EKZ_{Wärme}$ ). Die  $EKZ_{Wärme}$  einer Jahrgangsklasse bleibt im Modell konstant. Energetische Gebäudesanierungen werden somit nicht berücksichtigt.

#### Energie aus Sonnenkollektoren

Die Kollektorfläche einer Gebäude-Jahrgangsklasse wird proportional zu deren Bruttogeschossfläche ( $FG_n$ ) gesetzt. Es gilt

$$I_{4,n}(t) = G(t) * \eta_{SK,n} * \beta_{FSK_n/FG_n}(t) * FG_n(t) \quad (4.30)$$

- $G(t)$  durchschnittliche Globalstrahlung der Untersuchungsregion
- $\eta_{SK,n}$  Wirkungsgrad der Sonnenkollektoren der Jahrgangsklasse n.
- $\beta_{FSK_n/FG_n}(t)$  Verhältnis Kollektorfläche und Bruttogeschossfläche der Jahrgangsklasse n

### 4.3.8 Zusammenstellung der Parameter

Tab. 4.3: Liste der Parameter

Parameter	Erläuterung	Einheit	Anz.
B(t)	Bevölkerung	E	1
FWn (t), fwn (t)	Waldfläche der JG-Kl. n (total, pro Einw.)	ha	nW
FWABn (t), fwabn (t)	Endnutz.- oder Rodungsfläche d. JG-Kl. n	ha/a	nW
ZVn (t)	Volumenzuwachs pro ha der JG-Kl. n	m	nW
PNVn (t)	Volumennutzungsprozent der JG-Kl. n	1/a	nW
$\rho_{\text{Holz}}$	Dichte von Holz	kg TS/m <sup>3</sup>	1
k <sub>10-2</sub> (t)	Transfkt. Brennholz aus Forstwirtschaft	-	1
FGn (t), fgn (t)	Geb.-Fläche (BGF) d JG-Kl. n (tot., pro E)	m <sup>2</sup>	nG
FGABn (t), fgabn (t)	Geb.-Abbr.fläche (BGF) der JG-Kl. n	m <sup>2</sup> /a	nG
mkn	Dichte Konstr.-holz in Geb. der JG-Kl. n	kgTS/m <sup>2</sup>	nG
man	Dichte Ausbauholz in Geb. der JG-Kl. n	kgTS/m <sup>2</sup>	nG
KHP (t), khp (t)	jährl. Fluss an Neu-Holzprodukten	kgTS/E*a	1
KP (t), kp (t)	jährl. Fluss an Papier	kgTS/a	1
k <sub>5,n-9</sub> (t,t')	Transferfkt. für verzögerten Output	-	nG
k <sub>6-9</sub> (t,t')	Transferfkt. für verzögerten Output	-	1
k <sub>3-7-10</sub> (t)	Transferfkt.: Lignin aus Papierholz	-	1
k <sub>3-10</sub> (t)	Transferfkt.: Restholz aus Holzverarbeitung.	-	1
k <sub>8-7</sub> (t)	Transferfkt.: Recyclingrate Altpapier	-	1
k <sub>8-10</sub> (t)	Transferfkt.: Brennaltpapier aus Papier	-	1
k <sub>9-3</sub> (t)	Transferfkt.: Recyclingrate Altholz	-	1
k <sub>9-10</sub> (t)	Transferfkt.: Brennalt Holz aus Altholz	-	1
e <sub>FW</sub> (t)	Energieverbr. der Forstw. pro Nutzholz	MJ/kgTS	1
e <sub>HW</sub> (t)	Energieverbr. der Holzw. pro verarb. Holz	MJ/kgTS	1
e <sub>Gn</sub> (t)	Energiekennzahl Gebäude der JG-Kl. n	MJ/m <sup>2</sup> *a	nG
e <sub>RP</sub> (t)	Energieverbr. Papierw. pro Rec.papier	MJ/kgTS	1
e <sub>FF</sub> (t)	Energieverbr. Papierw. pro Frischfaserst.	MJ/kgTS	1
$\alpha_{FW}$ (t)*	Anteil Brennholz an Energie Forstw.	-	1
$\alpha_{HW}$ (t)*	Anteil Brennholz an Energie Holzw.	-	1
$\alpha_{Gn}$ (t)*	Anteil Brennholz an Energie Geb.-Wärme	-	nG
$\alpha_{PW}$ (t)*	Anteil Brennholz an Energie Papierw.	-	1
$\eta_{SK,n}$	Jahreswirkungsgrad Sonnenkollektoren v. Gebäuden der JG-Kl. n	-	nG
$\beta_{FSK/FGn}$	SK-Fläche pro Gebäudefläche d. JG-Kl. n	-	nG
G (t)	Globalstrahlung der Untersuchungsregion	MJ/m <sup>2</sup> *a	1
<b>Total Anzahl Parameter</b>		<b>19+4n<sub>W</sub>+9n<sub>G</sub></b>	

\* Auswertungsparameter

## 4.4 Computerprogramm

Die Standardvariante von XYLOIKOS besteht aus 221 gekoppelten nichtlinearen Integro-Differentialgleichungen. Insgesamt treten 182 Parameterfunktionen auf, welche durch 371 Einzelparameter dargestellt werden.

Die Systemgleichungen von XYLOIKOS wurden von H.-P. Bader und R. Scheidegger in der Programmiersprache RMB (Rocky-Mountain-Basic) programmiert<sup>25</sup>. Sie bilden die XYLOIKOS-Subroutinen-Bibliothek zum Stoffhaushalts-Simulationsprogramm SIMBOX (BADER und SCHEIDEGGER 1996), mit dem sie gelöst werden können.

Für die numerische Lösung wird das Iterationsverfahren nach Newton-Raphson mit automatischer Konvergenzkontrolle bei einer Fehlertoleranz von  $10^{-10}$  benutzt. Alle Berechnungen wurden auf einem PC mit Pentium II 266 MHz Prozessor und dem Betriebssystem WINDOWS NT 4.0 durchgeführt. Die Rechenzeit für einen Durchlauf beträgt etwa 18-20 Stunden.

---

<sup>25</sup> Als Implementation der Programmiersprache RMB wurde die WINDOWS-Version HTBasic 5.2 von Trans Era benutzt.

## 4.5 Kalibrierung und Validierung

### 4.5.1 Einleitung

In der ökologischen Literatur sind die Begriffe "Kalibrierung" und "Validierung" für Simulationsmodelle nicht eindeutig definiert (RYKIEL 1996). Für XYLOIKOS werden sie daher spezifisch definiert.

**Kalibrierung** ist die Schätzung und Eichung der Modellparameter und Konstanten mit dem Ziel, eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen dem Modell-Output und den jeweiligen Datensätzen zu erreichen (RYKIEL 1996).

**Validierung** ist der Nachweis, dass ein Modell innerhalb seines Anwendungsbereiches eine für den Anwendungszweck ausreichend treffende Beschreibung des Systems liefert (SARGENT 1984; CURRY et al. 1989).

SARGENT (1984) unterscheidet drei Schritte der Validierung, welche iterativ wiederholt werden sollten bei der Modellentwicklung: die konzeptionelle, die operationelle und die Daten-Validierung. Die konzeptionelle Validierung ist der Nachweis oder die Begründung der Annahmen bei der Systembeschreibung. Die operationelle Validierung soll zeigen, wie genau das Modell das reale System abbilden kann. Die Datenvalidierung soll gewährleisten, dass die verwendeten Daten eine ausreichende Qualität haben. **In diesem Kapitel werden nur die Kalibrierung und die operationelle Validierung von XYLOIKOS behandelt.** Die konzeptionelle Validierung erfolgt mit der Beschreibung der Modellstruktur (Kapitel 4.2) und den inneren Eigenschaften des Modelles (Kapitel 4.3).

Die Daten stammen fast ausschliesslich aus historischen Statistiken, deren Erhebungsmethoden sich zum Teil verändert haben oder gar nicht bekannt sind. In vielen Fällen mussten mangels Daten grobe Schätzungen vorgenommen werden, z.B. aufgrund von Erhebungen in anderen Regionen. Die aus der Simulation berechneten Variablen werden verglichen mit weiteren, von den Parametern unabhängigen Datensätzen. Der erste Parametersatz wird entsprechend korrigiert. Der neue Parametersatz bildet die Grundlage für das Standard-Szenario (Kapitel

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

**Tab. 4.4:** Überblick der Parametervariation

Bereich	Parameter	Art der Variation
Bevölkerung	Bevölkerung	logistisches Wachstum mit unterschiedlichem Endniveau
Wald und Forstwirtschaft	Zuwachsfunktionen	Gompertz, Chapman-Richards, logistisches Wachstum, Backmann
	Bonität	konstante Bonität, Bonität als Funktion der Zeit
	Nutzung	gleichbleibende Nutzung, sich verändernde Nutzung
	Transferfunktion Brennholz aus Forstwirtschaft	logistische Abnahme und Zunahme auf unterschiedliches Niveau
Holzwirtschaft und Gebäudepark	totale Pro-Kopf-Gebäudefläche (BGF)	logistische Funktionen mit Variation des Anstieges und des Niveaus, lineare Wachstumsfunktion, Splinefunktion
	Gebäudejahrgangsklassen	Vergleich 2, 4 und 11 Jahrgangsklassen
	Lebensdauer der Gebäude pro Jahrgangsklasse	linearer Gebäudeabbruch, Abbruch mit Gaussansatz, Variation der durchschn. Lebensdauer und der Varianz
	Holzichten der Gebäude pro Jahrgangskl.	Variation der Holzichten
	Lebensdauer von Ausbauholzprodukten	Variation der durchschnittlichen Lebensdauer und der Varianz
	Recyclingrate von Holz	konstant, logistisches Wachstum
	Papierwirtschaft	Recyclingrate von Papier
Energieversorgung	Energiekennzahlen pro Jahrgangsklasse	Variation der Energiekennzahlen
	Anteil Holzenergie an Gebäudewärmeversorgung pro Jahrgangskl.	Variation des Anteiles pro Jahrgangsklasse
	Sonnenkollektorfläche pro Bruttogeschossfläche je Jahrgangskl.	Variation des Anteiles Sonnenkollektorflächen pro Jahrgangsklasse

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

4.6.2). Als weiteres Hilfsmittel werden **Parametervariationen**<sup>26</sup> durchgeführt. Sie geben Aufschluss darüber, welche Parameter wie genau bestimmt werden müssen und helfen, den Messaufwand zu optimieren. Die Parametervariation wird mit einer ersten Schätzung des Parametersatzes durchgeführt. Mit diesem wird der Holzhaushalt der Untersuchungsregion im 20. und 21. Jahrhundert in erster Näherung beschrieben. Für ausgewählte Parameter werden zusätzlich zur ersten Schätzung zwei extreme Varianten angenommen. Die übrigen Parameter werden konstant gehalten. Die auf diese Weise ermittelten aktiven Parameter erfordern bei ihrer Bestimmung grössere Vorsicht und Genauigkeit.

Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über die Parametervariation. Im folgenden werden nur einige ausgewählte Parameter diskutiert. Eine detailliertere Beschreibung der Kalibrierung und Validierung befindet sich im Anhang B.

#### 4.5.2 Bevölkerung

Die Bevölkerung  $B(t)$  wird in den Volkszählungen regelmässig erfasst. Sie ist im 20. Jahrhundert stark angewachsen (Abb. 4.13). In XYLOIKOS wird sie durch ein logistisches Wachstum angenähert (Gleichung 4.31).

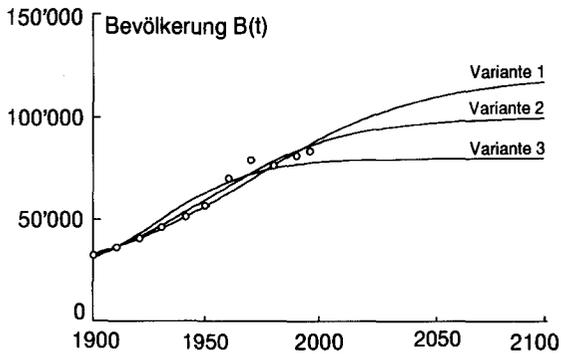
$$B(t) = B_0 + \frac{B_\infty - B_0}{1 + e^{-\alpha(t-T^*)}} \quad (4.31)$$

Das Ausgangsniveau  $B_0$  wird aufgrund der Rohdaten geschätzt. Im Gegensatz zu dem beim Bevölkerungswachstum oft verwendeten exponentiellen Wachstum beinhaltet das logistische Wachstum zusätzlich einen Sättigungstherm. Das Sättigungsniveau  $B$  kann mit diesem Ansatz nicht ermittelt oder erklärt werden, sondern wird durch den Modellbauer oder -anwender angenommen. In dieser Arbeit wurden drei Varianten von Sättigungsniveaus untersucht, um deren Einfluss auf den Holzhaushalt zu testen. Für das Standard-Szenario wird mit dem Verlauf gemäss Variante 2 gerechnet.

---

<sup>26</sup> Im Gegensatz zur Sensitivitätsanalyse, welche durch eine infinitesimale Veränderung der Parameter um einen Standardwert ( $dX/dt$ ) ausgeführt wird, werden bei der Parametervariation grosse Veränderungen der Parameter untersucht. Damit werden auch nichtlineare Effekte berücksichtigt und es werden neue Phänomene sichtbar.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.13:** Bevölkerungsentwicklung in der Region KSM, angenähert durch drei logistische Wachstumsverläufe mit unterschiedlichem Sättigungsniveau (Variante 1: 120'000 E, Variante 2: 100'000 E, Variante 3: 80'000 E). Die Rohdaten stammen aus den Bevölkerungszählungen. Die nichtlineare Regression wurde mit dem SIMPLEX-Verfahren durchgeführt.

#### 4.5.3 Wald und Forstwirtschaft

Im folgenden werden Kalibrierung und Validierung des Zuwachses diskutiert. Für die Kalibrierung der Nutzung sei auf Anhang B2.3 verwiesen.

#### Kalibrierung der Bonität $\beta$ nach Keller (1978)

Für eine erste Näherung wird die Bonität anhand des ertragskundlichen Bonitätsschlüssels nach KELLER (1978) abgeschätzt (Anhang B2.2). Dieser berücksichtigt Faktoren, welche durch den Standort und die Baumart bestimmt werden. Die Standortfaktoren sind die Art des Grundgesteines, die Exposition und die Hanglage. Um den unterschiedlichen Standortqualitäten in der Region KSM gerecht zu werden, wird die Region in zwei Zonen eingeteilt (Mittelland und Jurasüdfuss / Born). Die auf diese Weise abgeschätzte durchschnittliche Bonität beträgt  $\beta = 22$ .

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

### Wahl der Volumenzuwachsfunktion ZV(t) und Kalibrierung an den Ertragstafelwerten

Die Volumenzuwachsfunktion ZV<sub>n</sub>(t) für gleichaltriger Reinbestände wird in der Literatur durch zahlreiche Ansätze beschrieben. Allgemeine Einführungen und Übersichten geben z.B. (ASSMANN 1961; KRAMER et al. 1988; WENK et al. 1990). Vertiefte Kritiken und Vergleiche verschiedener Wachstumfunktionen haben ZEIDE (1993) und THOMASIIUS (1962; 1964) durchgeführt.

Vier der am häufigsten verwendeten Wachstumfunktionen werden durch nicht-lineare Regression an den Ertragstafelwerten nach (BADOUX 1968) für Fichten der Bonität 22 getestet und verglichen (Abb. 4.14): die Gompertz-Funktion, die Chapman-Richards-Funktion, die logistische Funktion sowie die Backmann-Funktion (Anhang B2.2).

Das Wachstumsgesetz von BACKMANN (1942) hat sich als einfachster und trotzdem sehr genauer Ansatz erwiesen. Danach ist

$$\log ZV(t) = K * \log^2 T \quad (4.35a)$$

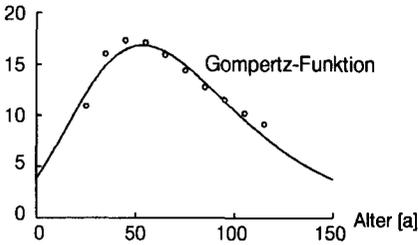
K ist eine stets negative Konstante und T ist das Alter. Durch Umformung und Anpassung ergibt sich

$$ZV(t) = ZV_{\max} * e^{-K * \log^2 \left( \frac{t}{t(ZV_{\max})} \right)} \quad (4.35)$$

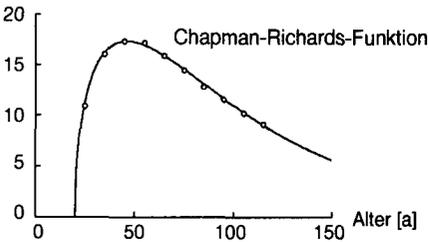
K ist eine Konstante, ZV<sub>max</sub> ist der maximale Volumenzuwachs und t(ZV<sub>max</sub>) ist der Zeitpunkt, wo der Volumenzuwachs maximal ist. In den 50er und 60er Jahren wurde die Backmann-Funktion heftig kritisiert (SCHLETTNER 1954; THOMASIIUS 1965). Die Kritik richtete sich vor allem gegen die Auffassung, es handle sich bei der Backmann-Funktion um eine mathematische Interpretation des Wachstumsgesetzes der Organismen und gegen eine Reihe philosophischer Schlussfolgerungen, welche daran geknüpft wurden. THOMASIIUS (1965) weist darauf hin, dass sich die Konstanten nicht biologisch deuten lassen und keine Dimensionen für sie angegeben werden können. Er hat gezeigt, dass es sich bei der Backmann-Funktion nur um empirisch gestützte Beschreibungen, nicht aber um Erklärungen für das Wachstumsgeschehen handelt. Ihre Eignung zur Approximation von Wachstumsverläufen, vor allem des Volumenwachstums, wird hingegen nicht in Frage gestellt.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

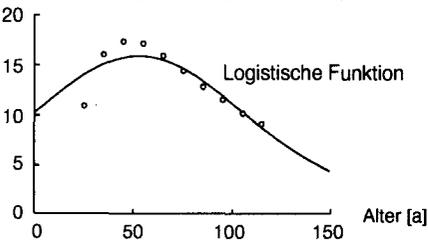
Volumenzuwachs ZV  
[m<sup>3</sup>/ha\*a]



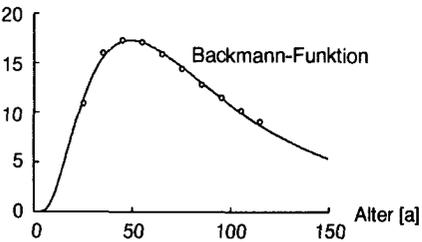
$$ZV(t) = a * e^{-c*(t-d)} * e^{-b*e^{-c*(t-d)}} \quad (4.32)$$



$$ZV(t) = a * e^{-b*(t-d)} * \left(1 - e^{-b*(t-d)}\right)^c \quad (4.33)$$



$$ZV(t) = \frac{a * e^{b*t}}{\left(1 + c * e^{-b*t}\right)^2} \quad (4.34)$$



$$ZV(t) = a * e^{-b * \log^2\left(\frac{t}{c}\right)} \quad (4.35)$$

$$a = ZV_{\max}$$

$$b = \text{Konstante}$$

$$c = t(ZV_{\max})$$

**Abb. 4.14:** Annäherung der Volumenzuwächse in Funktion des Bestandesalters für Fichten der Bonität 22 nach Ertragstafeln (BADOUX 1968) durch vier verschiedene Volumenzuwachsfunktionen mittels nichtlinearer Regression.

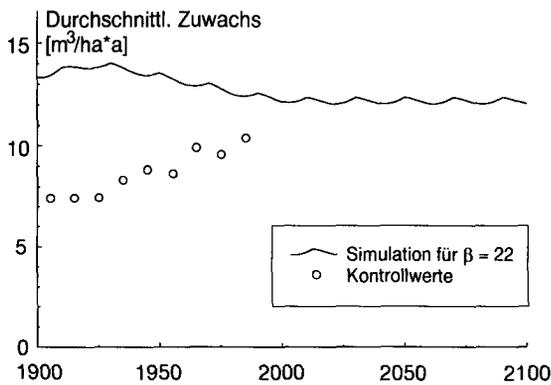
#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

### Validierung des Zuwachses mit Messwerten aus den Waldwirtschaftsplänen

Der durchschnittliche Volumenzuwachs des gesamten Waldes wird berechnet anhand der Backmann-Funktion mit einer konstanten Bonität  $\beta = 22$ . Er kann verglichen werden mit der Zuwachsentwicklung, welche sich aus den Messdaten der Waldwirtschaftspläne berechnet (Abb. 4.15).

$$ZV = \frac{V_{t_2} - V_{t_1} + N_{\Delta t}}{t_2 - t_1} \quad (4.36)$$

$V_{t_1}$  und  $V_{t_2}$  sind die Volumenvorräte zu den Messzeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ ,  $N_{\Delta t}$  ist die Nutzung zwischen diesen Messzeitpunkten.



**Abb. 4.15:** Validierung der Zuwachsberechnung mit konstanter Bonität  $\beta = 22$  anhand der Messdaten aus den Waldwirtschaftsplänen. Die Simulation ergibt eine Abnahme des Zuwachses von rund 14 auf 12 m³/ha\*a. Die Kontrollwerte weisen dagegen auf einen Anstieg des Zuwachses von ca. 7.5 auf 10.5 m³/ha\*a.

Die Simulation ergibt eine leichte Abnahme des durchschnittlichen Hektarzuwachses von rund 14 m³/ha auf 12 m³/ha\*a (Abb. 4.15). Die Abnahme kann begründet werden durch die Erhöhung der Umtriebszeit von 80 auf 120 Jahre, da der Zuwachs bei hohem Bestandesalter abnehmend ist. Die Kontrollwerte zeigen dagegen eine deutliche Erhöhung der Zuwächse. Die simulierten Zuwächse liegen zu Beginn des 20. Jahrhunderts um 80-90% höher als die Kontrollwerte. Um 1990 beträgt die Differenz noch ca. 20%. Insgesamt ist die Produktivität der Standorte um rund 60-70% angestiegen.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Die Abweichung zwischen Simulation und Kontrollwerten kann verschiedene Ursachen haben:

##### 1. Kontrollwerte falsch (unterschiedliche Erhebungsmethoden, Tarife)

Die Kontrollwerte der einzelnen Gemeinden weisen einen mittleren relativen Fehler von etwa 20-30% auf (Abb. 4.15). Sie liegen damit unter der beobachteten Veränderung. Hingegen ist ein systematischer Fehler infolge Veränderung der Erhebungsmethode (Okular, Vollkluppierung, Stichproben) oder der sich verändernden Tarife nicht auszuschliessen, aber auch nicht belegbar.

##### 2. Veränderung der Baumartenzusammensetzung

Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat eine Tendenz eingesetzt, die Fichte als dominante Baumart langsam abzulösen durch Laubbäume (v.a. Buche), was durch das Modell nicht erfasst wird. Die Buche weist aber gegenüber der Fichte einen geringeren Volumenzuwachs auf. Mit der Veränderung der Baumartenzusammensetzung kann also eine Erhöhung der Zuwächse nicht erklärt werden.

##### 3. Ertragstafelzuwächse in hohem Bestandesalter zu niedrig

Bei Buche wurde festgestellt, dass die Ertragstafelzuwächse in hohem Bestandesalter zu niedrig sind. Es ist nicht auszuschliessen, dass ein ähnliches Phänomen auch bei Fichten zu beobachten ist. Eine einfache Abschätzung zeigt jedoch, dass die beobachteten Zuwachssteigerungen dadurch nicht oder nur sehr bedingt erklärt werden können. Wenn die Ertragstafelzuwächse aber erst in den letzten Jahrzehnten nicht mehr stimmen (zu niedrige Zuwächse in hohem Bestandesalter aufweisen), dann würde das auf eine Erhöhung der Bonität hinweisen.

##### 4. Erhöhung der Bonität (Erwärmung, N-Eintrag aus Atmosphäre u. Reisig)

Eine weitere Erklärung besteht darin, dass effektiv Zuwachssteigerungen stattgefunden haben, dass sich also die Bonität<sup>27</sup> der Standorte erhöht hat. Veränderungen der Wachstumsbedingungen wurden schon an verschiedenen Standorten beobachtet (SPIECKER et al. 1996). Eine Erhöhung der Bonität könnte verschiedene Ursachen haben:

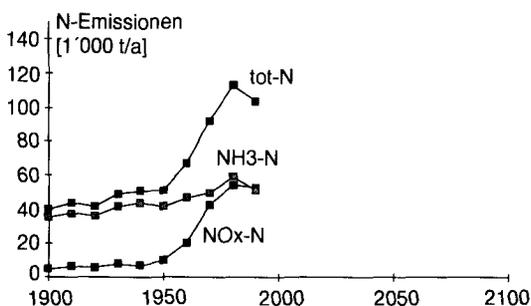
---

<sup>27</sup> Die Bonität bezieht sich hier nur auf die Volumenentwicklung, nicht aber auf die Oberhöhe im 50. Altersjahr, der Definition der Bonität in den Ertragstafeln (BADOUX 1968).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

- Atmosphärischer Stickstoffeintrag aufgrund von Stickoxidemissionen bei Verbrennungsprozessen und Ammoniakemissionen der Landwirtschaft (vgl. Abb. 4.16).
- Verminderter Ernteaustrag von Stickstoff, aber auch Phosphor, Kalium, Magnesium und Natrium aus dem Wald. Das vermehrt im Wald belassene Ast- und Reisigmaterial hat gegenüber dem Stammholz einen höheren Nährstoffanteil.
- Erwärmung.
- Höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre.

Verschiedene Autoren haben schon darauf hingewiesen, dass viele Waldflächen ein klimatisch bedingtes Wachstumspotential haben, welches doppelte oder gar dreifache Wachstumsraten zulassen würde (AXELSSON 1983a, GORDON 1982, GORDON et al. 1982), dass das Wachstum aber normalerweise durch die Nährstoffversorgung limitiert wird (AXELSSON 1983b; 1985)



**Abb. 4.16:** Entwicklung der N-Emissionen in der Schweiz. Die Daten stammen aus BUWAL (1995). Die N-Emissionen haben sich während des 20. Jahrhunderts fast verdreifacht. Während die Landwirtschaft schon lange hohe Ammoniakemissionen aufweist, welche im Verlaufe des 20. Jahrhunderts noch leicht angestiegen sind, ist die grösste Zunahme in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts vor allem auf die Stickoxidemissionen (Verkehr und Heizung) zurückzuführen.

Auf Versuchsflächen in Neuendorf (innerhalb der Untersuchungsregion) und Vordemwald (unmittelbar neben der Untersuchungsregion) wurden hingegen keine deutlichen Veränderungen der Oberhöhe - dem gebräuchlichen Mass der Bonität - festgestellt (ZINGG 1998).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Wenn im folgenden eine Erhöhung der Bonität als Erklärung zugrundegelegt wird, so ist zu berücksichtigen, dass sich die Bonität hier nur auf den Volumenzuwachs bezieht, nicht aber auf die Oberhöhe.

#### Berechnung der Bonitätsentwicklung mit der Backmann-Müller-Funktion und anhand der Daten aus den Waldwirtschaftsplänen

Für die folgenden Berechnungen wird angenommen, dass die gemessenen Zuwachsveränderungen vollumfänglich auf eine Bonitätsveränderung zurückzuführen sind. Die Parameter der Backmann-Funktion werden daher neu als Funktionen von  $\beta$  eingeführt. Die neue Funktion wird *Backmann-Müller-Funktion* genannt (Gleichungen 4.37, 4.37a-c).

$$ZV(t) = ZV_{\max}(\beta) * e^{-K(\beta) * \log^2\left(\frac{t}{t(ZV_{\max})(\beta)}\right)} \quad (4.37)$$

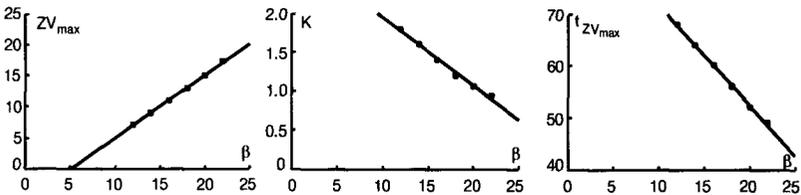
Berechnet man die Backmann-Parameter für verschiedene Bonitäten anhand der Ertragstafeln (BADOUX 1968), so sieht man, dass diese sehr gut durch lineare Funktionen von  $\beta$  approximiert werden können (Abb. 4.17).

$$ZV_{\max}(\beta) = ZV_0 + a_1 * \beta(t) \quad (4.37a)$$

$$K(\beta) = K_0 + a_2 * \beta(t) \quad (4.37b)$$

$$t_{ZV_{\max}}(\beta) = t_0 + a_3 * \beta(t) \quad (4.37c)$$

Die Werte  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_3$  werden durch lineare Regression ermittelt (Anhang 2.2).



**Abb. 4.17:** Darstellung der Backmann-Parameter bei unterschiedlichen Bonitäten. Die Backmann-Parameter lassen sich sehr gut durch lineare Funktionen der Bonität annähern.

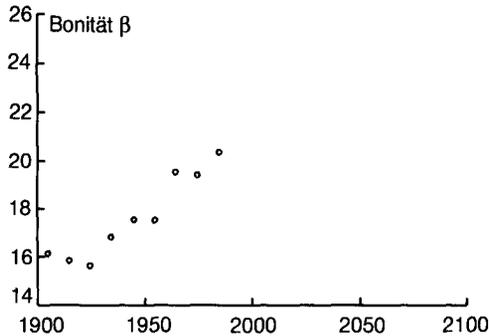
#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Der Verlauf der Bonität kann nun mit Hilfe von XYLOIKOS anhand der gemessenen Zuwächse berechnet werden. Es gilt

$$ZV_n(t) = f(\beta(t)) \quad (4.38)$$

Zum Datensatz von Abb. 4.15 wird durch numerische Auflösung der Gleichung 4.38 nach  $\beta$  der entsprechende Verlauf von Abb. 4.18 für  $\beta(t)$  ermittelt.

Der auf diese Weise berechnete Bonitätsverlauf (BADER 1998) ist in Abb. 4.18 dargestellt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts war die Bonität annähernd konstant und nimmt später kontinuierlich zu. Wie bei den Stickstoffemissionen erfolgt der grösste Zuwachs in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (Abb. 4.16). Ob tatsächlich ein Zusammenhang zwischen Stickstoffemissionen und Bonitätsveränderung besteht, kann damit aber noch nicht bewiesen werden.



**Abb. 4.18:** Berechneter Bonitätsverlauf anhand der gemessenen Zuwächse. Die berechnete Bonitätserhöhung erfolgte im gleichen Zeitraum wie die Zunahme der Stickstoffemissionen (Abb. 4.16).

#### Erneute Kalibrierung der Bonität und Parametervariation

Für die erneute Kalibrierung der Bonität wird diese durch logistische Wachstumsverläufe beschrieben.

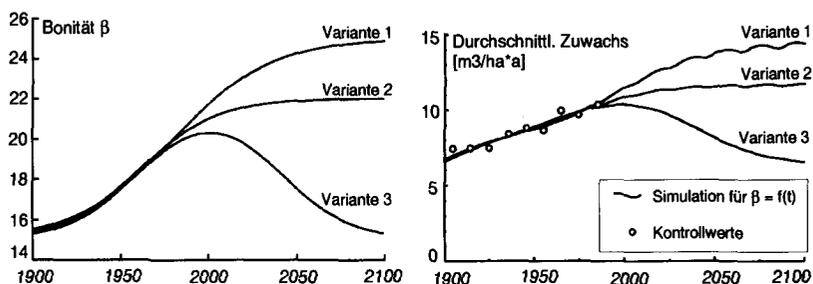
$$\beta(t) = \beta_0 + \frac{\beta_1 - \beta_0}{1 + e^{-\alpha_1 * (t - T_1^*)}} + \frac{\beta_\infty - \beta_1}{1 + e^{-\alpha_2 * (t - T_2^*)}} \quad (4.39)$$

$\beta_0 = \beta(t=-\infty)$  ist das Ausgangsniveau der Bonität. Der zweite Term beschreibt den Anstieg von  $\beta_0$  auf ein oberes Plateau  $\beta_1$ , der dritte Term den Abfall auf ein Endniveau  $\beta_\infty = \beta(t=\infty)$ . Die nichtlineare Regression wird nun nicht mit den

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

berechneten Bonitätswerten (Abb. 4.18), sondern direkt an den gemessenen Zuwächsen durchgeführt. Um den Einfluss der künftigen Bonitätsentwicklung zu untersuchen, wird eine Parametervariation durchgeführt, wobei drei Varianten untersucht werden (Abb. 4.19 links): Zunahme der Bonität auf ein vorgegebenes Plateau von  $\beta_1 = 25$  bzw.  $\beta_1 = 22$  sowie eine Zunahme, gefolgt von einer Abnahme auf das ursprüngliche Niveau ( $\beta_\infty = \beta_0 = 15.0$ ). Für eine genauere Beschreibung sei auf Anhang B2.2 verwiesen.

Die Zuwächse können nun mit der neu kalibrierten Bonität berechnet und mit den Messdaten verglichen werden (Abb. 4.19 rechts). Streng genommen handelt es sich bei diesem Vergleich nicht mehr um eine Validierung, da die Kontrollwerte nicht mehr unabhängig von den Parametern sind.



**Abb. 4.19:** Annäherung des Bonitätsverlaufes durch logistische Kurven (links) und Auswirkungen auf den Zuwachs (rechts). Variante 1: Stabilisierung auf  $\beta=25$ ; Variante 2: Stabilisierung auf  $\beta=22$ ; Variante 3: Absinken auf  $\beta=15.0$ .

Die Bonitätsentwicklung hat langfristig einen grossen Einfluss auf den Zuwachs. Für die regionale Holzversorgung ist es sehr wichtig, dass mögliche Ursachen einer Zuwachsveränderung eruiert werden können. In XYLOIKOS wird für das Standardszenario ein Verlauf entsprechend der Variante 2 angenommen.

## Hypothesen

Aufgrund dieser Erkenntnisse werden folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Die Messdaten aus den Waldwirtschaftsplänen deuten gemäss den Modellrechnungen von XYLOIKOS darauf hin, dass in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Erhöhung des Zuwachses stattgefunden hat. Die berechneten Zuwachserhöhungen stimmen zeitlich überein mit der Erhöhung der Stickoxidemissionen aus Verbrennungsprozessen, den Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft und der veränderten Reisigbewirtschaftung.
2. Die Oberhöhen der Versuchsflächen haben sich im gleichen Zeitraum nicht markant verändert. Vorausgesetzt, dass sich der Zuwachs tatsächlich beschleunigt hat ohne Veränderung der Oberhöhe, hat sich gleichzeitig auch die Form der Bäume verändert. Die Oberhöhe als Mass für die Bonität eines Standortes müsste dann in Frage gestellt werden.
3. Eine Bonitätsveränderung kann mit einem Jahrgangsklassenmodell viel eleganter nachvollzogen werden als mit dem Altersklassenmodell, da damit verschiedene Effekte wie z.B. die Veränderung der Altersstruktur oder verschiedene Baumarten herausgefiltert werden können. Diese Effekte werden beim Altersklassenmodell verwischt durch die laufende Veränderung der Bilanzvolumen. Viele Erkenntnisse über das Wachstum von Einzelbeständen können beim Altersklassenmodell nicht verwendet werden.

### 4.5.4 Holzwirtschaft

#### Kalibrierung

Über die Entwicklung der Pro-Kopf-Gebäudeflächen  $fg(t)$ <sup>28</sup> existieren weder auf regionaler noch auf nationaler Ebene konsistente Datenreihen. Sie werden näherungsweise bestimmt aufgrund einer Schätzung der Gebäudefläche für Wohnen und einer Annahme zum Verhältnis der Flächen für Wohnen und Arbeiten. Die Gebäudefläche für Wohnen wird anhand gesamtschweizerischer Daten berechnet: In den Volkszählungen (ESA 1974; BFS 1993a) werden die

---

<sup>28</sup> Die Gebäudefläche wird in Bruttogeschossfläche (BGF) angegeben.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Anzahl Wohnungen bzw. Haushaltungen erfasst. In der Volkszählung von 1990 (BFS 1993a) sind ausserdem die Wohnflächen pro Wohnung in Gebäuden verschiedener Bauperioden (entsprechend den Jahrgangsklassen im Modell) festgehalten. Unter der Annahme, dass sich die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohnung einer Bauperiode (z.B. infolge Renovation) nicht verändert hat, lässt sich die Wohnfläche gesamtschweizerisch abschätzen (Anhang B3.1).

Auch über die Holzdichten pro Gebäudefläche für Ausbauholz und Konstruktionsholz in verschiedenen Jahrgangsklassen (*man*, *mkn*)<sup>29</sup> existieren keine ausreichenden regionalen Erhebungen. Hier wird zurückgegriffen auf Untersuchungen im Kanton Aargau (WÜEST & PARTNER 1995) und in Deutschland (MANTEL und SCHNEIDER 1967; KROTH et al. 1991). Ferner wurden zwei Diplomarbeiten ausgeführt, in denen Methoden entwickelt wurden, um die Holzdichten von Neubauten mit Hilfe von Devis (GEIGER 1995) und von Altbauten mit Hilfe von Abbruchunternehmen (LÜTHI 1995) abzuschätzen.

Die Nutzungszeiten von Ausbauholz wurden aus einer gesamtschweizerischen Erhebung (BUNDESBAUTEN 1995) entnommen (Anhang 3.2).

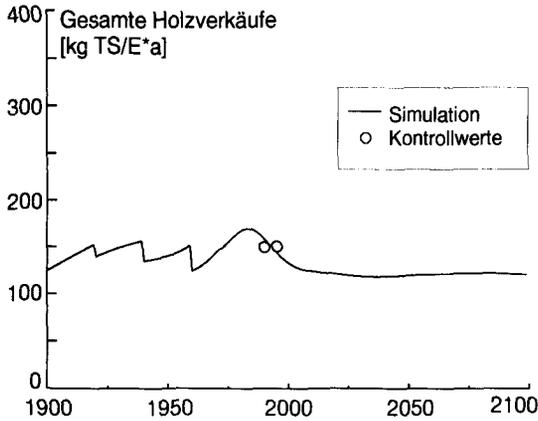
#### Validierung anhand der Pro-Kopf-Holzverkäufe in der Schweiz

XYLOIKOS berechnet den Endholzverbrauch aus der Entwicklung des Gebäudebestandes, dessen Zusammensetzung und der Aufenthaltszeiten von Ausbau- und Konstruktionsholz im Gebäudepark sowie Annahmen über den Verbrauch der übrigen Holzprodukte. Das Modell kann daher validiert werden mit Hilfe von einem unabhängigen Datensatz des Endholzverbrauches. Da in der Region KSM keine entsprechenden Messdaten existieren, wird dazu auf gesamtschweizerische Pro-Kopf-Daten zurückgegriffen. In den Jahren 1991 und 1995 wurden in verschiedenen Betrieben Stichprobenerhebungen zum Endholzverbrauch durchgeführt, welche auf gesamtschweizerische Verhältnisse hochgerechnet wurden (PLANCONSULT 1992; 1998). Der Vergleich mit der Simulation zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Simulation mit den Kontrollwerten (Abb. 4.20).

---

<sup>29</sup> "man" und "mkn" sind die Parameter zur Beschreibung der Holzdichten von Ausbauholz und Konstruktionsholz in den Gebäuden der Jahrgangsklasse *n*, angegeben in kg TS\*m<sup>2</sup> BGF.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.20:** Validierung der Endholzverbrauchsberechnung anhand der Stichproben-erhebung (PLANCONSULT 1992; 1998).

Die Übereinstimmung ist angesichts der ungenauen Daten und der relativ groben Jahrgangsklasseneinteilung erstaunlich gut. Hingegen kann die vergangene Entwicklung mangels historischer Daten über den Endholzverbrauch nicht validiert werden. Abschätzungen aus der Holznutzung und Importen und Exporten (Schweizerische Forststatistiken) ergeben einen Fehlerbereich von rund 50% und mehr und sind daher für die Modellvalidierung nicht geeignet. Die Holzverkäufe liegen aber tendentiell höher als die von Planconsult ermittelten Werte. Eine Anpassung der XYLOIKOS-Parameter würde unter den gegebenen Voraussetzungen keine grössere Gewissheit verschaffen.

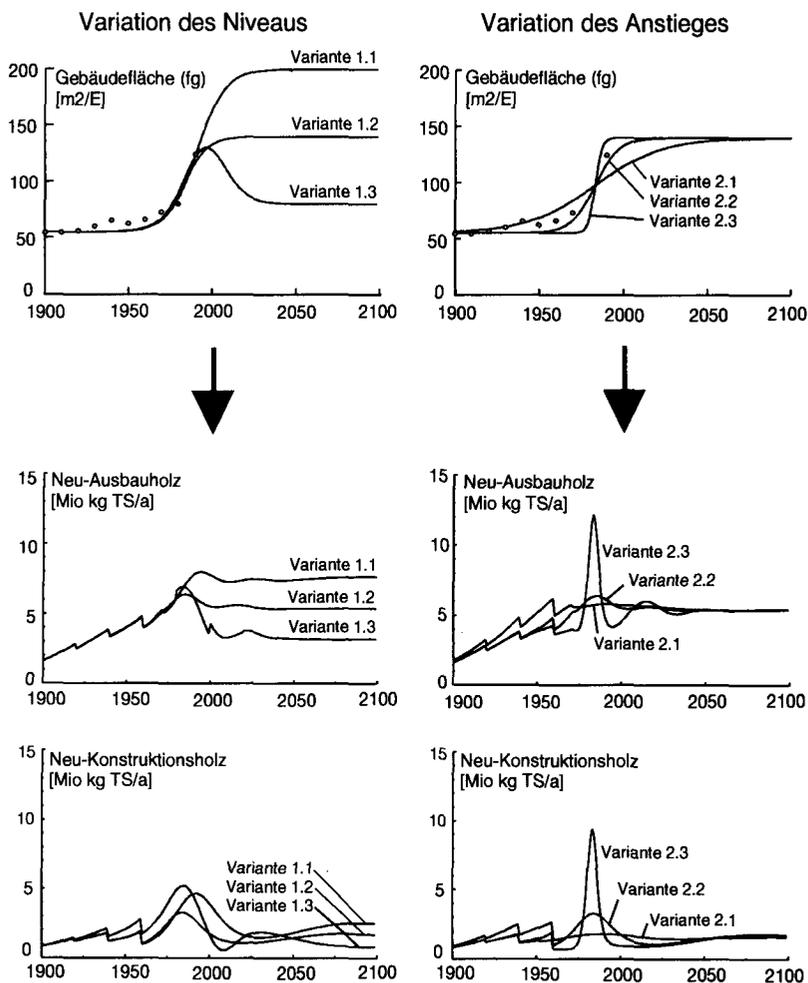
Angesichts der schwachen Datenlage ist es sehr wichtig, die aktivsten Parameter des Modelles zu ermitteln. Daher werden im folgenden Parametervariationen an der Pro-Kopf-Gebäudefläche, der Gebäudelebensdauer und den Holzdichten in den Gebäudekonstruktionen durchgeführt.

#### Parametervariation Pro-Kopf-Gebäudefläche $f_g$ (t)

Die Pro-Kopf-Gebäudefläche ist eine Integrationsgrösse aus Neubaufäche und Abbruchfläche. Kleine Veränderungen können sich daher sehr stark auf Input und Output auswirken. Ihre Bestimmung muss mit grösster Sorgfalt erfolgen.

Die Pro-Kopf-Gebäudefläche hat seit den 80er Jahren sehr stark zugenommen (Abb. 4.21 oben). Ihre Entwicklung wird durch logistische Wachstumskurven

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.21:** Einfluss der Pro-Kopf-Gebäudefläche  $fg(t)$  (oben) auf Neu-Ausbauholz (mitte) und Neu-Konstruktionsholz (unten). Die Pro-Kopf-Gebäudefläche wird in allen Varianten durch ein logistisches Wachstum angenähert. Ausgehend von Variante 1.2 = Variante 2.2 wird auf der linken Seite das Endniveau, auf der rechten Seite die Steilheit des Anstieges variiert (genaue Daten in Anhang B31).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

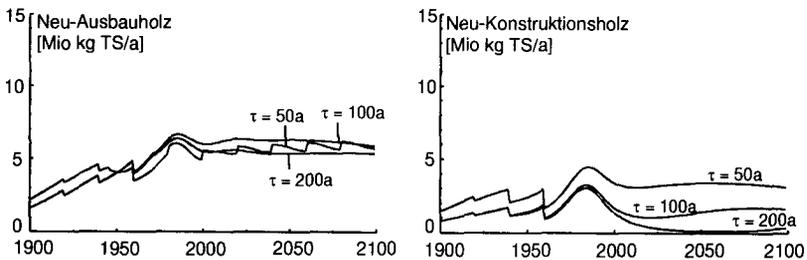
angenähert. Dabei werden einerseits das Endniveau und andererseits die Steilheit des Anstieges variiert (Abb. 4.21 oben). Untersucht werden hier die Auswirkungen auf den Verbrauch von Neu-Ausbauholz (mitte) und Neu-Konstruktionsholz (unten). Variante 1.3 (Reduktion der Pro-Kopf-Gebäudefläche) bedingt eine erhöhte Abbruchrate bzw. eine Anpassung der Gebäudelebensdauer (Anhang B31). Bei den übrigen Varianten wird mit einer durchschnittlichen Gebäudelebensdauer von 100 Jahren gerechnet.

Langfristig wirkt sich vor allem das Niveau der Pro-Kopf-Gebäudefläche auf den Holzverbrauch aus. Während sich die Ausbauholzmengen relativ schnell auf dem neuen Niveau einpendeln, weist der Konstruktionsholzverbrauch vorerst grössere Schwankungen auf.

Ein steiler Anstieg der Pro-Kopf-Gebäudefläche kann kurzfristig erhebliche Holzverbräuche, v.a. von Konstruktionsholz, verursachen. Bei einem sehr steilen Anstieg (Variante 2.3) ist ausserdem mit einem zyklischen Verbrauch von Ausbauholz zu rechnen, da die Renovationsphase bei einem Grossteil der Gebäude in die gleiche Zeitperiode zu liegen kommt.

Für das Standardszenario wird der Verlauf gemäss den Varianten 1.2 bzw. 2.2 angenommen.

#### Parametervariation Lebensdauer der Gebäude $\tau_G$



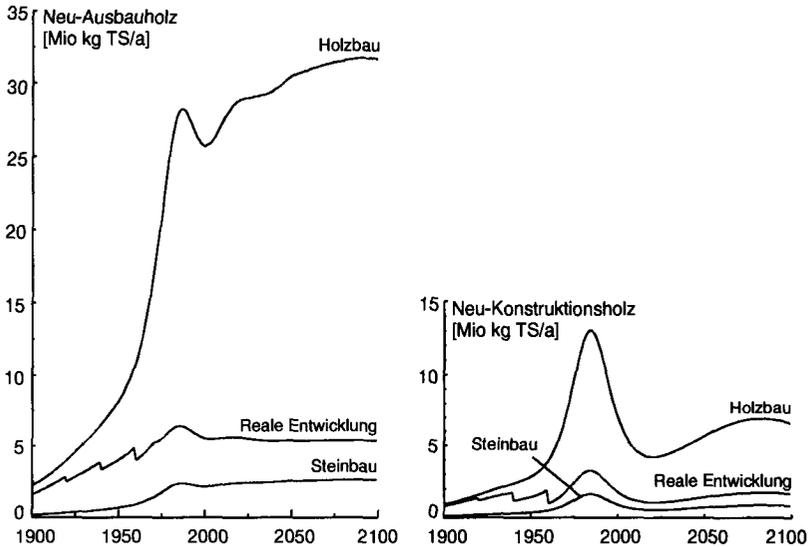
**Abb. 4.22:** Einfluss der Lebensdauer von Gebäuden auf den Verbrauch von Neu-Ausbauholz (links) und Neu-Konstruktionsholz (rechts).

Eine konstante Bauweise (Holz- oder Steinbau) kann bei Veränderungen des Gebäudeparkes zu grossen Schwankungen in den Konstruktionsholzverbräuchen führen. Eine reine Holzbauweise verursacht bei der angenommenen Entwicklung

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

des Gebäudeparkes einen sehr hohen Verbrauch an Ausbauholz, der sich aber auf hohem Niveau schnell einpendelt und einen Konstruktionsholzverbrauch, der grossen Schwankungen unterworfen ist. Die reale Entwicklung führte wegen der abnehmenden Holzdichte der Gebäude zu einer Ausnivellierung des Holzverbrauches.

#### Parametervariation Holzdichten Gebäude: man, mkn



**Abb. 4.23:** Einfluss der Bauweise auf den Verbrauch von Neu-Ausbauholz (links) und Neu-Konstruktionsholz (rechts). Die Holzdichte in den Gebäuden hat derart abgenommen, dass der Verbrauch von Neu-Ausbauholz und Neu-Konstruktionsholz annähernd konstant blieben. Eine konstante Konstruktionsweise hat grössere Schwankungen von Konstruktionsholz zur Folge. Eine reine Holzbauweise verursacht bei der angenommenen Entwicklung des Gebäudeparkes sehr hohe Holzverbräuche, insbesondere von Neu-Ausbauholz.

Der Einfluss der Holzdichten von Konstruktionsholz und Ausbauholz auf die jeweiligen Verkäufe wird ebenfalls mit drei Varianten getestet: Neben dem realen Verlauf der Bauweise werden eine konstante Holzbauweise nach modernem

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Standard<sup>30</sup> und eine konstante Steinbauweise mit geringem Holzanteil simuliert (Abb. 4.23).

Eine konstante Bauweise (Holz- oder Steinbau) kann bei Veränderungen des Gebäudeparkes zu grossen Schwankungen in den Konstruktionsholzverbräuchen führen. Eine reine Holzbauweise verursacht bei der angenommenen Entwicklung des Gebäudeparkes einen sehr hohen Verbrauch an Ausbauholz, der sich aber auf hohem Niveau schnell einpendelt und einen Konstruktionsholzverbrauch, der grossen Schwankungen unterworfen ist. Die reale Entwicklung führte wegen der abnehmenden Holzdicke der Gebäude zu einer Ausnivellierung des Holzverbrauches.

##### 4.5.5 Papierwirtschaft

Auch für die Kalibrierung der Papierwirtschaft mussten gesamtschweizerische Daten beigezogen werden. In verdankenswerter Weise hat der Schweizerische Verband der Zellstoff-, Papier- und Kartonindustrie (ZPK) eine Recherche in seinen Archiven vorgenommen und dabei plausible Daten zum Papierverbrauch und zur Recyclingrate bis in die 30er-Jahre zurück gefunden (Anhang B3.4). Papierverbrauch und Recyclingrate wurden in XYLOIKOS durch eine logistische Wachstumskurve angenähert. Der Einfluss der Recyclingrate wurde bereits in Kapitel 3 behandelt.

##### 4.5.6 Energie

Über die Energieverbräuche von Forstwirtschaft, Holzwirtschaft, Papierwirtschaft und Gebäudepark existieren keine Daten aus der Untersuchungsregion. Der Energieverbrauch der Forstwirtschaft wird aufgrund einer Abschätzung der Anteile der eingesetzten Ernteverfahren und deren spezifischen Energieverbräuche (KNECHTLE 1997; WINKLER 1997) abgeschätzt. Der Energieverbrauch der Holzwirtschaft wird berechnet aus einer Abschätzung der produzierten Produkte

---

<sup>30</sup> Die Holzdicke von modernen Holzbauten ist in erster Näherung gleich gross wie die Holzdicke von durchschnittlichen Gebäuden mit Baujahr 1900.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

und deren spezifischen Herstellungsenergien in Deutschland (RESSEL 1986). Die Berechnung des Energieverbrauches der Papierindustrie basiert auf einer Unterscheidung des Verhältnisses an eingesetztem Recyclingpapier und Frischfaserstoff (BOLLIGER 1992).

Die für den Gesamtenergieverbrauch des Systems sensibelste Grösse ist der Energieverbrauch des Gebäudeparkes<sup>31</sup>. Die Entwicklung der Energiekennzahl Wärme wird abgeschätzt mit Hilfe einer Untersuchung über Mehrfamilienhäuser verschiedener Baujahre (WICK 1983; 1991). Es wird angenommen, dass die spezifischen Energieverbräuche einer Jahrgangsklasse unveränderlich sind und (bei bereits existierenden Gebäuden) dem heutigen Niveau entsprechen. Mit anderen Worten wird angenommen, dass keine energetische Gebäudesanierungen vorgenommen werden<sup>32</sup>. Damit ist das Modell zu grob, um detailliertere Untersuchungen zum Energieverbrauch des Gebäudeparkes vornehmen zu können. Die grobe Entwicklung kann aber dennoch aufgezeigt werden.

Die Energie aus Sonnenkollektoren wird berechnet unter der Annahme eines konstanten Jahreswirkungsgrades von 0.25 und einer konstanten Jahressumme der Globalstrahlung von  $3900 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$  (METEOTEST 1995).

---

<sup>31</sup> Das Modell berücksichtigt nur den Wärmeenergieverbrauch der Gebäude (Heizung und Warmwasser)

<sup>32</sup> Durch Sanierungen kann mit vertretbarem Aufwand bei energieverschwendenden Gebäuden rund eine Halbierung des Wärmeverbrauches erreicht werden. Ein solarer Betrieb von energetisch sanierten älteren Gebäuden ist damit aber noch nicht möglich.

## 4.6 Kenngrößen und interne Zielwerte

Um die Anwendung von XYLOIKOS zu illustrieren, werden in Kapitel 4.7 verschiedene Szenarien berechnet. Die Resultate werden mit Hilfe von 8 *Kenngrößen* bewertet. Diese werden aus den Systemvariablen gebildet. Sie sind so - gewählt, dass der Holzhaushalt anhand von Hypothesen zur Nachhaltigkeit oder ökonomischer Hypothesen beurteilt werden kann. Es wird also angenommen, dass sie bestimmte Indikatorfunktionen erfüllen (Tab. 4.5). Für die Kenngrößen werden *normative Zielvorgaben* festgelegt. Diese haben nicht den Anspruch, sinnvolle oder zweckmässige Werte darzustellen. Sie sollen nur die Vorgehensweise illustrieren. Die mathematische Definition der Kenngrößen befindet sich in Anhang A6.

**Tab. 4.5:** Kenngrößen und deren Indikatorfunktionen

	<b>Kenngrößen</b>	<b>Indikatorfunktionen</b>
1	SVG Holz	Autarkiegrad / Knappheiten-Überschüsse
2	SVG Energie gesamte Holzkette	Autarkiegrad
3	Holzlager (Vorrat) des Waldes	"Holzkapital" der Region
4	Holzlager Konsum	"Kapital" an Altholz bzw. Altlast
5	Nutzung des Waldes	Entwicklung der Forstbranche
6	Verbrauch Konstruktionsholz	Entwicklung der Zimmereibranche
7	Verbrauch Ausbauholz	Entwicklung der Schreinereibranche
8	Verbrauch fossiler Energieträger für Gebäudebetrieb	Zielerreichung "solarer Gebäudeb."

### 1. Selbstversorgungsgrad der Region mit Holz (SVG Holz)

Definition:

$$\text{SVG Holz} = \frac{\text{Eigenproduktion}}{\text{Eigenbedarf}} = \frac{\text{Eigenproduktion}}{\text{Eigenproduktion} + \text{Nettoimport}} \quad (4.40)$$

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Der Selbstversorgungsgrad mit Holz (SVG Holz) ist ein Indikator für die Autarkie der Region bezüglich der Holzversorgung, aber auch bezüglich der Produktion. Angesichts der Ausgangslage der Region KSM, welche heute einen SVG Holz von rund 85% aufweist (Kapitel 3.5.1), erscheint das folgende Ziel sinnvoll und realistisch.

Ziel: Der SVG der Region mit Holz soll sich langfristig innerhalb einer Bandbreite von etwa 80-120% bewegen. Sowohl höhere regionale Knappheiten wie Überschüsse sollen vermieden werden.

#### 2. Selbstversorgungsgrad der Holzketten mit Energie (SVG Energie)

Definition:

$$\text{SVG Energie} = \frac{\text{Eigenproduktion}}{\text{Eigenbedarf}} = \frac{\text{Eigenproduktion}}{\text{Eigenproduktion} + \text{Nettoimport}} \quad (4.41)$$

Die Eigenproduktion besteht aus regional verfügbarem Brenn- und Brennholz sowie Sonnenkollektoren. Der SVG Energie ist ein Indikator für die Autarkie der Region mit Energie.

Ziel: Der SVG Energie soll langfristig auf rund 80% ansteigen.

#### 3. Holzlager (Vorrat) des Waldes

Das Holzlager des Waldes wird als durchschnittliches Holzlager pro Einwohner dargestellt. Es ist ein Indikator für das (Holz-)Kapital, welches künftigen Generationen übergeben wird.

Ziel: keines

#### 4. Holzlager Konsum (Gebäudepark)

Das Holzlager im Gebäudepark wird als durchschnittliches Holzlager pro Einwohner dargestellt. Auch dieses ist ein Indikator für das Kapital, aber unter Umständen auch für eine Altlast (z.B. behandeltes Holz), welche künftigen Generationen übergeben wird.

Ziel: keines

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

##### 5. Nutzung des Waldes

Die Nutzung des Waldes wird als Jahresnutzung pro Region dargestellt. Sie ist ein Indikator für den jährlichen Arbeitsanfall oder Erlös in der Forstwirtschaft.

Ziel: Die Nutzung des Waldes soll keine grösseren Schwankungen aufweisen.

##### 6. Verbrauch von Konstruktionsholz

Der Verbrauch von Konstruktionsholz wird gemessen als die pro Jahr in den Gebäudepark der Region eingebaute Konstruktionsholzmenge. Sie ist ein Indikator für den Arbeitsanfall und den Erlös in der Zimmereibranche.<sup>33</sup>

Ziel: Der Konstruktionsholzverbrauch sollte keinen grösseren Schwankungen unterworfen sein, weil die ökonomische Erfahrung zeigt, dass schnelle Branchenschwankungen volkswirtschaftliche Nachteile bringen.

##### 7. Verbrauch von Ausbauholz

Der Verbrauch von Ausbauholz wird gemessen als die pro Jahr in den Gebäudepark der Region eingebaute Ausbauholzmenge. Sie ist ein Indikator für den Arbeitsanfall und den Erlös in der Schreinereibranche.

Ziel: Der Ausbauholzverbrauch sollte aus den gleichen Gründen keinen grösseren Schwankungen unterworfen sein.

##### 8. Verbrauch von fossilen Energieträgern für den Gebäudebetrieb

Der Verbrauch von fossilen Energieträgern für den Gebäudebetrieb wird definiert als jährlicher Energieverbrauch zur Wärmeversorgung (Heizung und Warmwasser) des regionalen Gebäudeparkes. Er ist ein Indikator für das Erreichen des Zieles eines solar betriebenen Gebäudeparkes (vgl. Szenarien 2.1 und 2.2).

Ziel: Bis zum Jahr 2050 soll sich die Region vollständig loslösen vom Verbrauch fossiler Energieträgern für den Gebäudebetrieb. (vgl. externe Zielvorgabe in Kapitel 4.1.3).

---

<sup>33</sup> Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen verarbeiteter Holzmenge und Arbeitsanfall oder Erlös konnte noch nicht hergestellt werden. Die Aussagen zu den Branchenaktivitäten des Zimmerei- und Schreinereigewerbes basieren auf der Hypothese eines vermuteten Zusammenhanges.

## 4.7 Umbauszenarien

### 4.7.1 Einleitung

Die Anwendung von XYLOIKOS wird exemplarisch für zwei Fälle illustriert und überprüft: für den Umbau des Waldes und für den Umbau des Gebäudeparkes. Nach den Zielvorgaben (Kapitel 2.2.2) soll die Anordnung des Waldes bis 2050 derart umgestaltet werden, dass sie die Erholungs- und die Schutzfunktion möglichst gut erfüllen kann. Der Gebäudepark soll so umgebaut werden, dass er bis zum Jahr 2050 eine vollständig regionale solare Wärmeversorgung aufweist. Als Referenz dient ein Standardszenario, welches auf einer Trendfortsetzung basiert. Mit Hilfe von XYLOIKOS sollen die Auswirkungen verschiedener Umbaustراتيجien auf den regionalen Holzhaushalt bzw. auf die Kenngrössen (Kapitel 2.3.3) untersucht werden.

### 4.7.2 Standardszenario (S0)

#### Annahmen

Fortsetzung des Trendes: logistisches Wachstum der Bevölkerung und der Pro-Kopf-Gebäudefläche, durchschnittliche Lebensdauer der Gebäude 100 Jahre, Holzdichte in Gebäuden mit Baujahr nach 2000 wie 1980-1995, Energieverbrauch und Energieversorgung der Gebäude mit Baujahr nach 2000 wie 1995. Die Anordnung des Waldes bleibt wie heute bestehen.

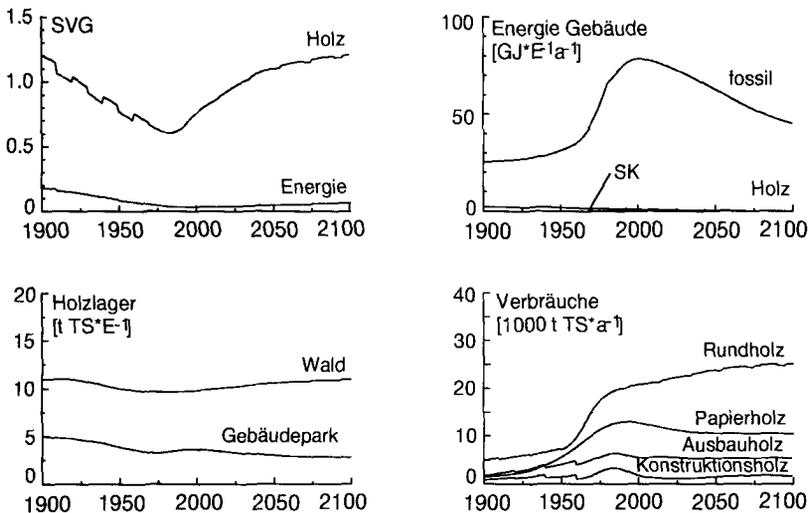
#### Diskussion

*Selbstversorgungsgrad (SVG) mit Holz und Energie (Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, Gebäudebetrieb):*

Während der Wachstumsphase des Gebäudeparkes nimmt der SVG sowohl bei Holz als auch bei Energie ab. Nach der Stabilisierung des Gebäudeparkes (gemäss Annahme etwa nach dem Jahr 2000) nimmt der SVG für Holz deutlich, der SVG für Energie sehr schwach zu. Die zum Teil erheblichen Veränderungen

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

in der Holzbewirtschaftung (Zunahme der Bonität, Einführung von Papier, Wachstum des Gebäudeparkes, Veränderung der Holzdichte in Gebäuden usw.) haben sich in den vergangenen 100 Jahren gegenseitig aufgehoben, sodass der Selbstversorgungsgrad mit Holz keine massiven Veränderungen erfahren hat. Der steigende SVG mit Energie ist vor allem bedingt durch das Auswechseln von energieaufwendigen Gebäuden durch energiesparsamere. Der steigende SVG mit Holz (Überschüsse) sind bedingt durch die abnehmende Neubaurate und das Auswechseln von alten holzreichen Gebäuden durch moderne holzärmere Gebäude, während die Bonitätsentwicklung gemäss Annahme immer noch leicht zunehmende Erträge verursacht.



**Abb. 4.24:** Kenngrössenentwicklung für Standardszenario. Die Zielvorgaben aus Kapitel 4.6 werden nur teilweise erreicht. Insbesondere findet keine ausreichende Loslösung vom Verbrauch fossiler Energieträger statt.

*Energieverbräuche pro Kopf zum Gebäudebetrieb (fossile ET, Brennholz, Sonnenkollektoren):*

Die fossilen Energieträger dominieren über den gesamten Betrachtungszeitraum den Energieverbrauch für den Gebäudebetrieb. Nach einem sehr raschen Anstieg tritt nach dem Jahr 2000 ein langsamer Rückgang auf (2100 etwa halb so viel

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

fossile Energieträger pro Kopf wie 2000). Der Rückgang wird allein durch das Auswechseln der energieaufwendigen Gebäude durch energiesparsamere Gebäude vom Typ 1995 erreicht. Eine Loslösung von fossilen Energieträgern wird mit diesem Szenario nicht erreicht. Der Pro-Kopf-Brennholzverbrauch ist leicht rückläufig. Der Verbrauch von Sonnenkollektorenergie ist bei diesem Szenario während der gesamten Betrachtungszeit null.

*Holzlager pro Einwohner (Holzvorrat im Wald, Holzlager im Gebäudepark):*

Sowohl das Holzlager des Waldes als auch dasjenige des Gebäudeparkes sind während des gesamten Betrachtungszeitraumes annähernd konstant. Das Bevölkerungswachstum (-> abnehmende Waldfläche pro Einwohner) wird vor allem kompensiert durch eine Zunahme des Vorrates pro Hektare. Der wachsende Gebäudepark wird vor allem mit holzärmeren Gebäuden erstellt.

*Verkäufe (absolut) von Rundholz, Konstruktionsholz, Ausbauholz und Papier:*

Der Rundholzverkauf nimmt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu und flacht sich anschliessend etwas ab. Die tieferen Rundholzverkäufe in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind bedingt durch die Erhöhung der Umtriebszeit. Die nachfolgende Erhöhung ist eine Folge der seit den 40er-Jahren steigenden Bonität der Wälder. Die Verkäufe von Papierholz steigen während des 20. Jahrhunderts an und stabilisieren sich auf einem leicht reduzierten Niveau (logistisches Wachstum der Pro-Kopf-Verbräuche und der Recyclingrate). Sowohl die Verkäufe von Konstruktionsholz als auch von Ausbauholz steigen während der Aufbauphase des Gebäudeparkes trotz abnehmender Holzdicke der Gebäude an. Während die Verkäufe von Konstruktionsholz nach der Stabilisierung des Gebäudeparkes absinken und erst allmählich wieder ansteigen (Auswechslung der Gebäude aus der starken Wachstumsphase), stabilisieren sich die Verkäufe von Ausbauholz auf dem hohen Niveau. Dieses Phänomen wird erklärt durch die kürzeren Aufenthaltszeiten von Ausbauholz im Gebäudepark.

**Fazit:**

**Bei einer langsamen Stabilisierung der Bonität, einer Stabilisierung des Gebäudeparkes und einer unveränderten Holzdicke in den Gebäuden muss künftig mit vermehrten regionalen Produktionsüberschüssen gerechnet werden. Vor allem der Konstruktionsholzverbrauch nimmt in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts tendentiell ab, während die Produktionsmengen infolge der Bonitätserhöhung immer noch zunehmen.**

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

fossile Energieträger pro Kopf wie 2000). Der Rückgang wird allein durch das Auswechseln der energieaufwendigen Gebäude durch energiesparsamere Gebäude vom Typ 1995 erreicht. Eine Loslösung von fossilen Energieträgern wird mit diesem Szenario nicht erreicht. Der Pro-Kopf-Brennholzverbrauch ist leicht rückläufig. Der Verbrauch von Sonnenkollektorenergie ist bei diesem Szenario während der gesamten Betrachtungszeit null.

*Holzlager pro Einwohner (Holzvorrat im Wald, Holzlager im Gebäudepark):*

Sowohl das Holzlager des Waldes als auch dasjenige des Gebäudeparkes sind während des gesamten Betrachtungszeitraumes annähernd konstant. Das Bevölkerungswachstum (-> abnehmende Waldfläche pro Einwohner) wird vor allem kompensiert durch eine Zunahme des Vorrates pro Hektare. Der wachsende Gebäudepark wird vor allem mit holzärmeren Gebäuden erstellt.

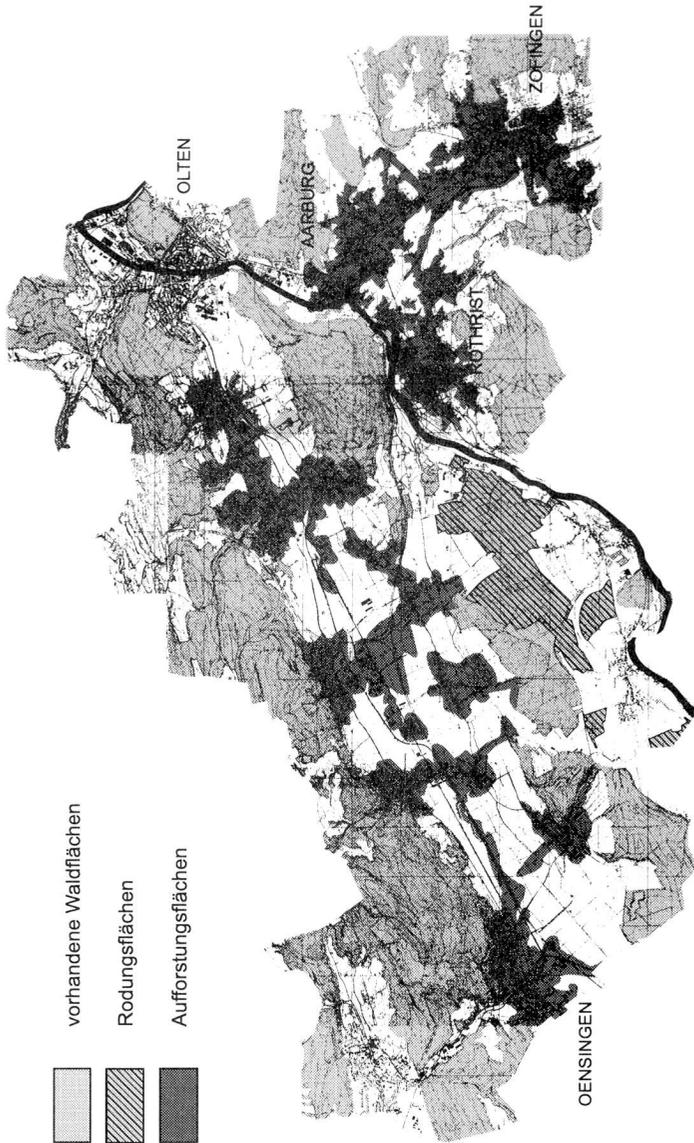
*Verkäufe (absolut) von Rundholz, Konstruktionsholz, Ausbauholz und Papier:*

Der Rundholzverkauf nimmt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu und flacht sich anschliessend etwas ab. Die tieferen Rundholzverkäufe in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind bedingt durch die Erhöhung der Umtriebszeit. Die nachfolgende Erhöhung ist eine Folge der seit den 40er-Jahren steigenden Bonität der Wälder. Die Verkäufe von Papierholz steigen während des 20. Jahrhunderts an und stabilisieren sich auf einem leicht reduzierten Niveau (logistisches Wachstum der Pro-Kopf-Verbräuche und der Recyclingrate). Sowohl die Verkäufe von Konstruktionsholz als auch von Ausbauholz steigen während der Aufbauphase des Gebäudeparkes trotz abnehmender Holzdicke der Gebäude an. Während die Verkäufe von Konstruktionsholz nach der Stabilisierung des Gebäudeparkes absinken und erst allmählich wieder ansteigen (Auswechslung der Gebäude aus der starken Wachstumsphase), stabilisieren sich die Verkäufe von Ausbauholz auf dem hohen Niveau. Dieses Phänomen wird erklärt durch die kürzeren Aufenthaltszeiten von Ausbauholz im Gebäudepark.

Fazit:

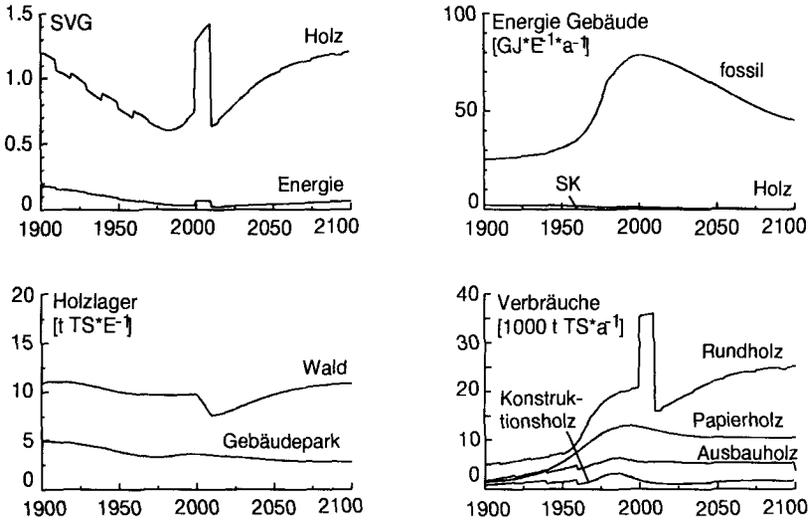
Bei einer langsamen Stabilisierung der Bonität, einer Stabilisierung des Gebäudeparkes und einer unveränderten Holzdicke in den Gebäuden muss künftig mit vermehrten regionalen Produktionsüberschüssen gerechnet werden. Vor allem der Konstruktionsholzverbrauch nimmt in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts tendentiell ab, während die Produktionsmengen infolge der Bonitätserhöhung immer noch zunehmen.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

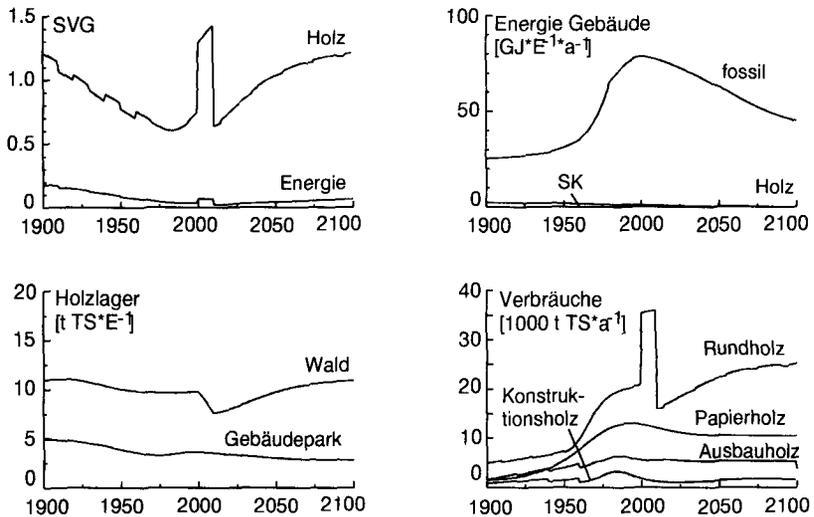


**Abb. 4.25:** Entwurf "City-Forest-Web" für die Landschaft von der Region KSM. Rund ein Viertel der Waldfläche wird gerodet und an anderen Orten wieder aufgeforstet. Entwurf von S. Perrochet in MÜLLER et al. (1998).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.26:** Kenngrößen für Szenario "Schneller Umbau des Waldes" (S1.1) gemäss Entwurf in Abb. 4.25.



**Abb. 4.27:** Kenngrößen für das Szenario "Langsamer Umbau des Waldes" (S1.2). Durch eine **langsame** Veränderung des Landnutzungsmusters können die Schwankungen in der Rundholzproduktion deutlich verkleinert werden.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

### Diskussion

Vorbemerkung: Die Folgen eines Waldumbaus reichen bis ins 22. Jahrhundert. Eine entsprechende Simulation hat aber gezeigt, dass diese Auswirkungen noch während des 21. Jahrhunderts weitgehend ausklingen. Die Resultate werden daher auch bei diesem Szenario nur bis 2100 dargestellt.

*Selbstversorgungsgrad (SVG) mit Holz und Energie (Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, Gebäudebetrieb):*

Ein schneller Umbau des Waldes verursacht eine kurzfristige Erhöhung des Holz-SVG (Überschüsse). Nach dem Umbau fällt der SVG Holz unter das Niveau vor dem Umbau und nähert sich dann allmählich dem Standardszenario. Durch einen langsamen Umbau des Waldes mit einem Zeithorizont in der Grössenordnung der Umtriebszeit können diese Schwankungen weitgehend aufgefangen werden. Ob ein Auffangen dieser Schwankungen mit einer Variation der Zwischennutzung sinnvoll wäre, müsste geprüft werden. Eine weitere zu überprüfende Alternative zur Vermeidung von Überschüssen wäre, gewisse Waldstandorte aus der Produktion zu nehmen. Auf den SVG Energie hat eine Veränderung des Landnutzungsmusters nur einen minimalen Einfluss.

*Energieverbräuche pro Kopf zur Gebäudewärmeversorgung (fossile ET, Brennholz, Sonnenkollektoren):*

Die Wärmeversorgung der Gebäude wird durch den Waldumbau nicht beeinflusst. Das während dem Waldumbau zusätzlich anfallende Brennholz kann mangels entsprechender Feuerungssysteme nicht regional verwertet werden.

*Holzlager pro Einwohner (Holzvorrat im Wald, Holzlager im Gebäudepark):*

Das Holzlager im Wald wird durch einen schnellen Waldumbau vorübergehend um fast ein Viertel vermindert, was durch einen langsamen Umbau vermieden werden kann. Das Holzlager der Gebäude wird durch den Waldumbau nicht beeinflusst.

*Verkäufe (absolut) von Rundholz, Konstruktionsholz, Ausbauholz und Papier:*

Der Rundholzverkauf weist bei einem schnellen Waldumbau grosse Schwankungen auf. Damit dürften auch der Arbeitsanfall und die Einnahmen der Forstwirtschaft grösseren Schwankungen unterliegen. Bei einem langsameren Umbau können die Schwankungen der Rundholzverkäufe aufgefangen werden. Die Verkäufe von Konstruktions-, Ausbau- und Papierholz werden durch den Waldumbau

nicht beeinflusst. Ein Mehrverkauf infolge Preisverfall durch die Überschüsse wird im Modell nicht berücksichtigt<sup>35</sup>.

##### Fazit:

Eine Veränderung der Waldstandorte würde den sich abzeichnenden Holzüberschuss in den nächsten Jahrzehnten verstärken. Eine Veränderung des Landnutzungsmusters zugunsten der Erholungs- und der Schutzfunktion ist aber unter Einhaltung der Zielvorgaben dennoch realisierbar bei einem langsamen, aber stetigen und zielgerichteten Umbauprozess. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, ob die Schwankungen in der Versorgung teilweise durch eine Variation der Zwischennutzung aufgefangen werden könnte.

#### 4.7.4 Szenarien für den Umbau des Gebäudeparkes (S2)

Der Gebäudepark soll so umgebaut werden, dass er bis im Jahr 2050 aus regional verfügbaren, erneuerbaren Energieträgern betrieben werden kann. Es werden zwei Umbaustrategien betrachtet und mit dem Standardszenario verglichen:

1. Szenario 2.1: Abwarten bis 2040 und schneller Umbau von 2040-2050.
2. Szenario 2.2: Gezielter, langsamerer Umbau von 2000-2050.

##### Annahmen

- Der Umbau zu einem solaren Gebäudepark wird ausschliesslich durch ein Auswechseln der energieaufwendigen Gebäude durch "solare Gebäude" erreicht. Energetische Sanierungen werden durch das Modell nicht erfasst<sup>36</sup>. Diese Vereinfachung ist für den Modellzweck zulässig, da durch energetische

---

<sup>35</sup> Während ökonomische Modelle Preisveränderungen als Hauptursache für veränderte Verkaufsmengen betrachten, basiert deren Berechnung in XYLOIKOS auf der physischen Struktur, ignoriert aber die Preiselastizitäten. Die Entwicklung der vergangenen 100 Jahre hat gezeigt, dass die Mengenentwicklung über grössere Zeiträume nur marginal durch Preisentwicklungen erklärbar ist.

<sup>36</sup> Eine entsprechende Ergänzung wäre ohne weiteres möglich. Für den vorgegebenen Modellzweck ist sie aber nicht essentiell.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

Sanierungen ein solarer Gebäudebetrieb in der Regel noch nicht möglich ist<sup>37</sup>. Die Parameter der "Solargebäude" werden von heute bereits existierenden Konstruktionen entnommen: Die Energiekennzahl für Wärme beträgt  $e_G = 130 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{a}$ , die Sonnenkollektorfläche beträgt 10% der Bruttogeschossfläche und der Anteil von Holz an der Energieversorgung beträgt 60%, die Holzdicke der Gebäude entspricht dem heutigen Durchschnitt (Anhänge B45, C2).

- Als Energieträger werden Holz (Brennholz und Brennaltholz) und Sonnenkollektoren auf der Dachfläche der Solargebäude eingesetzt.
- Die energetische Verwertung von Altholz  $k_{9,3}(t)$  steigt in den nächsten Jahren von etwa 15% auf 50% an und wird zur Gebäudeheizung eingesetzt (Variante 2 in Anhang B35).

#### Diskussion

*Selbstversorgungsgrad (SVG) mit Holz und Energie (Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, Gebäudebetrieb):*

Ein schneller Umbau des Gebäudeparkes kann nicht mit den eigenen Ressourcen (weder Holz noch Energie) bewerkstelligt werden. Die SVG Holz und Energie sinken während des Umbaus praktisch auf null. Ein langsamer Umbau des Gebäudeparkes kann hingegen Schwankungen vermeiden. Erforderlich ist dabei eine massive Reduktion der Energiekennzahl Wärme bei neu erstellten Gebäuden.

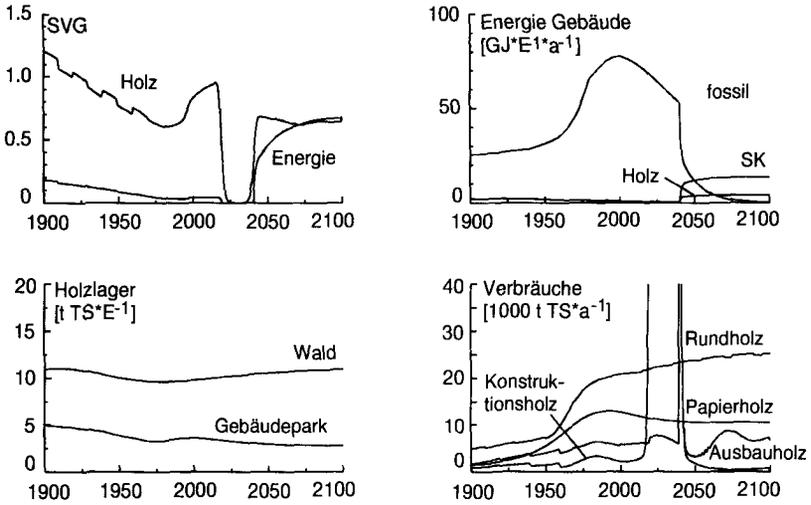
*Energieverbräuche pro Kopf zum Gebäudebetrieb (fossile ET, Brennholz, Sonnenkollektoren):*

Bei beiden Szenarien wird eine vollständige Loslösung von fossilen Energieträgern erreicht. Bei einem schnellen Umbau nehmen die Sonnenkollektor- und die Holzenergie sprunghaft zu. Dies dürfte kurzfristig einen drastischen und später zyklischen Bedarf nach Sonnenkollektoren auslösen.

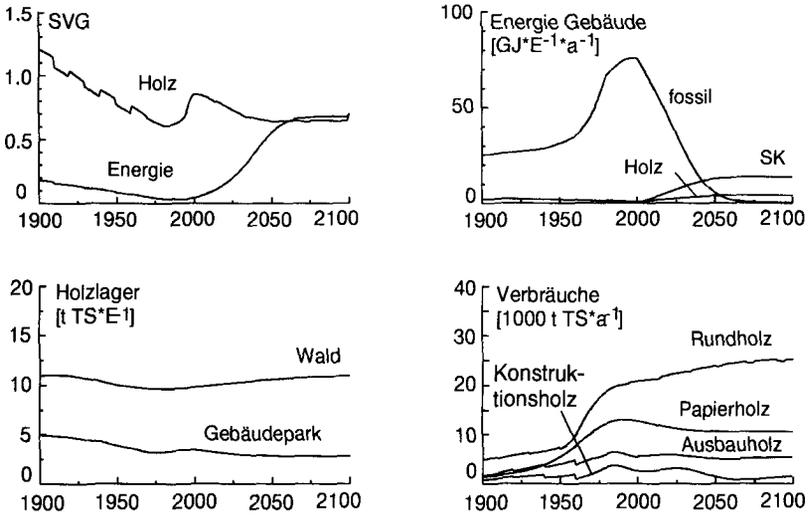
---

<sup>37</sup> Bei Gebäuden der 50er bis 70er-Jahre kann bei einer Sanierung durchschnittlich etwa mit einer Halbierung des Wärmeenergieverbrauches von etwa  $800 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{a}$  auf etwa  $400 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{a}$  gerechnet werden (BUKOWIECKI et al. 1994). Für einen solaren Betrieb sind hingegen Energiekennzahlen von deutlich unter  $150 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{a}$  erforderlich (siehe Simulationsergebnisse). Siehe dazu auch REDLE (1998).

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"



**Abb. 4.28:** Kenngrößen für Szenario "Schneller Umbau Gebäudeparkes" von 2040-2050 (S2.1).



**Abb. 4.29:** Kenngrößen für Szenario "Langsamer Umbau Gebäudepark" von 2000-2050 (S2.2). Mit einem **langsamen** Umbau des Gebäudeparkes können die Schwankungen des Holzverbrauches deutlich vermindert werden.

#### 4. Dynamisches Modell "XYLOIKOS"

*Holzlager pro Einwohner (Holzvorrat im Wald, Holzlager im Gebäudepark):*

Die Holzlager im Wald und im Gebäudepark werden durch diese Szenarien nicht spürbar beeinflusst.

*Verkäufe (absolut) von Rundholz, Konstruktionsholz, Ausbauholz und Papier:*

Ein schneller Umbau des Gebäudeparkes verursacht extreme Schwankungen der Ausbau- und Konstruktionsholzverbräuche. Ein langsamer Umbau des Gebäudeparkes hat dagegen eine Nivellierung dieser Verbräuche zur Folge. Vor allem der Konstruktionsholzbedarf könnte im Gegensatz zum Standardszenario für längere Zeit auf dem heutigen Niveau gehalten werden. Die Rundholz- und die Papierverkäufe werden nicht beeinflusst.

#### Fazit:

Ein Umbau des heutigen Gebäudebestandes in einen Gebäudebestand mit solarer regionaler Wärmeversorgung mittels Sonnenkollektoren und Holz kann dem sich abzeichnenden Holzüberschuss entgegenwirken. Ein solcher Umbau ist unter Einhaltung der Zielvorgaben weitgehend möglich, jedoch nur wenn der Umbau des Gebäudeparkes langsam, aber stetig und zielgerichtet erfolgt. Ein schneller Umbau kann grosse Schwankungen der Verkaufsmengen erzeugen. Holz wird bei diesem Szenario zu einem knappen Gut. Die Energiekennzahl Wärme müsste dabei deutlich gesenkt werden auf unter 130 MJ/m<sup>2</sup>\*a. Die in der Gebäudekonstruktion eingesetzte Holzmenge dürfte nicht erhöht werden.

## 4.8 Fazit

1. Mit dem dynamischen Simulationsmodell XYLOIKOS wird der Holzhaushalt einer Region für das 20. Jahrhundert nachvollzogen. Damit lassen sich Erkenntnisse über das Systemverhalten gewinnen, indem Schlüsselgrößen identifiziert werden. Diese Erkenntnisse helfen bei der Entwicklung von Szenarien für das 21. Jahrhundert. Aus den Szenarien wiederum lassen sich unerwünschte Entwicklungen frühzeitig erkennen.
2. Das Modell beschränkt sich auf die Modellierung von physikalischen Zusammenhängen der Massen- und Energieerhaltung. Soziale, ökonomische und biochemische Aspekte werden damit nicht erklärt und fließen in Form von klar deklarierten Annahmen in das Modell ein. Damit beschränkt sich die Aussagekraft des Modelles auf die physikalischen Aspekte, bei denen man davon ausgehen kann, dass sie im Gegensatz zu sozialen und ökonomischen Aspekten immer gelten.
3. Im Vergleich zur quasistationären Modellierung erweist sich die dynamische Modellierung als bedeutend aufwendiger. Zur Parametrisierung werden nicht einzelne Daten, sondern Datenreihen benötigt, die zum Teil mit grösseren Unsicherheiten behaftet sind. Die mathematischen Beziehungen werden dadurch komplexer und die Berechnungen werden um Grössenordnungen aufwendiger als mit quasistationären Modellen. Mit PC's können die Simulationen aber dennoch in vernünftigen Zeiträumen berechnet werden. Die aus der dynamischen Simulation gewonnenen Erkenntnisse können mit quasistationären Betrachtungen zum Teil nicht nachvollzogen werden.
4. Im Vergleich zu sehr grossen Modellen und informationssystemen besitzt XYLOIKOS eine sehr gute Aussagekraft und ist im Aufwand um rund eine Grössenordnung geringer.

# 5

## **Schlussfolgerungen**

Regionale Holzhaushalt-Simulationsmodelle erlauben Aussagen:

1. zur Positionierung des Holzes in einer nachhaltigen Entwicklung
2. zur Methodenentwicklung in der Forst-, Holz-, Bau- und Abfallwirtschaft
3. zu künftigen Funktionen von Wald und Holz in der Entwicklung urbaner Kulturlandschaften.

## 5.1 Beitrag zur Holzbewirtschaftung in einer nachhaltigen Regionalentwicklung

1. Das Holzhaushalt-Simulationsmodell XYLOIKOS leistet einen Beitrag zur regionalen Umsetzung desjenigen Postulates einer nachhaltigen Entwicklung, welches die Ressourcennutzung begrenzen will. Es gibt aber keine definitiven Antworten auf die Frage nach der Holzbewirtschaftung in einer nachhaltigen Regionalentwicklung. Dazu müssten unter anderem auch sozio-ökonomische Aspekte miteinbezogen werden.
2. XYLOIKOS kann eingesetzt werden zur Früherkennung von verschiedenen Phänomenen:
  - Früherkennung von Knappheiten oder Überschüssen
  - Früherkennung von Produktionsmengen der Wälder
  - Früherkennung von Holzverbräuchen in verschiedenen Branchen
  - Früherkennung von AltholzanfällenEs bildet damit eine Alternative zu herkömmlichen, sektoriellen Prognosemethoden und eignet sich daher als Planungsinstrument zur Entwicklung von Umbauszenarien für urbane Systeme. Es liefert insbesondere einen Beitrag zur Frage, welche Funktionen Wald und Holz künftig übernehmen können.
3. Der Aufbau von physiologischen Modellen wie XYLOIKOS erfordert ein tieferes Systemverständnis als andere Ansätze. Auf der anderen Seite können damit viele relevanten Grössen berechnet und die wichtigsten Einflussgrössen identifiziert werden. Damit können sie eingesetzt werden, um bei künftigen Messprogrammen Prioritäten zu setzen in Bezug auf die Frage, wo und wie genau gemessen werden muss.

## 5.2 Beitrag zur Methodenentwicklung

### 5.2.1 Forstwirtschaft

1. Der in XYLOIKOS verwendete Ansatz der flächenbezogenen Jahrgangsklassen erlaubt, Zuwachsveränderungen von Wäldern mittels den von den Forstbetrieben ohnehin erhobenen Daten (Vorrat und Nutzung) festzustellen. Er erlaubt, die Erkenntnisse aus der Bestandesmodellierung für regionale Problemstellungen anzuwenden. Damit lassen sich verschiedene Effekte wie der Bonitätsveränderung, des Umbaus der Altersklassen oder der Baumarten herausfiltern. Mit dem in den Waldwirtschaftsplänen verwendeten Entwicklungsstufenmodell und den in der Forstsektormodellierung teilweise verwendeten Altersklassenmodellen werden diese Effekte verwischt. Rückschlüsse auf Wachstumsveränderungen können mit diesen Modellen nur in sehr beschränktem Ausmass gemacht werden. Indem das Jahrgangsklassenmodell ermöglicht, die aus der Bestandesmodellierung gewonnenen Erkenntnisse auf regionaler Ebene einfließen zu lassen, hat es ein Potential, mit geringerem Daten- und damit Kostenaufwand betrieben zu werden als die herkömmlichen Entwicklungsstufenmodelle. Das Schwergewicht sollte auf der Erfassung von Bonitätsveränderungen gelegt werden, während die zugehörigen Zuwächse aus Waldentwicklungsmodellen berechnet werden können.
2. Die Messdaten aus den Waldwirtschaftsplänen der Region KSM deuten gemäss den Modellrechnungen mit XYLOIKOS darauf hin, dass seit den Vierzigerjahren eine kontinuierliche Erhöhung des Zuwachses um rund 60-70% stattgefunden hat. Eine Zuwachserhöhung könnte verschiedene Ursachen haben. Eine naheliegende Erklärung wäre der vermehrte Stickstoffeintrag. Die berechneten Zuwachserhöhungen stimmen zeitlich überein mit der Erhöhung der Stickoxidemissionen aus Verbrennungsprozessen, den Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft und der veränderten Reisigbewirtschaftung.
3. Die Oberhöhen von zwei Versuchsflächen in und unmittelbar neben der Untersuchungsregion zeigen keine signifikante Veränderung der Oberhöhe. Vorausgesetzt, dass sich der Zuwachs tatsächlich beschleunigt hat ohne Veränderung der Oberhöhe, hat sich gleichzeitig auch die Form der Bäume verändert. Die Oberhöhe als Mass für die Bonität eines Standortes müsste dann in Frage gestellt werden.

### 5.2.2 Holz-/Bauwirtschaft

1. XYLOIKOS ist das erste Modell, welches den künftigen Holzhaushalt für verschiedene Umbauszenarien des Gebäudeparkes berechnen kann. Da es Wald, Forstwirtschaft, Holzverarbeitung, Holzkonsum und Entsorgung miteinander verknüpft, wird die Holzverarbeitung als Durchgangsprozess zwischen den Holzlagern "Wald" und "Gebäudepark" verstanden, deren Entwicklung einen entscheidenden Einfluss auf die Holzverarbeitung hat. Durch den Ansatz der Jahrgangsklassen beim Gebäudepark lassen sich Aussagen über den künftigen Holzverbrauch anhand von Umbauszenarien für den Gebäudepark ableiten. Herkömmliche Ansätze für Holzverbrauchsprognosen (z.B. ökonomische Modelle) ignorieren die Dynamik des Gebäudeparkes.
2. In den vergangenen 100 Jahren haben sich verschiedene grosse Veränderungen in der Holzbewirtschaftung (Anstieg der Bonität, Wachstum des Gebäudeparkes, Veränderung der Holzdichte in Gebäuden, Papierproduktion) derart neutralisiert, dass in der Untersuchungsregion weder grössere Mangel- noch Überschussphasen auftraten. Der grosse Einfluss der Gebäudepark-Dynamik ist damit im 20. Jahrhundert (noch) nicht deutlich sichtbar geworden.
3. Der Holzverbrauch ist in grossem Mass davon abhängig, wie der Gebäudepark umgebaut wird. Mit einem Jahrgangsklassenmodell für den Gebäudebestand kann der Holzhaushalt als Bestandteil der gesamten Gebäudebewirtschaftung analog zum Wald beschrieben werden. In diese Struktur könnten ohne grösseren Aufwand weitere Baumaterialien integriert werden.
4. Im Vergleich zum Wald weist der Gebäudepark eine viel ausgeprägtere Dynamik auf. Die wichtigsten Einflussgrössen sind die Gebäudefläche und die Holzdichte der neuen Gebäude respektive der Anteil von Holz an den Baumaterialien. Wegen der grossen und relativ kurzfristigen Veränderungen dieser Grössen müssten die Jahrgangsklassen kleiner gewählt werden als beim Wald (20 Jahre), um eine ähnliche Genauigkeit zu erreichen. Eine Verfeinerung der Jahrgangsklassen kann aber nur dann greifen, wenn die Datenlage sowohl beim Endholzverbrauch als auch beim Gebäudepark stark verbessert wird.

### 5.2.3 Abfallwirtschaft

1. XYLOIKOS ist das erste Modell, welches den Altholzfluss für verschiedene Umbauszenarien des Gebäudeparkes berechnen kann. Die meisten heute verwendeten Ansätze ignorieren den Gebäudepark vollständig oder sind nicht in der Lage, seine Dynamik in verschiedenen Umbauszenarien langfristig zu erfassen. Weitere Baumaterialien könnten ohne grösseren Aufwand in das bestehende Modell eingebaut werden.

### 5.2.4 Umweltmanagement

1. Mit XYLOIKOS kann die Bewertung neuer Produkte in einen regionalen Kontext gestellt werden, wobei zum ersten mal die Dynamik des Waldes und des Gebäudeparkes berücksichtigt werden. Lebenszyklusanalysen (LCA) oder Ökobilanzen weisen keinen regionalen Bezug auf und gehen somit in der Regel von einem unbegrenzten Ressourcenkapital aus. Die Modellsimulation hat gezeigt, dass eine Umsetzung der aus Ökobilanzen gewonnenen Erkenntnisse im grossen Stil zu massiven Holzverknappungen führen würde. Aus Untersuchungen zur Optimierung von Einzelprodukten in einem gegebenen und unveränderlichen Kontext können daher nur sehr beschränkt Aussagen zu einer nachhaltigen Regionalentwicklung abgeleitet werden.
2. Im Gegensatz zu anderen Umweltmanagementmodellen ist XYLOIKOS beschränkt auf die Untersuchung der Trockensubstanz und der Energie. Damit lassen sich zwar einfach Aussagen zum Kohlenstoffhaushalt ableiten, weitere Indikatoren werden aber vernachlässigt. Diese könnten aber ohne weiteres in das bestehende Modell eingebaut werden.

### 5.3 Künftige Funktionen von Wald und Holz

1. Ein Umbau der Waldstandorte zugunsten der Schutz- und der Erholungsfunktion erzeugt während der Umbauphase eine erhöhte Nutzung, gefolgt von einer tieferen Nutzung, die allmählich wieder ansteigt. Die Region KSM besitzt einen grossen Spielraum zur Waldflächenanordnung, der heute nicht genutzt wird. Um Schwankungen in der Holzversorgung zu vermeiden, müsste sich die Geschwindigkeit einer grösseren Waldstandortveränderung dem Wachstum der Bäume anpassen (Grössenordnung 100 Jahre). Ob und in welchen Fällen ein Umbau des Waldes angezeigt ist, kann mit physiologischen Modellen allein hingegen nicht beurteilt werden.
2. Als Baumaterial kann das regionale Holz nicht mehr die gleiche Bedeutung erlangen wie noch vor 100 Jahren. Selbst kleine Veränderungen der Holzdicke in den neuen Gebäuden haben beträchtliche Auswirkungen auf den Holzmarkt und auf die Nachfrage nach Waldholz.
3. Die Rolle von Holz als Energieträger könnte hingegen stark verändert werden. Ein Szenario für einen regional solaren Gebäudebetrieb basiert auf einer Kombination von Sonnenkollektoren und Holz (Brenn- und Altholz) als Stützenergie im Winter. Eine entsprechende Modellsimulation ergibt, dass dazu die durchschnittliche Energiekennzahl Wärme von 600 auf etwa 130 MJ/m<sup>2</sup>\*a gesenkt werden müsste. Da dies mit Renovationen nicht zu erreichen ist, müssten dazu die heutigen Gebäude praktisch vollständig ersetzt werden. Ein schneller Umbau des Gebäudeparkes innerhalb von wenigen Jahrzehnten würde aber sehr grosse Schwankungen in den benötigten Bauholzmengen verursachen. Nur durch einen langsamen (Grössenordnung 100 Jahre) und zielgerichteten Umbau des Gebäudeparkes können Schwankungen der Bauholzmengen vermieden werden. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Bauholzmengen auch Indikatoren für die jeweiligen Branchen sind, gibt es vermutlich auch ein ökonomisches Interesse an einem langsamen Umbau. Dann bestünde auch ein politisches Interesse an Bauvorschriften, welche sich an langfristigen Zielvorgaben orientieren.

## 5.4 Vorschläge für eine Implementierung und Erweiterung des Modells

### 5.4.1 Forstwirtschaft

1. Der in den Waldwirtschaftsplänen verwendete Ansatz beruht auf der Erfassung von Entwicklungsstufen. Dieser Ansatz ist eher auf unmittelbare Fragen der Bewirtschaftung ausgerichtet. Erkenntnisse über das Bestandeswachstum werden dabei nur am Rande verwendet und gewonnen. Das in XYLOIKOS eingesetzte Jahrgangsklassenmodell ist dagegen ausgerichtet auf die Erfassung von Veränderungen, hat also eine andere Zielsetzung. Eine Implementierung des Jahrgangsklassenmodelles z.B. auf betrieblicher Ebene wäre mit geringem zusätzlichem Aufwand möglich, da die dazu verwendeten Daten bereits weitgehend erfasst werden. Zusätzlich zu erfassende Daten wären der Jahrgang der Bestände und eine Zuordnung der Nutzung auf die Jahrgangsklassen oder Bestände. Damit könnten die ohnehin erhobenen Daten dazu verwendet werden, Wachstumsveränderungen des Waldes, unter Umständen unterteilt nach verschiedenen Standorten, festzustellen. Es muss noch untersucht werden, inwiefern die Erkenntnisse aus der Bestandesmodellierung mit Hilfe eines Jahrgangsklassenmodelles zu einer Verminderung des Messaufwandes beitragen können.
2. Im Gegensatz zu Altersklassenmodellen oder Entwicklungsstufenmodellen könnten Jahrgangsklassenmodelle eleganter mit geografischen Informationssystemen verknüpft werden, da der Bezug der Bilanzvolumen zu den Flächen (Beständen) erhalten bleibt. Damit könnte auch vermehrtes Gewicht auf die Erfassung von lokalen Veränderungen der Bonität gelegt werden.
3. XYLOIKOS beschreibt das Wachstum von gleichaltrigen Fichtenreinbeständen. Angesichts der sich verändernden Bewirtschaftungskonzepte, welche stärker durchmischte und gestufte Bestände bevorzugen, wäre es hilfreich, differenziertere Wachstumsmodelle einzusetzen. Diese könnten ohne Schwierigkeiten in die bestehende Modellstruktur integriert werden. Bei komplexeren Wachstumsmodellen muss bei einer grösseren Anzahl von Jahrgangsklassen, welche unter Umständen nochmals unterteilt werden nach Baumarten und Bonitäten, berücksichtigt werden, dass der Rechenaufwand sehr stark zunimmt.

## 5. Schlussfolgerungen

4. Mit den schnellen Veränderungen in der Holzverarbeitungstechnologie verändert sich auch die Nachfrage nach verschiedenen Sortimenten. Auch eine Differenzierung von verschiedenen Holzsortimenten könnte ohne Probleme in die bestehende Modellstruktur eingebaut werden.
5. Viele Entscheidungen in der Waldbewirtschaftung werden in zunehmendem Masse von der Rentabilität abhängig gemacht. Eine Erweiterung von XYLOIKOS um ökonomische Parameter (z.B. Geldflüsse) wäre grundsätzlich möglich. Um einen Zeithorizont von der Grössenordnung einhundert Jahre betrachten zu können, wäre man jedoch mit komplexeren methodischen Fragen konfrontiert. Während Masse und Energie eines Produktes erhalten bleiben, kann sich sein Wert in einem anderen Kontext sehr stark verändern.

### 5.4.2 Holzwirtschaft und Altholzwirtschaft

1. Während die Produktion von Holz durch die öffentliche Hand klar geregelt ist, finden Verarbeitung und Konsum vorwiegend in privater Hand statt. Die Datenlage über Verarbeitung und Konsum ist entsprechend schwächer.
2. Der Anteil von Holz an den Baumaterialien liegt heute im Prozentbereich. Um Substitutionseffekte erfassen zu können, müssen neben dem Holz auch noch andere Baumaterialien berücksichtigt werden. XYLOIKOS ist mit seinem Jahrgangsklassenaufbau so konzipiert, dass andere Baumaterialien ohne grösseren Aufwand in die bestehende Struktur integriert werden können.
3. Für viele Fragestellungen des Holzhaushaltes ist eine Unterscheidung nach Holzarten, Sortimenten und Behandlungsart sehr wichtig. Eine entsprechende Erweiterung wäre vom Prinzip her ohne grösseren Schwierigkeiten möglich. Die Datenlage beim Endholzverbrauch müsste dazu bedeutend verbessert werden.
4. Raumplanerische Vorgaben (Zonenpläne und Bauvorschriften) haben zum Ziel, die bauliche Entwicklung zu lenken. Um herauszufinden, ob solche Vorgaben Auswirkungen auf den Holzhaushalt haben oder ob damit der Holzhaushalt gesteuert werden kann, muss der Bezug zwischen den Flächen mit unterschiedlichen Vorschriften und den Bilanzvolumen hergestellt werden. Es wäre zu untersuchen, ob der Einsatz von geografischen Informationssystemen dabei hilfreich wäre.

### 5.4.3 Fazit

1. Sowohl die Datenerfassung als auch die Entwicklung von Strategien zur Steuerung des Holzhaushaltes erfolgen heute sektoriell. Mit physiologischen Modellen können stoffliche und energetische Informationen aus verschiedenen Sektoren miteinander verknüpft werden.
2. Mit physiologischen Modellen kann der Aufwand zur Datenbeschaffung reduziert werden, indem
  - verschiedene heute erhobene Grössen auch berechnet werden können (z.B. Zuwachs der Wälder, Holzverbrauch, Altholzanzahl)
  - mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen und Parametervariationen Schlüsselgrössen und weniger wichtige Grössen unterschieden werden können
3. Physiologische Modelle der Holzbewirtschaftung können die Entwicklung von Strategien unterstützen, welche eine nachhaltige Steuerung des gesamten regionalen Holzhaushaltes anstreben.
4. Verfeinerungen von XYLOIKOS müssten mit Bezug auf das Gesamtsystem vor allem beim Gebäudepark und bei der Untersuchung der Ursache der Zuwachsveränderungen des Waldes vorgenommen werden. Erst wenn die Holzflüsse in den Gebäudepark besser bekannt sind, ist eine Verfeinerung bezüglich Baumarten und Bewirtschaftungsformen des Waldes angemessen.

# Literaturverzeichnis

- Adams D. M. (1974) "Forest product prices and national forest timber supply in the Douglas fir region." *Forest Science* **20**: 243-259.
- Adams D. M. und Haynes R. W. (1980) *The 1980 Softwood Timber Assessment Market Model: Structure, Projections, and Policy Simulations*, Forest Science.
- Adams D. M. (1985) "A spatial equilibrium model of African-European trade in tropical logs and sawnwood." *Forest Ecology and Management* **13**: 265-287.
- Adams D. M. und Haynes R.W. (1986) *Development of the Timber Assessment Market Model System for long-range Planning by the US Forest Service*. Proceedings of the 18<sup>th</sup> IUFRO World Congress, Ljubljana, Yugoslavia.
- Agren und Axelsson (1980) "PT - a Tree Growth Model." *Structure and Function of Northern Coniferous Forests - an Ecosystem Study*. T. Persson. *Ecol. Bull.* (Stockholm) **32**: 525-536.
- Amt für Bundesbauten (1995) "Nutzungszeiten von Gebäuden und Bauteilen." Amt für Bundesbauten, Bern.
- Assmann E. (1961) *Waldertragskunde - Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen*, BLV Verlagsgesellschaft München.
- Axelsson B. (1983a) *Ultimate forest productivity: What is possible?* IUFRO Symp.: Forest Site and Continuous Productivity, Portland, Oregon.
- Axelsson B. (1983b) *Methods for maintenance and improvement of forest productivity in Northwestern Europe*. IUFRO Symp.: Forest Site and Continuous Productivity, Portland, Oregon.
- Axelsson B. (1985) *Increasing forest productivity and value by manipulating nutrient availability*. Weyerhaeuser Science Symp.: Forest Potentials: Productivity and Value, Tacoma, WA, Weyerhaeuser Company.
- Baccini P. und Brunner P. H. (1991) *Metabolism of the Anthroposphere*. Springer, Berlin.
- Baccini P. und Bader H.-P. (1996) *Regionaler Stoffhaushalt - Erfassung, Bewertung, Steuerung*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

## Literaturverzeichnis

- Baccini P. (1998a) Persönliche Mitteilung.
- Baccini P. und Oswald F., Eds. (1998b) *Netzstadt. Transdisziplinäre Methoden zum Umbau urbaner Systeme*. vdf, Zürich.
- Bachmann P. (1996) "Forstliche Planung I/II. Vorlesungsmanuskript an der Abteilung für Forstwesen der ETH Zürich." Zürich.
- Backmann G. (1942) "Das Wachstum der Bäume." *Roux Archiv* **141**: 455-499.
- Bader H.-P. und Baccini P. (1992) Monitoring and control of regional material fluxes. *Soil Monitoring*. Monte Verità, Birkhäuser Verlag.
- Bader H. P. und Scheidegger R. (1996) "Exkurs über Stoffhaushalts-Simulationsprogramme (Anhang A1)." *Regionaler Stoffhaushalt - Erfassung, Bewertung und Steuerung*. P. Baccini und H. P. Bader. Springer, Heidelberg.
- Bader H.-P. (1998) Persönliche Mitteilung.
- Badoux (1968) *Ertragstafeln für die Fichte der Schweiz*, EAFV Birmensdorf.
- Belcher D. W., Holdaway M. R. und Brand G. J. (1982) "A description of STEMS: The Stand and Tree Evaluation and Modeling System". St. Paul, North Central Forest Experiment Station.
- Bernasconi A. (1996) "Von der Nachhaltigkeit zu nachhaltigen Systemen: Forstliche Planung als Grundlage nachhaltiger Waldbewirtschaftung". *Abteilung für Forstingenieurwesen*, ETH Zürich.
- BEW und SNK-WEK (1987) "Energiestatistik der Schweiz 1910-1985". Bundesamt für Energiewirtschaft und Schweizerisches Nationalkomitee der Weltenergiekonferenz, Bern.
- BfS (1992) "Die Bodennutzung der Schweiz. Arealstatistik 1979/85". Bundesamt für Statistik, Bern.
- BfS (1993a) "Eidgenössische Volkszählung 1990. Gebäude und Wohnungen." Bundesamt für Statistik, Bern.
- BfS (1993b) "Eidgenössische Volkszählung. Die Wohnbevölkerung der Gemeinden. Wohnbevölkerung 1970, 1980, 1990". Bundesamt für Statistik, Bern.
- BfS und BUWAL (1996) "Wald- und Holzwirtschaft der Schweiz. Jahrbuch 1995". Bundesamt für Statistik und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BfS (1997a) "Statistik des jährlichen Bevölkerungsstandes. Stand 31.12.1996." Persönliche Mitteilung.

## Literaturverzeichnis

- BfS (1997b) "Die Bodennutzung in den Kantonen. Solothurn, Basel-Stadt, Basel-Landschaft, Aargau. Gemeindeergebnisse 1979/85 und 1992/97". Bundesamt für Statistik, Bern.
- Binkley C.S. (1987) Economic Models of Timber Supply. *The Global Forest Sector: an Analytical Perspective*. M.Kallio, D.P. Dykstra and C.S. Binkley (Eds). John Wiley & Sons, New York.
- Bolliger M. (1992) "Papier und Umwelt - Eine Ökobilanz über Toilettenpapiere", Im Auftrag der Papierfabrik Horgen.
- Bossel H. (1994) *TREEDYN3 Forest Simulation Model - Mathematical Model, program documentation, and simulation results*. Göttingen.
- Bossel H. (1994) *Modellbildung und Simulation: Konzepte, Methoden und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme; Ein Lehr und Arbeitsbuch mit Simulationssoftware*. Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg.
- Brautzsch H.-U. (1985) *The Input-Output-Model of the GDR Forest Sector*. Input-Output-Modeling, Springer-Verlag, Warsaw.
- Brooks D. J. (1985) "Public policy and long-term timber supply in the South." *Forest Science* 31(2): 342-357.
- Brooks D., Baudin A. und Schwarzbauer P. (1995) "Modeling forest products demand, supply and trade". United Nations, New York.
- Bukowiecki A., Labhardt A. und Stampanoni, J. (1994) "Ressourcenwirtschaft in einer Sonnenstadt. Am Beispiel einer Gebäudesanierung im Schweizerischen Mittelland". *Professur für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik*, ETH Zürich.
- Buongiorno J. und J.K. G. (1987) *Forest management and economics - A Primer in Quantitative Methods.*, Macmillan Publishing Company, New York.
- Buongiorno J. (1990) "Analyse économétrique du secteur forestier: un bilan de l'expérience américaine." *Cahiers d'économie et sociologie rurales* 15-16: 145-166.
- Buongiorno J., Harou P., Omoluabi A. C. und Ogundare L. (1994) "Timber demand and supply in Nigeria: Models and forecasts to 2010." *Journal of World Forest Resource Management* 7: 101-127.
- Buongiorno J. (1996) "Forest sector modelling: a synthesis of econometrics, mathematical programming, and system dynamics methods." *Journal of Forecasting* 12: 329-343.

## Literaturverzeichnis

- BUWAL (1995) "Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900-2010". Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Carbonnier C. (1957) "Ett gallringsförsök i planterad gransgök." *Svenska skogsvarvsföreningens tidskr* **55**: 463-476.
- Carlowitz H.C. von (1713) *Sylvicultura Oeconomica*. Oder hauswirthliche Nachricht und naturgemässe Anweisung zur wilden Baum-Zucht etc. Leipzig.
- Clawson M. und Sedjo R. (1983) *History of Sustained Yield Concept and its Application to Developing Countries*. History of sustained-yield forestry: A symposium, Western Forestry Center, Forest History Society, Portland, Oregon.
- Cotta H. (1804) *Systematische Anleitung zur Taxation der Waldungen*. 2 Abtln., Berlin.
- Cotta H. (1820) *Anweisung zur Forst-Einrichtung und Abschätzung*. 1. Tl. Dresden Arnoldsche Buchhandlung, Dresden.
- Curry G. L., Deuermeyer B. L. und Feldman R. M. (1989) *Discrete Simulation*., Holden-Day, Oakland.
- Dantzig G.B. und Thapa M.W. (1997) *Linear Programming*. Springer New York.
- Dendroplan (1990) "Altholzkonzept Kanton Zürich". Bülach, AGW und ATAL des Kantons Zürich.
- Dixon K.R., Luxmoore R.J. und Begovich C.L. (1978) "CERES - a Model for Forest Stand Biomass Dynamics for Predicting Trace Contaminant Nutrient in Water Effects. I. model description." *Ecol. Modelling* **5**:17-38.
- Duden (1990) *Duden Fremdwörterbuch*. Dudenverlag, Zürich.
- Dykstra D. P. (1984) *Mathematical Programming for Natural Resource Management*. McGraw-Hill, New York.
- Ek A.R. und Monserud R.A. (1974) Trials with Program FOREST: Growth and Reproduction Simulation in Mixed Species Forest Stands. *Growth Models for Tree and Stand Simulation*. J. Fries (Ed.) Royal College of Forestry, Stockholm. Research Notes **30**: 56-73.
- Ellenberg H. (1990) *Bauernhaus und Landschaft: in ökologischer und historischer Sicht*. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Erteld W. und Hengst E. (1966) *Waldertragslehre*. Radebeul 1, Neumann Verlag.

### Literaturverzeichnis

- ESA (1953) "Arealstatistik der Schweiz 1952". Eidgenössisches Statistisches Amt, Bern.
- ESA (1967) "Bodenbenützung - Utilisation du Sol 1965. Eidgenössische Betriebszählung September 1965. Landwirtschaft. Band 2". Eidgenössisches Statistisches Amt, Bern.
- ESA (1971) "Eidgenössische Volkszählung 1970. Wohnbevölkerung der Gemeinden 1850-1970", Eidgenössisches Statistisches Amt, Bern.
- ESA (1972) "Arealstatistik der Schweiz 1972". Bern, Eidgenössisches Statistisches Amt, Bern.
- ESA (1974) "Eidgenössische Volkszählung 1970. Gebäude und Wohnungen". Eidgenössisches Statistisches Amt, Bern.
- ESB (1912) "Schweizerische Arealstatistik. Abgeschlossen auf 1. Juli 1912". Eidg. Statistisches Bureau, Bern.
- ESB (1925) "II. Arealstatistik der Schweiz 1923/24". Eidgenössisches Statistisches Bureau, Bern.
- FAO (1995) "Forest Resources Assessment 1990 - Global Synthesis." FAO Forestry Paper 124, Rome.
- Forrester J. W. (1961) "Study notes in System Dynamics". The MIT Press, Cambridge.
- Forrester J. W. (1980) "Information sources for modeling the national economy." *Journal of the American Statistical Association. Application Section* 75(371): 555-566.
- Gabathuler C. und Wüest H. (1984) "Bauliche Ressourcen und ihre Benützung, Lagebeurteilung und mögliche Veränderungspotentiale, ETH Forschungsbericht MANTO, Zwischenbericht 2, Spezialstudie 2.23". Zürich.
- Geiger P. (1995) "Holz im Gebäude - Bestimmung und Quantifizierung von Bauelementen aus Holz in Gebäuden". *Lehrstuhl für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik*, ETH Zürich.
- Gilles J. K. und Buongiorno J. (1987) *PAPYRUS: A model of the North American Pulp and Paper Industry*, Society of American Foresters.
- Gordon J. C. (1982) *Productivity of Washington's forests: Improving forest productivity*. Forest Productivity in Washington State, College of Forest Resources, Univ. Wash., Seattle.

## Literaturverzeichnis

- Gordon J. C., Farnum P. und Timmis R. (1982) *Theoretical maximum phytomass yields as guides for yield improvement*. 7th N. Amer. For. Biol. Workshop, Lexington, Kentucky.
- Hagen C. (1960) "Die Entwicklung der forstlichen Zustandserfassung in einigen Waldgebieten der Ostschweiz und ihre Beziehung zur allgemeinen Entwicklung: Ein Beitrag zur Geschichte der Forsteinrichtung und Waldwert-schätzung." *Abteilung für Forstingenieurwesen der ETH Zürich, Zürich*.
- Hari P., Kaipainen L., Korpilähti E., Mäkelä A., Nilson T., Oker-Blom P., Ross J. und Salminen R. (1985) "Structure Radiation and Photosynthetic Production in Coniferous Stands". *Dep. of Silviculture, Research Note No. 54*. University of Helsinki.
- Hartig G. L. (1795) *Anweisung zur Taxation und Beschreibung der Forste, oder zur Bestimmung des Holztrags der Wälder*. Giessen.
- Hartig G. L. (1808) *Anweisung zur Holzzucht für Förster*. Marburg.
- Haynes R. W. (1975) "A dynamic, spatial equilibrium model of the softwood timber economy with demand equations specified". Raleigh, North Carolina State University.
- Hänggli T. (1997) Persönliche Mitteilung
- Heijungs (1997) "Economic Drama and the Environmental Stage. Formal derivation of algorithmic tools for environmental analysis and decision-support from a unified epistemological principle." *Universiteit Leiden*.
- Heinimann H.-R. (1998) Persönliche Mitteilung.
- Hofstad O. (1990) "A simple model of wood supply and clearing of African woodlands with special reference to Tanzania." *Journal of World Forest Resource Management* 5: 47-57.
- Hundeshagen J.Ch. (1826) *Die Forstabschätzung auf neuen wissenschaftlichen Grundlagen, nebst einer Charakteristik und Vergleichung aller bisher bestandenen Forsttaxationsmethoden*. Tübingen, Lauppische Buchhdlg., 2 Abtlgn.
- IUCN, UNEP und WWF (1980) *World Conservation Strategy - Living Resource Conservation for Sustainable Development*.
- Jaeger J. (1999) "Gefährdungsanalyse der anthropogenen Landschaftszerschneidung." *Abteilung für Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich, Zürich*.

## Literaturverzeichnis

- Jaissle S. M. (1994) *Der dynamische Waldbegriff und die Raumplanung: Eine Darstellung der Waldgesetzgebung unter raumplanungsrechtlichen Aspekten*. Schulthess Polygraphischer Verlag AG, Zürich.
- Kallio M., Propoi A. und Seppälä R. (1986a) A model for the forest sector. *Systems analysis in forestry and forest industries*. M. Kallio, A. E. Andersson, R. Seppälä and A. Morgan. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Kallio M., Andersson A. E., Seppälä R. und Morgan A., Eds. (1986b) *Systems Analysis in forestry and forest industries*. TIMS Studies in the management sciences. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Kallio M., Dykstra D. P. und Binkley C. S., Eds. (1987) *The Global Forest Sector: An Analytical Perspective*. Wiley, New York.
- Keller W. (1978) "Ertragskundlicher Bonitätsschlüssel", EAFV Birmensdorf.
- Kellomäki S., Väisänen H., Hänninen H., Kolström T., Lauhanen R., Mattila U. und Payari B. (1992): *SIMA: A Model for Forest Succession based on the Carbon and Nitrogen Cycles with Application to Silvicultural Management of the Forest Ecosystem*. Silva Carelica: 22.
- Kimmins J. P. (1990) "Modelling the Sustainability of Forest Production and Yield for a Changing and Uncertain Future." *The Forestry Chronicle* 66(3): 271-280.
- Kimmins J. P. (1995) "Sustainable development in Canadian forestry in the face of changing paradigms." *The Forestry Chronicle* 71(1): 33-40.
- Knechtle N. (1997) "Materialprofile von Holzertesystemen - Analyse ausgewählter Beispiele als Grundlage für ein forsttechnisches Ökoinventar". *Professur für Forstliches Ingenieurwesen*, ETH Zürich.
- Kramer H. (1985) *Begriffe der Forsteinrichtung*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Kramer H., Gussone H.-A. und R. S. (1988) *Waldwachstumslehre - Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit*. Paul Parey, Hamburg.
- Kroth W., Kollert W. und Filippi M. (1991) *Analyse und Quantifizierung der Holzverwendung im Bauwesen*. IRB Verlag, Stuttgart.
- Künniger T. und Richter K. (1998): "Ökologische Bewertung von Eisenbahnschwellen in der Schweiz." EMPA Dübendorf.

## Literaturverzeichnis

- Kurth A., Schmid P., Zeltner J., Neher E. und Leimbacher W. (1965) "Grundlagenplan für die Waldungen der Region Gäu." EAFV Birmensdorf.
- Kurth H., Gerold D. und Ulbricht R. (1994) *Forsteinrichtung - Nachhaltige Regelung des Waldes*. DLV, Berlin.
- Laubrug (1997) "Persönliche Mitteilung über Homoplax (Fideris)".
- Lemm R. (1991) "Ein dynamisches Forstbetriebs-Simulationsmodell - Prognosen von betriebsspezifischen Waldentwicklungen, Waldschäden und deren monetäre Bewertung unter variablen Einflussgrößen". *Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum*, ETH Zürich.
- Lönnstedt L. und Randers J., Eds. (1979) *Wood resource dynamics in the Scandinavian forest sector*. Studia Forestalia Suecica No. 152. The Swedish University of Agric. Sciences, College of Forestry, Uppsala.
- Lönnstedt L. (1986) A dynamic simulation model for the forest sector with an illustration for Sweden. *Systems analysis in forestry and forest industries*. M. Kallio, A. E. Andersson, R. Seppälä and A. Morgan., Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Lönnstedt L. und Peyron J. L. (1989) "FIBRE: a French PC-based regional forest sector model applied to Burgundy." *Annales des Sciences Forestières* **46**: 101-118.
- Lüthi T. (1995) "Holz in Gebäuden - Untersuchung des Holzgehaltes in Abbruchgebäuden und Entwicklung einer Methode zur Beschreibung des Holzlagers in Gebäuden". *Lehrstuhl für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik*. ETH Zürich.
- Mantel K. und Schneider A. (1967) *Holzverwendung in der Bauwirtschaft*. Bayrischer Landwirtschaftsverlag, München.
- Mäkelä A. und Hari P. (1986) "Stand Growth Model based on Carbon Uptake and Allocation in Individual Trees." *Ecol. Modelling* **33**: 205-229.
- Mc Killop W. M. (1967) "Supply and demand for forest products: an econometric study." *Hilgardia* **38**(1): 1-32.
- Mc Murtrie R. und Wolf L. (1983) "Above- and below-ground growth of forest stands: a carbon budget model." *Ann Bot.* **52**: 437-448.
- Meadows D. H. und Meadows D. (1992) *Die neuen Grenzen des Wachstums*. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.

## Literaturverzeichnis

- Meister U. (1903) *Die Stadtwaldungen von Zürich*. Albert Müller's Verlag, Zürich.
- Meteotest (1995) "Meteonorm - Verzeichnis der Globalstrahlung und der Temperatur für die Gemeinden der Schweiz", Im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Bern.
- Mitscherlich G. (1970) *Wald Wachstum und Umwelt - Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums - 1. Band: Form und Wachstum von Baum und Bestand*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Mittelstrass J. (1989) *Der Flug der Eule - Von der Vernunft der Wissenschaft und der Aufgabe der Philosophie*. Suhrkamp, Frankfurt a. M.
- Mohren G.M.J. (1987) "Simulation of forest growth, applied to Douglas fir stands in the Netherlands". *Agricultural University*, Wageningen.
- Montangero A., Bonnet C. und Genini A. (1997) "Betriebliches Umweltmanagement am Beispiel der Perlen Papier AG". *Professur für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik*. ETH, Zürich.
- Müller D. B., Oehler D. und Baccini P. (1995) *Regionale Bewirtschaftung von Biomasse - Eine stoffliche und energetische Beurteilung der Nutzung von Agrarflächen mit Energiepflanzen*. VdF, Zürich.
- Müller D. B., Perrochet S., Faist M. und Jaeger J. (1998) Ernähren und Erholen mit knapper werdender Landschaft. *Netzstadt - Transdisziplinäre Methoden für den Umbau urbaner Systeme - Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt SYNOIKOS*. P. Baccini and F. Oswald. VdF, Zürich.
- Newman D. H. (1987) "An econometric analysis of the Southern softwood stumpage market." *Forest Science* 33(4): 932-945.
- Obiya A., Chappelle D. E. und Schallau C. H. (1986) "Spatial and regional analysis methods in forestry economics: an annotated bibliography". USDA For. Serv. Gen Tech. Rep. PNW-190, Portland.
- Odum E. P. (1991) *Prinzipien der Ökologie - Lebensräume, Stoffkreisläufe, Wachstumsgrenzen*. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg.
- Pfeiffer K. R. (1993) *Schweizerischer Forstkalender 1994*. Huber Verlag, Frauenfeld.
- Planconsult (1993) "Studie über den Endverbrauch des Holzes in der Schweiz im Jahre 1991". Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

## Literaturverzeichnis

- Planconsult (1998) "Endverbrauch des Holzes in der Schweiz 1996". Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Pretzsch H. (1992) *Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände*. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt.
- Pretzsch H. (1993) *Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen - Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN*. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- Pretzsch H. (1995) "Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung - Prospects of a Model Oriented Forest Yield Science." *Forstw. Cbl* **114**: 188-209.
- Pringle S. L. (1954) "An econometric analysis of the demand for newsprint in the United States", Syracuse University.
- Randers J. and Lönnstedt L. (1979) "Transition Strategies for the Forest Sector." *Futures* **11**(3): 195-205.
- Redle M. und Baccini P. (1998) "Metabolische Modelle für den Umbau urbaner Siedlungen am Beispiel der Wohngebäude." *GALA*, **7**(3): 184-196.
- Redle M. (1999) "Kies- und Energiehaushalt urbaner Systeme in Abhängigkeit der Siedlungsentwicklung". *Professur für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik*. ETH, Zürich.
- Rentz O., Ruch M. und Nicolai M. (1994) *Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden: dargestellt am Beispiel des Hotel Post in Dobel, Landkreis Calw*. Ecomed Verlagsgesellschaft AG & Co. KG, Landsberg.
- Ressel J. (1986) "Energieanalyse der Holzindustrie der Bundesrepublik Deutschland". Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes, Hamburg.
- Richter K. und Sell J. (1992) "Ökobilanzen von Baustoffen und Bauprodukten aus Holz: Zusammenfassung erster Erkenntnisse". EMPA, Dübendorf.
- Rykiel E. J. (1996) "Testing ecological models: the meaning of validation." *Ecological Modelling* **90**: 229-244.
- Sargent R. G. (1984) *A tutorial on verification and validation of simulation models*. 1984 Winter Simulation Conference, IEEE 84CH2098-2.

## Literaturverzeichnis

- Schletter A. (1954) "Betrachtung zur Weck'schen Methode der Wachstumsdiagnose." *Archiv für Forstwesen* 3: 193-205.
- Schmidheiny S. (1992) *Kurswechsel - Globale unternehmerische Perspektiven für Entwicklung und Umwelt*. Business Council for Sustainable Development. Artemis und Winkler.
- Schwarzbauer P. (1992) *Potential impacts of forest decline on the Austrian forest product market - an analysis using a forest sector simulation model*. Forest Sector, Trade and Environmental Impact Models: Theory and Applications, University of Washington, Seattle.
- Sharma N.P. Ed. (1992) *Managing the World's Forests. Looking For Balance Between Conservation and Development*. Kendall/Hunt, Iowa.
- Sievänen R. (1992) "Construction and identification of models for tree and stand growth". *Automation Technology Laboratory*. Helsinki, Helsinki University of Technology: 52.
- Siitonen M. (1983) "A long term forestry planning system based on data from the Finnish National Forest Inventory." *Forest Inventory for Improved Management*. K. Kuusela and A. Nyssönen (Eds.). Dep. of Forest Mensuration and Management, Univ. of Helsinki. Research Note 17: 195-207.
- Sohlberg B. (1986) "Forest Sector Simulation Models as Methodological Tools in Forest Policy Analysis." 18<sup>th</sup> IUFRO World Congress, Ljubljana, Yugoslavia.
- Spiecker H., Mielikäinen K., Köhl M. und Skovsgaard J.P., Eds. (1996): *Growth Trends in European Forests, Studies from 12 Countries*. European Forest Institute Research Report No. 5. Springer, Berlin.
- Stahel R., Schuler B. und Ledergerber E. (1991) *Altholz - Eine vernachlässigte Ressource*, Rüegger Verlag.
- Steinlin H. (1988) "Weltforst- und Holzwirtschaft - Überblick und Regionalstellungen zur Weltforstwirtschaft." Vorlesungsmanuskript. *Institut für Wald- und Holzforschung*, Universität Freiburg im Brsg.
- Steinlin H. (1997) *Von der forstlichen Nachhaltigkeit des 19. Jahrhunderts zum Sustainable Development des 21. Jahrhunderts*, Vortragsmanuskript, Uni / ETH Zürich.
- Steinlin H. (1998) Persönliche Mitteilung.
- Thomasius H. (1962) "Methodische Untersuchungen über die Möglichkeit einer

### Literaturverzeichnis

- quantitativen Standortbeurteilung mit Hilfe von Wachstumsfunktionen".  
Tharandt.
- Thomasius H. (1964) "Allgemeine Betrachtungen über Wachstumskurven und Wachstumsfunktionen." *Wiss. Z. TU Dresden* **13**: 715-722.
- Thomasius H. (1965) "Kritik der Wachstumsfunktionen von G. Backmann." *Wiss. Z. TU Dresden* **14**: 1019-1031.
- Ulrich H. (1984) "Materialfluss für eine regionale Wald- und Holzwirtschaft." *Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen* **135**(9): 763-783.
- Valentine H.T. (1990) "A carbon balance model of tree growth with a pipe-model framework." *Process modelling of forest growth responses to environmental stress*. R.K. Dixon, R.J. Meldahl, G.A. Ruark and W.G. Warren (Eds.). Timber Press, Portland, Oregon.
- Vock W. (1997a) "Spezielle Energetische Holznutzungen: Anlagen für erneuerbare Abfälle. Statistik 1990-1996 und Fortschreibung. Teilstatistik der Holzenergiestatistik und Statistik der erneuerbaren Energien". Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern.
- Vock W. (1997b) Persönliche Mitteilung.
- WCED (1987) *Unsere gemeinsame Zukunft (Brundtland-Bericht)*. Greven, Eggenkamp.
- Weiss R. (1959) *Häuser und Landschaften der Schweiz*. Erlenbach-Zürich, Eugen Rentsch Verlag, Stuttgart.
- Wenk G., Antanaitis V. und Smelko S. (1990) *Waldetragslehre*. Berlin, DLV.
- Wensel L.C., Daugherty P.J. and Meerschaert W.J. (1986) "CACTOS user's guide: The California conifer timber output simulator." *Agricultural Experiment Station, Bulletin* 1920. Univ. of California, Berkeley.
- West P.W. (1987) "A model for biomass growth of individual trees in forest monoculture". *Ann. Bot.* **60**: 571-571.
- Wick B. (1983) *Energiekennzahlen der häufigsten Gebäudetypen*. Sages, Zürich.
- Wick B. (1991) "Energiekennzahlen. Neue Erkenntnisse über die Kennzahlen." *SLA* **38**: 893-896.
- Winkler C. (1997) "Ökoinventare von Holzertesystemen - Vorstudie", Professur für Forstliches Ingenieurwesen, ETH Zürich.
- Winter C. J. (1993) *Die Energie der Zukunft heisst Sonnenenergie*. Droemer

## Literaturverzeichnis

Knaur, München.

Wüest und Gabathuler (1989) "Bauwerk Schweiz: Grundlagen und Perspektiven zum Baumarkt der 90er Jahre." Zürich.

Wüest und Partner (1995) "Kantonale Abfallplanung: Perspektive Bauabfälle - Teilbericht Hochbau", Baudepartement des Kantons Aargau

Wykoff W.R., Crookston N.R. and Stage A.R. (1982) "User's guide to the stand prognosis model." U.S. For. Serv. Gen. Tech. Rep. No. INT-133.

Zeide B. (1993) "Analysis of Growth Equations." *Forest Science* **39**(3): 594-616.

Zingg A. (1998) "Untersuchung zur Oberhöhenentwicklung auf den Versuchsfeldern Neuendorf und Vorderwald", WSL Birmensdorf.

ZPK (1995) "Jahresbericht". Zürich.

Zürcher U. (1965) "Die Idee der Nachhaltigkeit unter spezieller Berücksichtigung der Gesichtspunkte der Forsteinrichtung". *Abteilung für Forstingenieurwesen*. ETH Zürich. Separatdruck Mitt. EAFV, 41/4. Zürich.

# **Anhang A: Mathematische Beschreibung von XYLOIKOS**

<b>A1 System .....</b>	<b>A-2</b>
<b>A2 Systemvariablen und Unbekannte .....</b>	<b>A-3</b>
<b>A3 Systemgleichungen.....</b>	<b>A-4</b>
A3.1 Intrinsische Beziehungen.....	A-4
A3.2 Bilanzgleichungen .....	A-5
A3.3 Modellansatz.....	A-6
<b>A4 Anfangsgleichungen.....</b>	<b>A-8</b>
A4.1 Anfangsbedingungen .....	A-8
A4.2 Bilanzgleichungen .....	A-8
A4.3 Modellansätze .....	A-8
<b>A5 XYLOIKOS-Parameter .....</b>	<b>A-9</b>
<b>A6 Kenngrößen .....</b>	<b>A-10</b>

## A1 System

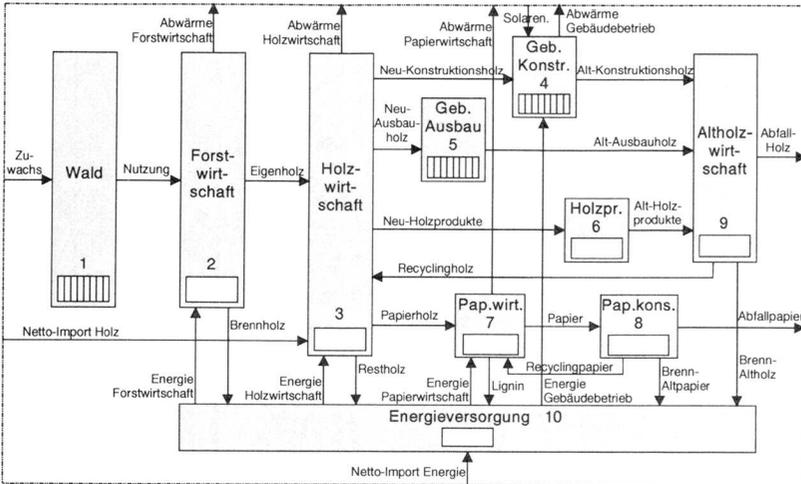


Abb. A.1: System von XYLOIKOS

### Bemerkungen:

- Wald, Forstwirtschaft, Konsum, Altholzwirtschaft in Region.
- Holzwirtschaft, Energieversorgung: beinhalten alle vorgelagerten Prozesse zur Versorgung der Region, können auch ausserhalb der Region liegen.

### Bezeichnung der Systemvariablen:

- Lager werden mit "M" bezeichnet und tragen als Index die Prozessnummer. Bsp.: Holzlager in den Beständen der Altersklasse 1:  $M^{(1,1)}(t)$ .
- Die Inputflüsse werden mit "I" bezeichnet und tragen als Index die Prozessnummer, in die sie münden. Bsp.: Netto-Importholz:  $I_3(t)$ .
- Die Outputflüsse werden mit "O" bezeichnet und tragen als Index die Prozessnummer, aus der sie entspringen. Bsp.: Abfallholz:  $O_9(t)$ .
- Innere Flüsse werden mit "A" bezeichnet und tragen als Index die Herkunfts- und die Zielprozessnummer. Bsp.: Papierholz:  $A_{3-7}(t)$ .

## A2 Systemvariablen und Unbekannte

$n_W$ : Anz. Jahrgangsklassen Wald                       $n_G$ : Anz. Jahrgangsklassen Gebäude  
 $I_x(t)$ : Input in Prozess x                               $O_x(t)$ : Output aus Prozess x  
 $A_{xy}(t)$ : Fluss von Prozess x zu Prozess y       $M^{(x)}(t)$ : Lagerbestand in Prozess x

### Systemvariablen

	Anz. Variablen
<b>Lagerbestände in den Prozessen:</b>	
$M^{(1,1)}(t), \dots, M^{(1,n_W)}(t)$	$n_W$
$M^{(4,1)}(t), \dots, M^{(4,n_G)}(t)$	$n_G$
$M^{(5,1)}(t), \dots, M^{(5,n_G)}(t)$	$n_G$
$M^{(2)}(t), M^{(3)}(t), M^{(6)}(t), M^{(7)}(t), M^{(8)}(t), M^{(9)}(t), M^{(10)}(t)$	7
<b>Inputflüsse:</b>	
$I_{1,1}(t), \dots, I_{1,n_W}(t)$	$n_W$
$I_{4,1}(t), \dots, I_{4,n_G}(t)$	$n_G$
$I_3(t), I_{10}(t)$	2
<b>Outputflüsse:</b>	
$O_{4,1}(t), \dots, O_{4,n_G}(t)$	$n_G$
$O_2(t), O_3(t), O_7(t), O_8(t), O_9(t)$	5
<b>Innere Flüsse:</b>	
$A_{1,1-2}(t), \dots, A_{1,n_W-2}(t)$	$n_W$
$A_{3-4,1}(t), \dots, A_{3-4,n_G}(t)$	$n_G$
$A_{3-5,1}(t), \dots, A_{3-5,n_G}(t)$	$n_G$
$A_{4,1-9}(t), \dots, A_{4,n_G-9}(t)$	$n_G$
$A_{5,1-9}(t), \dots, A_{5,n_G-9}(t)$	$n_G$
$A_{10-4,1}(t), \dots, A_{10-4,n_G}(t)$	$n_G$
$A_{2-3}(t), A_{2-10}(t), A_{3-6}(t), A_{3-7}(t), A_{3-10}(t), A_{6-9}(t),$ $A_{7-8}(t), A_{7-10}(t), A_{8-7}(t), A_{8-10}(t), A_{9-3}(t), A_{9-10}(t),$ $A_{10-2}(t), A_{10-3}(t), A_{10-7}(t)$	15

## Unbekannte

		Anz. Unbekannte
Lager:	$M^{(1,1)}(t), \dots, M^{(10)}(t)$	$7 + n_W + 2n_G$
Lagerveränderungen:	$\dot{M}^{(1,1)}(t), \dots, \dot{M}^{(10)}(t)$	$7 + n_W + 2n_G$
Flüsse:	$I_{1,1}(t), \dots, A_{10-7}(t)$	$22 + 2n_W + 7n_G$
<b>Total Unbekannte:</b>		<b><math>36 + 4n_W + 11n_G</math></b>

## A3 Systemgleichungen

- Parameter in Grossbuchstaben: Werte pro Region (z.B. FGn, FWn)  
Parameter in Kleinbuchstaben: Werte pro Einwohner (z.B. fgn, fwn)
- Für die folgende Beschreibung wird die gesamte Region als Bezugsgrösse gewählt.
- Wo  $n_W$  bzw.  $n_G$  analoge Gleichungen auftreten, werden im folgenden nur die  $n_W$ -ten bzw.  $n_G$ -ten Gleichungen aufgeführt.

### A3.1 Intrinsische Beziehungen

$$F_{n_W} = M^{(1,n_W)}(t) - M^{(1,n_W)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(1,n_W)}(t') dt' = 0$$

$$F_{1+n_W} = M^{(2)}(t) - M^{(2)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(2)}(t') dt' = 0$$

$$F_{2+n_W} = M^{(3)}(t) - M^{(3)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(3)}(t') dt' = 0$$

$$F_{2+n_W+n_G} = M^{(4,n_G)}(t) - M^{(4,n_G)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(4,n_G)}(t') dt' = 0$$

$$F_{2+n_W+2n_G} = M^{(5,n_G)}(t) - M^{(5,n_G)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(5,n_G)}(t') dt' = 0$$

$$F_{3+n_W+2n_G} = M^{(6)}(t) - M^{(6)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(6)}(t') dt' = 0$$

$$F_{4+n_W+2n_G} = M^{(7)}(t) - M^{(7)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(7)}(t') dt' = 0$$

$$F_{5+n_W+2n_G} = M^{(8)}(t) - M^{(8)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(8)}(t') dt' = 0$$

$$F_{6+n_W+2n_G} = M^{(9)}(t) - M^{(9)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(9)}(t') dt' = 0$$

$$F_{7+n_W+2n_G} = M^{(10)}(t) - M^{(10)}(t_0) - \int_{t_0}^t \dot{M}^{(10)}(t') dt' = 0$$

### A3.2 Bilanzgleichungen

#### Holz-Bilanzen

$$F_{7+2n_W+2n_G} = \dot{M}^{(1,n_W)}(t) - I_{1,n_W}(t) + A_{1,n_W-2}(t) = 0$$

$$F_{8+2n_W+2n_G} = \dot{M}^{(2)}(t) - \sum_{n=1}^{n_W} A_{1,n-2}(t) - A_{10-2}(t) + A_{2-3}(t) + A_{2-10}(t) + O_2(t) = 0$$

$$F_{9+2n_W+2n_G} = \dot{M}^{(3)}(t) - I_3(t) - A_{2-3}(t) - A_{9-3}(t) - A_{10-3}(t) + \sum_{n=1}^{n_G} A_{3-4,n}(t)$$

$$+ \sum_{n=1}^{n_G} A_{3-5,n}(t) + A_{3-6}(t) + A_{3-7}(t) + A_{3-10}(t) + O_3(t) = 0$$

$$F_{9+2n_W+3n_G} = \dot{M}^{(4,n_G)}(t) - I_{4,n_G}(t) - A_{3-4,n_G}(t) - A_{10-4,n_G}(t) + A_{4,n_G-9}(t) + O_{4,n_G}(t) = 0$$

$$F_{9+2n_W+4n_G} = \dot{M}^{(5,n_{Geb})}(t) - A_{3-5,n_G}(t) + A_{5,n_G-9}(t) = 0$$

$$F_{10+2n_W+4n_G} = \dot{M}^{(6)}(t) - A_{3-6}(t) + A_{6-9}(t) = 0$$

$$F_{11+2n_W+4n_G} = \dot{M}^{(7)}(t) - A_{3-7}(t) - A_{8-7}(t) - A_{10-7}(t) + A_{7-8}(t) + O_7(t) = 0$$

$$F_{12+2n_W+4n_G} = \dot{M}^{(8)}(t) - A_{7-8}(t) + A_{8-7}(t) + A_{8-10}(t) + O_8(t) = 0$$

$$F_{13+2n_W+4n_G} = \dot{M}^{(9)}(t) - \sum_{n=1}^{n_G} A_{4,n-9}(t) - \sum_{n=1}^{n_G} A_{5,n-9}(t) - A_{6-9}(t) + A_{9-3}(t) + A_{9-10}(t) + O_9(t) = 0$$

$$\begin{aligned}
 F_{14+2n_W+4n_G} &= \dot{M}^{(10)}(t) - I_{10}(t) - A_{2-10}(t) - A_{3-10}(t) - A_{7-10}(t) - A_{8-10}(t) \\
 &\quad - A_{9-10}(t) + A_{10-2}(t) + A_{10-3}(t) + \sum_{n=1}^{n_G} A_{10-4,n}(t) \\
 &\quad + A_{10-7}(t) = 0
 \end{aligned}$$

### Energie-Bilanzen

$$\begin{aligned}
 F_{15+2n_W+4n_G} &= O_2(t) - A_{10-2}(t) = 0 \\
 F_{16+2n_W+4n_G} &= O_3(t) - A_{10-3}(t) = 0 \\
 F_{16+2n_W+5n_G} &= O_{4,n_G}(t) - A_{10-4,n_G}(t) - I_{4,1}(t) = 0 \\
 F_{17+2n_W+5n_G} &= O_7(t) - A_{10-7}(t) - I_{4,n_G}(t) = 0
 \end{aligned}$$

### A3.3 Modellansatz

#### Vorgegebene Lagerveränderungen

$$\begin{aligned}
 F_{18+2n_W+5n_G} &= \dot{M}^{(2)}(t) = 0 \\
 F_{19+2n_W+5n_G} &= \dot{M}^{(3)}(t) = 0 \\
 F_{19+2n_W+6n_G} &= \dot{M}^{(4,n_G)}(t) - \dot{F}Gn_G(t) * mkn_G = 0 \\
 F_{19+2n_W+7n_G} &= \dot{M}^{(5,n_G)}(t) - \dot{F}Gn_G(t) * man_G = 0 \\
 F_{20+2n_W+6n_G} &= \dot{M}^{(7)}(t) = 0 \\
 F_{21+2n_W+7n_G} &= \dot{M}^{(8)}(t) = 0 \\
 F_{22+2n_W+7n_G} &= \dot{M}^{(9)}(t) = 0 \\
 F_{23+2n_W+7n_G} &= \dot{M}^{(10)}(t) = 0
 \end{aligned}$$

#### Wald und Forstwirtschaft

$$\begin{aligned}
 F_{23+3n_W+7n_G} &= I_{1,n_W}(t) - FWn_W(t) * ZVn_W(t) * \rho_{Holz} = 0 \\
 F_{23+4n_W+7n_G} &= A_{1,n_W-2}(t) - PNvn_W(t) * M^{(1,n_W)}(t) \\
 &\quad - \frac{FWABn_W(t) * M^{(1,n_W)}(t)}{FWn_W(t)} = 0
 \end{aligned}$$

## Siedlungen

$$F_{23+4n_W+8n_G} = A_{4,n_G-9}(t) - FGABn_G(t) * mkn_G = 0$$

$$F_{23+4n_W+9n_G} = A_{5,n_G-9}(t) - FGABn(t) * man - \int_{t_R}^t (k_{5,n_G-9}(t,t') * A_{3-5,n_G}(t')) dt' = 0$$

wobei  $t_R$  berechnet wird aus

$$\int_{t_R(t_i)}^{t_R(t_{i+1})} A_{3-5,n_G}(t') * \left[ 1 - \int_{t'}^{t_i} k_{5,m-9}(t'',t') dt'' \right] dt' = O_{Abbr}(t_i) * \Delta t$$

$$F_{24+4n_W+9n_G} = A_{3-6}(t) - khp(t) * B(t) = 0$$

$$F_{25+4n_W+9n_G} = A_{6-9}(t) - \int_{t_0}^t (k_{6-9}(t,t') * A_{3-6}(t')) dt' = 0$$

$$F_{26+4n_W+9n_G} = A_{7-8}(t) - kp(t) * B(t) = 0$$

$$F_{27+4n_W+9n_G} = A_{8-7}(t) - k_{8-7}(t) * A_{7-8}(t) = 0$$

$$F_{28+4n_W+9n_G} = A_{9-3}(t) - k_{9-3}(t) * (A_{4,1-9}(t) + \dots + A_{6-9}(t)) = 0$$

## Energieversorgung

$$F_{29+4n_W+9n_G} = A_{2-10}(t) - k_{10-2}(t) * \sum_{n=1}^{n_W} A_{1,n-2}(t) = 0$$

$$F_{30+4n_W+9n_G} = A_{3-10}(t) - k_{3-10}(t) * (A_{2-3}(t) + I_3(t) + A_{9-3}(t))$$

$$F_{31+4n_W+9n_G} = A_{7-10}(t) - k_{3-7-10}(t) * A_{3-7}(t) = 0$$

$$F_{32+4n_W+9n_G} = A_{8-10}(t) - k_{8-10}(t) * A_{7-8}(t) = 0$$

$$F_{33+4n_W+9n_G} = A_{9-10}(t) - k_{9-10}(t) * (A_{4,1-9}(t) + \dots + A_{6-9}(t)) = 0$$

$$F_{34+4n_W+9n_G} = A_{10-2}(t) - e_{FW}(t) * \sum_{n=1}^{n_W} A_{1,n-2}(t) = 0$$

$$F_{35+4n_W+9n_G} = A_{10-3}(t) - e_{HW}(t) * (A_{2-3}(t) + I_3(t) + A_{9-3}(t)) = 0$$

$$F_{35+4n_W+10n_G} = A_{10-4,n_G}(t) - e_{Gn_G}(t) * FGn_G(t) + I_{4,n_G}(t) = 0$$

$$F_{35+4n_W+11n_G} = I_{4,n_G}(t) - G(t) * \eta_{SKn_G} * \beta_{FSK/FGn_G}(t) * FGn_G(t) = 0$$

$$F_{36+4n_W+11n_G} = A_{10-7}(t) - e_{RP}(t) * A_{8-7}(t) - e_{FF}(t) * (A_{7-8}(t) - A_{8-7}(t)) = 0$$

## A4 Anfangsgleichungen

### A4.1 Anfangsbedingungen

$$G_{n_W} = M^{(1, n_W)}(t_0) - M_0^{(1, n_W)} = 0$$

$$G_{1+n_W} = M^{(2)}(t_0) - M_0^{(2)} = 0$$

$$G_{2+n_W} = M^{(3)}(t_0) - M_0^{(3)} = 0$$

$$G_{2+n_W+n_G} = M^{(4, n_G)}(t_0) - M_0^{(4, n_G)} = 0$$

$$G_{2+n_W+2n_G} = M^{(5, n_G)}(t_0) - M_0^{(5, n_G)} = 0$$

$$G_{3+n_W+2n_G} = M^{(6)}(t_0) - M_0^{(6)} = 0$$

$$G_{4+n_W+2n_G} = M^{(7)}(t_0) - M_0^{(7)} = 0$$

$$G_{5+n_W+2n_G} = M^{(8)}(t_0) - M_0^{(8)} = 0$$

$$G_{6+n_W+2n_G} = M^{(9)}(t_0) - M_0^{(9)} = 0$$

$$G_{7+n_W+2n_G} = M^{(10)}(t_0) - M_0^{(10)} = 0$$

### A4.2 Bilanzgleichungen

Gleichungen A3.2 für den Zeitpunkt  $t_0$ .

### A4.3 Modellansätze

Gleichungen A3.3 bzw. A3.4 für den Zeitpunkt  $t_0$ .

## A5 XYLOIKOS-Parameter

Tabelle A1: Liste der Parameter

Parameter	Erläuterung	Einheit	Anz.
B(t)	Bevölkerung	E	1
$FWn(t)$ , $fwn(t)$	Waldfläche der JG-Kl. n (total, pro Einw.)	ha	$n_W$
$FWABn(t)$ , $fwabn(t)$	Endnutz.- oder Rodungsfläche d. JG-Kl. n	$ha/a$	$n_W$
$ZVn(t)$	Volumenzuwachs pro ha der JG-Kl. n	m	$n_W$
$PNVn(t)$	Volumennutzungsprozent der JG-Kl. n	1/a	$n_W$
$\rho_{\text{Holz}}$	Dichte von Holz	$kg\ TS/m^3$	1
$K_{10-2}(t)$	Transfkt. Brennholz aus Forstwirtschaft	-	1
$FGn(t)$ , $fgn(t)$	Geb.-Fläche (BGF) d JG-Kl. n (tot., pro E)	$m^2$	$n_G$
$FGABn(t)$ , $fgabn(t)$	Geb.-Abbr.fläche (BGF) der JG-Kl. n	$m^2/a$	$n_G$
mkn	Dichte Konstr.-holz in Geb. der JG-Kl. n	$kgTS/m^2$	$n_G$
man	Dichte Ausbauholz in Geb. der JG-Kl. n	$kgTS/m^2$	$n_G$
$KHP(t)$ , $khp(t)$	jährl. Fluss an Neu-Holzprodukten	$kgTS/E^*a$	1
$KP(t)$ , $kp(t)$	jährl. Fluss an Papier	$kgTS/a$	1
$K_{5,n-9}(t, t')$	Transferfkt. für verzögerten Output	-	$n_G$
$K_{6-9}(t, t')$	Transferfkt. für verzögerten Output	-	1
$K_{3-7-10}(t)$	Transferfkt.: Lignin aus Papierholz	-	1
$K_{3-10}(t)$	Transferfkt.: Restholz aus Holzverarbeitung	-	1
$K_{8-7}(t)$	Transferfkt.: Recyclingrate Altpapier	-	1
$K_{8-10}(t)$	Transferfkt.: Brennaltpapier aus Papier	-	1
$K_{9-3}(t)$	Transferfkt.: Recyclingrate Altholz	-	1
$K_{9-10}(t)$	Transferfkt.: Brennalt Holz aus Altholz	-	1
$\theta_{FW}(t)$	Energieverbr. der Forstw. pro Nutzholz	$MJ/kgTS$	1
$\theta_{HW}(t)$	Energieverbr. der Holzw. pro verarb. Holz	$MJ/kgTS$	1
$\theta_{Gn}(t)$	Energiekennzahl Gebäude der JG-Kl. n	$MJ/m^2^*a$	$n_G$
$\theta_{RP}(t)$	Energieverbr. Papierw. pro Rec.papier	$MJ/kgTS$	1
$\theta_{FF}(t)$	Energieverbr. Papierw. pro Frischfaserst.	$MJ/kgTS$	1
$\alpha_{FW}(t)^*$	Anteil Brennholz an Energie Forstw.	-	1
$\alpha_{HW}(t)^*$	Anteil Brennholz an Energie Holzw.	-	1
$\alpha_{Gn}(t)^*$	Anteil Brennholz an Energie Geb.-Wärme	-	$n_G$
$\alpha_{PW}(t)^*$	Anteil Brennholz an Energie Papierw.	-	1
$\eta_{SK,n}$	Jahreswirkungsgrad Sonnenkollektoren v. Gebäuden der JG-Kl. n	-	$n_G$
$\beta_{FSK/FGn}$	SK-Fläche pro Gebäudefläche d. JG-Kl. n	-	$n_G$
G(t)	Globalstrahlung der Untersuchungsregion	$MJ/m^2^*a$	1
<b>Total Anzahl Parameter</b>			<b>19+4<math>n_W</math>+9<math>n_G</math></b>

\* Auswertungsparameter

## A6 Kenngrößen

### SVG Holz

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum \text{Nutzungen}}{\sum \text{Nutzungen} + N' \text{Im p. Holz} + N' \text{Im p. Brennholz}} \\
 &= \frac{\sum_{n=1}^{n_w} A_{1,n-2}(t)}{\sum_{n=1}^{n_w} A_{1,n-2}(t) + I_3(t) + B(t) * \sum_{n=1}^{n_G} (f_{gn}(t) * e_{G,n} * \alpha_{G,n}) * \frac{1}{H_{u(\text{Holz})}} - A_{2-10}(t) - A_{9-10}(t)}
 \end{aligned}$$

### SVG Energie

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum \text{Eigenproduktion}}{\sum \text{Eigenproduktion} + N' \text{Im p. Fossil} + N' \text{Im p. Holz}} \\
 &= \frac{A_{2-10}(t) + A_{3-10}(t) + A_{7-10}(t) + A_{8-10}(t) + A_{9-10}(t) + \sum_{n=1}^{n_G} I_{4,n}(t)}{A_{2-10}(t) + A_{3-10}(t) + A_{7-10}(t) + A_{8-10}(t) + A_{9-10}(t) + \sum_{n=1}^{n_G} I_{4,n}(t) + I_{10}}
 \end{aligned}$$

### Fossile Energie Gebäudebetrieb (pro Kopf)

$$= \sum_{n=1}^{n_G} (e_{G,n} * f_{gn}(t) - \alpha_{G,n} * f_{gn}(t) - G * \eta_{SK,n} * \beta_{FSK/FGn})$$

### Holzenergie Gebäudebetrieb (pro Kopf)

$$= \sum_{n=1}^{n_G} (f_{gn}(t) * e_{G,n} * \alpha_{G,n})$$

### Sonnenkollektorenergie Gebäudebetrieb (pro Kopf)

$$= \sum_{n=1}^{n_G} f_{gn}(t) * \beta_{FSK/FGn} * G * \eta_{SK,n}$$

# Anhang B: Kalibrierung und Validierung

<b>B1 Bevölkerung</b>	<b>B (t)</b>
<b>B2 Wald und Forstwirtschaft</b>	
B21 Waldflächen	$FWn(t), FWABn(t)$
B22 Zuwachs	$ZVn(t), \beta(t), \rho_{\text{Holz}}$
B23 Nutzung	$PNVn(t), k_{2-10}(t), PNBn(t)$
<b>B3 Siedlungen</b>	
B31 Gebäudeflächen	$FGn(t), FGABn(t)$
B32 Holz in Gebäuden	$mkn, man, k_{5,n-9}(t,t')$
B33 Holzprodukte	$KHP(t), k_{6-9}(t,t')$
B34 Papier	$KP(t), k_{3-7-10}(t), k_{8-7}(t), k_{8-10}(t), k_{8-10}(t)$
B35 Holz- und Altholzwirtschaft	$k_{3-10}(t), k_{9-3}(t), k_{9-10}(t), H_{o(\text{Holz})}, H_{u(\text{Holz})}$
<b>B4 Energie</b>	
B41 Forstwirtschaft	$e_{\text{FW}}(t), \alpha_{\text{FW}}(t)$
B42 Holzwirtschaft	$e_{\text{HW}}(t), \alpha_{\text{HW}}(t)$
B43 Papierwirtschaft	$e_{\text{RP}}(t), e_{\text{FF}}(t), \alpha_{\text{PW}}(t)$
B44 Gebäude	$e_{\text{Gn}}, \alpha_{\text{Gn}}$
B45 Solarenergie	$G(t), \eta_{\text{SK},n}, \beta_{\text{FSK}/\text{FGn}}$

Die Parameterfunktionen werden aufgrund von Datenreihen aus dem 20. Jahrhundert geschätzt. Für das 21. Jahrhundert werden Szenarien entwickelt, welche in diesem Kapitel noch nicht diskutiert werden.

## B1 Bevölkerung B(t)

Die Bevölkerung (vgl. Abb 4.13) wird durch eine logistische Wachstumskurve angenähert (Gleichung B1). (B1) ist so formuliert, dass die Wachstumsfunktion durch einen Sockelwert  $B_0$  ( $B_{(t=-\infty)}$ ) und einen Endwert  $B_\infty$  beschrieben wird.

$$B(t) = B_0 + \frac{B_\infty - B_0}{1 + e^{-\alpha \cdot (t - T^*)}} \quad (B1)$$

Durch Vorgabe des Sockelwertes  $B_0$  und des Endwertes  $B_\infty$  und durch probieren verschiedener  $T^*$  lässt sich  $\alpha$  durch nichtlineare Regression mit dem Simplex-Verfahren (Programm SYSTAT) berechnen (Tabelle B1).

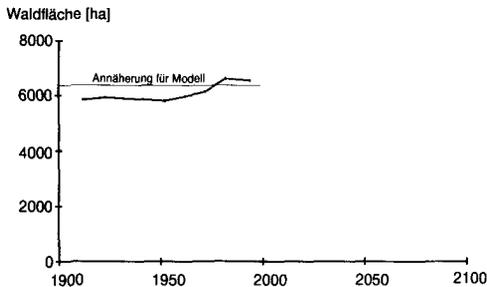
**Tab. B1:** Teilparameter zur Beschreibung des Bevölkerungswachstums  $B(t)$  mit Hilfe der Formel (B1) für drei Szenarien.

	$B_0$	$B_\infty$	$T^*$	$\alpha$
Variante 1	20'000	120'000	1970	0.027
<b>Variante 2<sup>1</sup></b>	<b>20'000</b>	<b>100'000</b>	<b>1950</b>	<b>0.034</b>
Variante 3	20'000	80'000	1930	0.049

## B2 Wald und Forstwirtschaft

### B2.1 Waldflächen $FW_n(t)$ , $FWAB_n(t)$

Totale Waldfläche  $FW(t)$



**Abb. B1:** Entwicklung der Waldfläche in der Region KSM. Die Daten stammen aus den Arealstatistiken der Schweiz (ESB 1912, ESB 1925, ESA 1953, ESA 1972, BFS 1992, BFS 1997b).

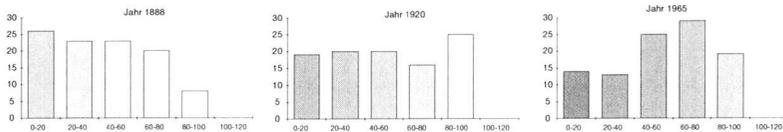
<sup>1</sup> fett markiert ist jeweils die Variante zur Berechnung des Standard-Szenarios.

Die Waldfläche hat seit Beginn des 20. Jahrhunderts um rund 10% zugenommen. Für das Modell wird in erster Näherung mit einer konstanten Waldfläche gerechnet:

$$FW(t) = 6400 \text{ ha.}$$

### Waldflächen nach Jahrgangsklassen $FW_n(t)$

Im Bericht "Grundlagenplan für die Waldungen der Region Gäu" (KURTH 1965) wurden die Flächenanteile der Altersklassen für die Jahre 1888, 1920 und 1965 zusammengetragen (Abb. B2). Die wesentlichste Veränderung in den vergangenen 100 Jahren besteht nach (KURTH 1965) darin, dass die Umtriebszeit von rund 80 Jahren auf 120 Jahre erhöht wurde. Damit lassen sich die wandernden Peaks an unter- und übervertretenen Altersklassen erklären.



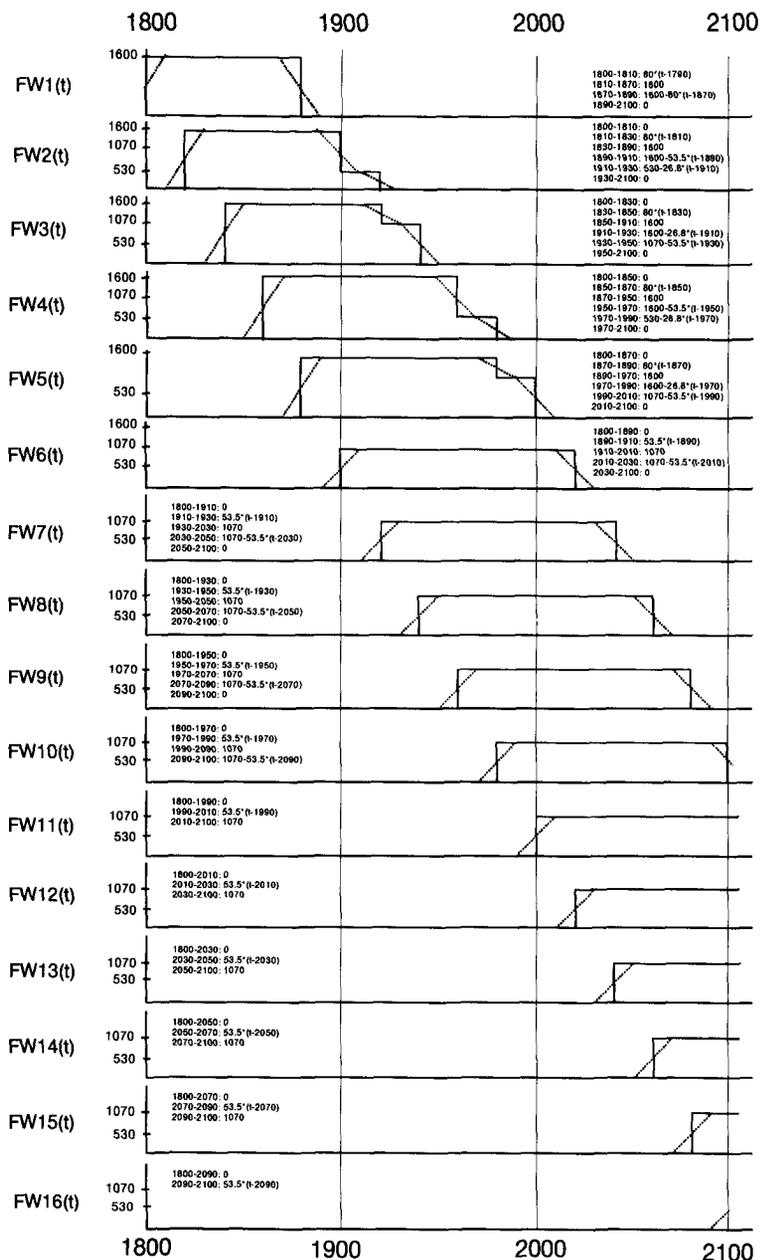
**Abb. B2:** Verteilung der Altersklassen im Gäu in den Jahren 1888, 1920 und 1965. Die Daten stammen aus (KURTH 1965).

Um die Entwicklung Waldflächen der einzelnen Jahrgangsklassen  $FW_n(t)$  abzuschätzen (Abb. B3), wurden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die gesamte Waldfläche hat sich in der Vergangenheit nicht verändert und beträgt 6400 ha (Abb. B1).
- Die räumliche Anordnung des Waldes hat sich im Betrachtungszeitraum nicht verändert (Vergleich von Karten). Mit anderen Worten, es wurden im Betrachtungszeitraum weder Rodungen noch Aufforstungen durchgeführt.
- Bis zum Jahr 1890 war die Altersverteilung ausgeglichen für eine Umtriebszeit  $U$  von 80 Jahren (Abb. B2).
- Ab dem Jahr 1891 wurde der Wald konsequent umgebaut, indem die Umtriebszeit von  $U = 80a$  auf  $U = 120a$  erhöht wurde.

Abb. B3 zeigt die Waldflächen der Jahrgangsklassen ( $FW_n$ ) in Funktion der Zeit. Dabei werden in einer Jahrgangsklasse 20 Jahrgänge zusammengefasst ( $FW_1$  wird von 1790-1810 begründet,  $FW_2$  im Jahr 1810-1830 usw.). Um Unstetigkeiten in den Simulationsergebnissen aufgrund der relativ grossen Jahrgangsklassen zu vermeiden, wird ein linearer Verlauf zwischen diesen Fixpunkten angenommen (gestrichelte Linien).

## Anhang B: Kalibrierung und Validierung



**Abb. B3:** Vereinfachtes Modell der Flächenentwicklung (Angaben in ha) der Jahrgangsklassen: Übergang der Umtriebszeit U von 80a auf 120a.

Bis zum Jahr 1890 betragen die Waldflächen pro Jahrgang 1/80 der gesamten Waldfläche, also 1600 ha pro Jahrgangsklasse (FW1 bis FW5). Ab 1890 wird nur noch 1/120 der Fläche verjüngt, also 1070 ha in 20 Jahren (FW2 bzw. FW6). Die restliche Fläche (530 ha) wächst in eine höhere Altersstufe hinein (80-100 a). Der Umbau von  $U = 80$  a auf  $U = 120$  a ist nach diesem Modell im Jahr 1990 abgeschlossen.

## B2.2 Zuwachs $ZV_n(t)$ , $\beta(t)$ , $\rho_{\text{Holz},n}$

### Bestimmung der Bonität $\beta$ nach W. KELLER (1978)

Die Bonitäten werden mit Hilfe des Ertragskundlichen Bonitätsschlüssels (KELLER 1978) berechnet. Die dabei zugrunde liegende Formel lautet:

$$\beta = h_{\text{dom}_{\text{BA}}^{50}} = e_{\text{BA}} + f_{\text{BA}} \left( \frac{k}{x-c} + m + px \right) + g_{\text{BA}} \left( \frac{k}{x-c} + m + px \right)^2 \quad (\text{B2})$$

Sie gibt die Oberhöhenbonitätskurven in Funktion der Meereshöhe an, wobei der Ausdruck  $\left[ \frac{k}{x-c} + m + px \right]$  vom Standort, die Parameter  $e_{\text{BA}}$ ,  $f_{\text{BA}}$  und  $g_{\text{BA}}$  von der Baumart abhängen. Die dabei erhaltenen Werte wurden verglichen mit den Werten aus dem Grundlagenplan für die Waldungen der Region Gäu (KURTH 1965) sowie den Werten aus den Versuchsflächen in Neuendorf (KELLER 1978). Für die Region KSM werden zwei Zonen mit unterschiedlichen Standortparametern gebildet (vgl. Tabelle B2).

**Tab. B2:** Bestimmung der durchschnittlichen Bonität für Fichte

Zone	Fläche [ha]	Charakteristik	$\beta$ [m]
Mittelland	3410	basenreiches Grundgestein, 400-500m ü.M.	22-26
Jurasüdfuss + Born	2827	basenreiches Grundgestein, Südexposition, Hang, 500-900m ü.M.	18

(KELLER 1978) erhält für den Gemeindewald Neuendorf eine mittlere Oberhöhenbonität von 23.78m für Fichte (Streuung  $s_x = 1.60\text{m}$ ,  $s_{\bar{x}} = 0.14\text{m}$ ). Für die gesamte Region wird im folgenden mit einer durchschnittlichen Bonität von

$$\beta = h_{\text{dom}_{\text{F1}}^{50}} = 22$$

gerechnet.

## Regression des Volumenzuwachses gemäss Ertragstafeln ZVn (t)

Die Ertragstafelwerte (BADOUX 1968) wurden am Beispiel Fichte der Bonität 22 durch verschiedene Wachstumsfunktionen angenähert und miteinander verglichen: Quasi-Newton- (Gompertz- und logistische Funktion), Simplex-Verfahren (Backmann-Funktion), von Hand (Chapman-Richard-Funktion).

### 1. Gompertz-Funktion:

$$ZV(t) = a * e^{-c*(t-d)} * e^{-b * e^{-c*(t-d)}} \quad (B3a)$$

$$a = 50 \quad c = 0.025$$

$$b = 1.091 \quad d = 50$$

### 2. Chapman-Richards-Funktion:

$$ZV(t) = a * e^{-b*(t-d)} * \left(1 - e^{-b*(t-d)}\right)^c \quad (B3b)$$

$$a = 45 \quad c = 0.5$$

$$b = 0.0155 \quad d = 20$$

### 3. Logistische Funktion:

$$ZV(t) = \frac{a * e^{-b*t}}{\left(1 + c * e^{-b*t}\right)^2} \quad (B3c)$$

$$a = 250 \quad c = 3.928$$

$$b = 0.026$$

### 4. Backmann-Funktion (BACKMANN 1942, KRAMER et al. 1988):

$$ZV(t) = ZV_{\max} * e^{-K * \log^2\left(\frac{t}{t(ZV_{\max})}\right)} \quad (B3d)$$

$$ZV_{\max} = 17.3 \quad (\text{aus Ertragstafel})$$

$$K = 0.938$$

$$t(ZV_{\max}) = 49$$

## Validierung anhand der Waldwirtschaftspläne

Der Zuwachs kann mit Hilfe Bonität und der gewählten Wachstumsfunktion (siehe unten) simulieren werden. Die Bonität lässt sich überprüfen durch die Bestimmung der Volumenzuwächse ZV aus den Waldwirtschaftsplänen:

$$ZV = \frac{V_{t_2} - V_{t_1} - N_{\Delta t}}{t_2 - t_1} \quad (B4)$$

$V_{t_1}$  und  $V_{t_2}$  sind die Volumenvorräte zu den Messzeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ ,  $N_{\Delta t}$  ist die Nutzung zwischen diesen Messzeitpunkten. Die Simulation des Zuwachses bei

konstanter Bonität weicht vor allem zu Beginn des 20. Jahrhunderts stark von den nach (B3) berechneten Werten ab (vgl. Abb. 4.15).

### Bestimmung der Bonität $\beta$ als Funktion der Zeit

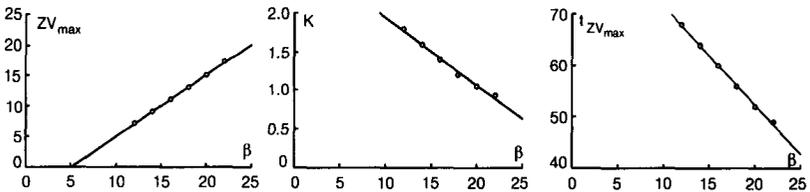
Die Parameter der Backmann-Funktion werden neu als Funktionen der Bonität eingeführt:

$$ZV(\beta, t) = ZV_{\max}(\beta) * e^{-K(\beta) * \log^2\left(\frac{t}{t_{ZV_{\max}}(\beta)}\right)} \quad (\text{B3d.1})$$

Die nichtlineare Regression mit Hilfe des Simplex-Verfahrens und von Hand ergibt folgende Werte:

**Tab. B3:** Parameter der Backmannfunktion für verschiedene Bonitäten

Bonität	12	14	16	18	20	22
$ZV_{\max}(\beta)$	7.1	9.0	11.0	13.0	15.0	17.3
$K(\beta)$	1.8	1.6	1.4	1.2	1.05	0.938
$t_{ZV_{\max}}(\beta)$	68	64	60	56	52	49



**Abb. B4:** Parameter der Backmannfunktion in Abhängigkeit der Bonität, angenähert durch lineare Funktionen.

Durch lineare Regression erhält man die Parameter der Backmann-Funktion (B3d) als lineare Funktion der Bonität  $\beta$ :

$$ZV_{\max}(\beta) = ZV_0 + a1 * \beta(t) \quad \text{mit} \quad ZV_0 = -5.176 \quad a1 = 1.014$$

$$K(\beta) = K_0 + a2 * \beta(t) \quad \text{mit} \quad K_0 = 2.827 \quad a2 = -0.088$$

$$t_{ZV_{\max}}(\beta) = t_0 + a3 * \beta(t) \quad \text{mit} \quad t_0 = 90.952 \quad a3 = -1.929$$

Der Verlauf der Bonität kann nun mit Hilfe von XYLOIKOS anhand der gemessenen Zuwächse berechnet werden. Es gilt

$$ZV_n(t) = f(\beta(t)) \quad (B5)$$

Durch Umformung erhält man

$$\beta(t) = g(ZV(t)) \quad (B6)$$

Der auf diese Weise berechnete Bonitätsverlauf ist in Abb. 4.18 ersichtlich.

### Erneute Kalibrierung der Bonität und Parametervariation

Für die erneute Kalibrierung der Bonität wird diese durch logistische Wachstumsverläufe beschrieben.

$$\beta(t) = \beta_0 + \frac{\beta_1 - \beta_0}{1 + e^{-\alpha_1 * (t - T_1^*)}} + \frac{\beta_\infty - \beta_1}{1 + e^{-\alpha_2 * (t - T_2^*)}} \quad (B7)$$

$\beta_0 = \beta(t=-\infty)$  ist das Ausgangsniveau der Bonität. Der zweite Term beschreibt den Anstieg von  $\beta_0$  auf ein oberes Plateau  $\beta_1$ , der dritte Term den Abfall auf ein Endniveau  $\beta_\infty = \beta(t=\infty)$ . Die nichtlineare Regression wird nun nicht mit den berechneten Bonitätswerten, sondern direkt an den gemessenen Zuwächsen durchgeführt. Um den Einfluss der künftigen Bonitätsentwicklung zu untersuchen, wird eine Parametervariation durchgeführt, wobei drei Varianten untersucht werden. Die nichtlineare Regression wurde durch Proben und unter Anwendung des Quasi-Newton-Verfahrens durchgeführt (Tabelle B 4).

**Tab. B4:** Parameter für die Annäherung der Entwicklung der Bonität mit Hilfe der Funktion (B5). (Vgl. Abb. 4.19)

	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_\infty$	$T_1^*$	$T_2^*$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Variante 1	15.0	25	25	1980	-	0.036	-
<b>Variante 2</b>	<b>15.0</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>1961</b>	-	<b>0.046</b>	-
Variante 3	15.0	22	15.0	1964	2040	0.050	0.050

### Holzdichten $\rho_{\text{Holz},n}$

Das Modell wird am Beispiel Fichte für alle Jahrgangsklassen exemplifiziert.

$\rho_{\text{Fichte}} = 430 \text{ kg TS/m}^3$  (PFEIFFER 1993).

### B2.3 Nutzung PNVn (t), k<sub>2-10</sub> (t), PNBn (t)

#### Volumennutzungsprozent PNVn (t)

Die Entwicklung der Volumennutzungsprozente wird durch eine einfache, empirisch entwickelte Funktion beschrieben:

## Anhang B: Kalibrierung und Validierung

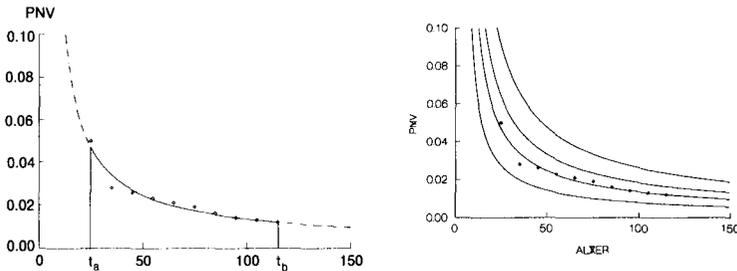
$$\text{PNV}_N(t) = 0 \quad \text{falls } t < t_a \text{ oder falls } t > t_b \quad (\text{B8a})$$

$$\text{PNV}_N(t) = \frac{P}{(t - T^*)^\alpha} \quad \text{falls } t_a \leq t \leq t_b \quad (\text{B8b})$$

$t_a$  entspricht dem Bestandesalter bei der Erstdurchforstung und wird gemäss den Ertragstafeln auf 25a festgelegt.  $t_b$  ist das Ende der Durchforstung und wird hier mit dem Beginn der Endnutzung gleichgesetzt. Durch Vorgabe eines Wertes  $\alpha$  können  $P$  und  $T^*$  mit Hilfe des Quasi-Newton-Verfahrens berechnet werden.

Es wird vereinfachend angenommen, dass sich die Volumennutzungsprozente im Betrachtungszeitraum nicht verändert haben. Es gilt somit

$$\text{PNV1}(t) = \text{PNV2}(t) = \dots = \text{PNV}_N(t)$$



**Abb. B5:** Durchschnittliche (jährliche) Volumennutzungsprozente nach BADOUX (1968) und Annäherung durch Funktion (B8).

**Tab. B5:** Parameter zur Beschreibung des jährlichen Volumennutzungsprozentes mit Hilfe von Formel (B4b).

	$\alpha$	$P$	$T^*$
Variante 1 (schwache Df)	0.8	0.3	5
<b>Variante 2 (Ertragstafel)</b>	<b>0.8</b>	<b>0.515</b>	<b>5</b>
Variante 3 (starke Df)	0.8	0.7	5
Variante 4 (sehr starke Df)	0.8	1.0	5

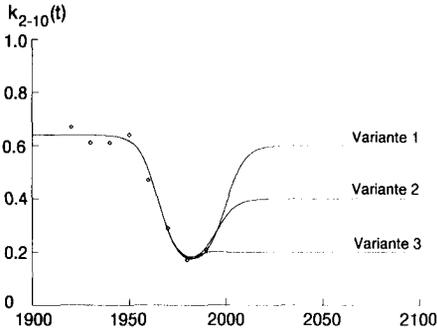
### Transferfunktion Brennholz aus Rundholzproduktion $k_{2-10}(t)$

Vier Bürgergemeinden (Härkingen, Kestenholz, Nieder- und Oberbuchsiten) verfügen in ihren Waldwirtschaftsplänen über eine Statistik des Brennholzanteiles bis zu Beginn des Jahrhunderts zurück. Die Mittelwerte aus diesen 4 Gemeinden sind in der abgebildet. Im wesentlichen zeigt die Grafik einen hohen Wert (über 0.6) bis nach dem 2. Weltkrieg. Dann nimmt der Brennholzanteil rapide ab bis auf unter 0.2 in den 70er-Jahren. Seither ist die Tendenz wieder leicht steigend. Der Verlauf wird durch zwei sich überlagernde logistische Kurven angenähert:

$$k_{2-10}(t) = k_0 + \frac{k_1 - k_0}{1 + e^{-\alpha_1 * (t - T_1^*)}} + \frac{k_\infty - k_1}{1 + e^{-\alpha_2 * (t - T_2^*)}} \quad (B9)$$

$k_0$  ist der Sockelwert zu Beginn, der erste Bruch beschreibt die logistische Abnahme auf ein neues Niveau  $k_1$ , der zweite Bruch steht für eine logistische Zunahme auf einen "Endwert"  $k_\infty$ .

$k_0$ ,  $k_1$  und  $k_\infty$  werden für drei Varianten vorgegeben, die übrigen Parameter werden von Hand geschätzt (Tabelle B6).



**Abb. B6:** Transferfunktion Brennholz aus Forstwirtschaft. Die Daten sind Mittelwerte aus ausgewählten Bürgergemeinden in der Region KSM mit ausreichender Datenbasis (Waldwirtschaftspläne).

**Tab. B6:** Parameter zur Beschreibung der Transferfunktion von Brennholz aus der Rundholzproduktion mit Hilfe der Formel (B5).

	$k_0$	$k_1$	$k_\infty$	$T_1^*$	$T_2^*$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
Variante 1	0.64	0.15	0.6	1965	1985	0.2	0.5
Variante 2	0.64	0.15	0.4	1965	1995	0.2	0.2
<b>Variante 3</b>	<b>0.64</b>	<b>0.15</b>	<b>0.2</b>	<b>1965</b>	<b>2000</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>

## B3 Siedlungen

### B3.1 Gebäudeflächen FGn(t), FGABn(t)

#### Totale Gebäudefläche FG (t)

Die Gebäudefläche (ausgedrückt als Bruttogeschossfläche, abgekürzt BGF) wurde weder in der Region KSM noch in der gesamten Schweiz über einen grösseren Zeitraum erhoben. Damit ist man auf relativ grobe Abschätzungen angewiesen. Es wird angenommen, dass die Pro-Kopf-Gebäudefläche  $fg(t)$  der Region dem Schweizerischen Durchschnitt entspricht. Es gilt

$$FG(t) = B(t) \cdot fg(t) \quad (B10)$$

Gesamtschweizerisch beträgt die BGF für Wohnen  $fg_{\text{Wohnen}}$  etwa 55% der gesamten BGF ( $fg$ ) gegenüber Arbeiten ( $fg_{\text{Arbeiten}}$ ) mit 45% (GABATHULER 1984) (S. 37). Im Kanton Aargau ist dieses Verhältnis etwa umgekehrt und beträgt 47% ( $fg_{\text{Wohnen}}$ ) zu 53% ( $fg_{\text{Arbeiten}}$ ) (WÜEST&PARTNER 1995). Es wird die Annahme getroffen, dass das Verhältnis in KSM demjenigen des Kantons Aargau entspricht und konstant bleibt:

$$fg(t) = 2.13 \cdot fg_{\text{Wohnen}}(t) \quad (B11)$$

In den Volkszählungen wurden nur die Wohngebäude erfasst: von 1860-1970 wurden die *Anzahl Haushaltungen*<sup>2</sup> (ESA 1974) und seit 1970 die *Anzahl Wohnungen*<sup>3</sup> (BfS 1993a) erhoben. Es wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Anzahl der Haushaltungen der Anzahl Wohnungen entspricht (Differenz im Jahr 1970: 2.5%). In der Volkszählung 1990 (BfS 1993a) wurden ferner die *Wohnflächen*<sup>4</sup> *pro Wohnung* in Gebäuden verschiedener Bauperioden ermittelt. Unter der Annahme, dass sich die durchschnittliche Wohnfläche einer Wohnung infolge Sanierung nicht verändert hat, kann damit die Entwicklung der Wohnfläche in der Schweiz seit 1860 abgeschätzt werden. Die Wohnfläche wird nach (GABATHULER 1984) durch Multiplikation mit 1.3 in Bruttogeschossfläche (BGF) umgerechnet.

Die Entwicklung der Pro-Kopf-Gebäudefläche wird durch Überlagerung von zwei logistischen Kurven beschrieben:

$$fg(t) = fg_0 + \frac{fg_1 - fg_0}{1 + e^{-\alpha_1 \cdot (t - T_1^*)}} + \frac{fg_\infty - fg_1}{1 + e^{-\alpha_2 \cdot (t - T_2^*)}} \quad (B12)$$

$fg_0$  ist dabei der Sockelwert,  $fg_1$  ein Zwischenwert und  $fg_\infty$  der Endwert der Gebäudefläche. Durch Vorgabe der Endwerte (200 m<sup>2</sup>/E, 140 m<sup>2</sup>/E und 80 m<sup>2</sup>/E) (vgl. Abb. 4.21) werden die Phänomene Wachsen, Stabilisieren und Schrumpfen des Pro-Kopf-Gebäudebestandes beschrieben. Die nichtlineare Regression wurde durch Proben und unter Anwendung des Quasi-Newton Verfahrens durchgeführt (Tabelle B7).

<sup>2</sup> Eine Privathaushaltung besteht entweder aus den zusammenlebenden Angehörigen einer Familie und allen weiteren Personen, die bei ihr wohnen, oder aus einer Einzelperson sowie einander nicht verwandte Personen, wenn diese in einer eigenen Wohnung leben oder einzelne Zimmer oder Mansarden direkt vom Hauseigentümer gemietet haben, welche nicht zu dessen Wohnung gehören (ESA 1974).

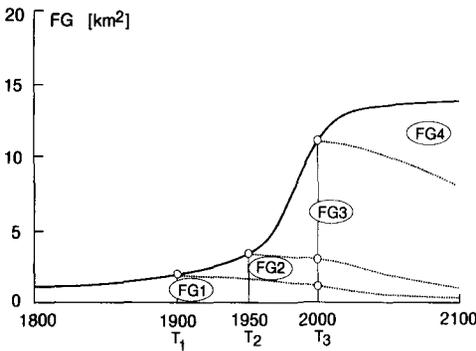
<sup>3</sup> Als Wohnungen werden sämtliche Wohneinheiten bezeichnet, die über eine Küche oder Kochnische verfügen (inkl. Einfamilienhäuser). Eine Wohnung kann also mehrere Haushalte beherbergen (BfS 1993).

<sup>4</sup> Die Fläche einer Wohnung ist die Summe der Flächen sämtlicher Zimmer, Küchen, Kochnischen, Badezimmer, Toilettenräume, Reduits (Abstellräume), Gänge, Veranden usw. Zusätzliche separate Wohnräume (z.B. Mansarden), offene Balkone und Terrassen sowie nicht bewohnbare Keller- und Dachgeschossräume fallen bei der Berechnung ausser Betracht.

**Tab. B7:** Parameter für die Annäherung der Entwicklung der Pro-Kopf-Gebäudefläche (BGF) mit Hilfe der Funktion (B12). (vgl. Abb. 4.21)

	$fg_0$	$fg_1$	$fg_\infty$	$T_1^*$	$T_2^*$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	
Variante 1	55	200	200	1991	2000	0.12	0.12	
Variante 2	langsam	55	140	140	1983	2000	0.05	0.14
	normal	<b>55</b>	<b>140</b>	<b>140</b>	<b>1983</b>	<b>2000</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>
	schnell	55	140	140	1983	2000	0.5	0.14
Variante 3 <sup>5</sup>	55	170	80	1985	2005	0.14	0.14	

### Gebäudeflächen der Jahrgangsklassen FGn (t)



**Abb. B7:** Schematische Darstellung der Gebäudeflächen nach Jahrgangsklassen am Beispiel von 4 Jahrgangsklassen. Zu jedem Zeitpunkt bekannt ist die Summe der Flächen aller Jahrgangsklassen (aus Formeln B10 und B12) sowie die Verteilung der Flächen im Jahr 1995 (aus (WÜEST&PARTNER 1995)).

Die Gebäudeflächen der einzelnen Jahrgangsklassen werden auf zwei Arten beschrieben: durch einen linearen Ansatz und durch einen Ansatz nach Gauss.

#### 1. Linearer Ansatz (Formeln B13)

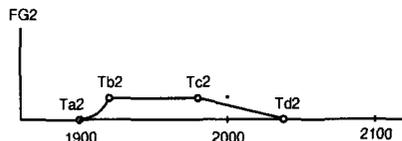
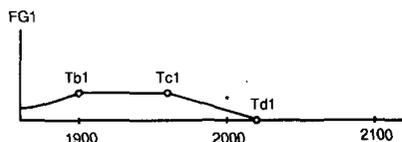
$$\begin{aligned}
 FG1(t) &= FG(t) && \text{falls } t \leq T_{b1} \\
 &= FG1(T_{b1}) && \text{falls } T_{b1} < t \leq T_{c1} \\
 &= FG1(T_{c1}) - \frac{FG1(T_{c1}) - FGn(T_{d1})}{T_{d1} - T_{c1}} * (t - T_{c1}) && \text{falls } T_{c1} < t \leq T_{d1} \\
 &= FG1(T_{d1}) && \text{falls } t > T_{d1}
 \end{aligned}$$

<sup>5</sup> Variante 3 beschreibt eine Reduktion der Gebäudefläche pro Kopf. Die Verkleinerung des Gebäudebestandes kann nur erreicht werden, wenn gleichzeitig die durchschnittliche Lebensdauer der Gebäude  $\tau_{G,n}$  angepasst wird (Tabelle B10).

## Anhang B: Kalibrierung und Validierung

Für alle übrigen Jahrgangsklassen gilt

$$\begin{aligned}
 FG_n(t) &= 0 && \text{falls } t \leq T_{an} \\
 &= FG(t) - \sum_{a=1}^{n-1} FG_a(t) && \text{falls } T_{an} < t \leq T_{bn} \\
 &= FG_n(T_{bn}) && \text{falls } T_{bn} < t \leq T_{cn} \\
 &= FG_n(T_{cn}) - \frac{FG_n(T_{cn}) - FG(T_{dn})}{T_{dn} - T_{cn}} * (t - T_{cn}) && \text{falls } T_{cn} < t \leq T_{dn} \\
 &= FG_n(T_{dn}) && \text{falls } t > T_{dn}
 \end{aligned}$$



**Abb. B8:** Schematische Darstellung der Gebäudeflächen. Die Parameter  $T_{an}$  und  $T_{bn}$  werden durch die Jahrgangsklasseneinteilung bestimmt.  $T_{cn}$  und  $T_{dn}$  sowie  $FG_n(T_{dn})$  müssen geschätzt werden.

Für eine erste Schätzung werden folgende Annahmen getroffen:

$$\begin{aligned}
 FG(T_{dn}) &= 0 \\
 T_{cn} &= T_{an} + \varnothing \text{ Lebensdauer } \tau_G - 20 \\
 T_{dn} &= T_{bn} + \varnothing \text{ Lebensdauer } \tau_G + 20
 \end{aligned}$$

**Tab. B8:** Wahl der  $\varnothing$  Lebensdauer  $\tau_G$

Jahrgangs- klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	-1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
Variante 1	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Variante 2</b>	<b>100</b>										
Variante 3	20	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Variante fg3 <sup>6</sup>	110	90	70	50	40	40	60	80	100	100	100

<sup>6</sup> Die "Variante fg3" wird in Kombination mit der Variante 3 der Pro-Kopf-Gebäudefläche  $fg(t)$  verwendet (vgl. Anhang B31).

2. Gauss-Ansatz

$$FG1(t) = FG(t) \quad \text{falls } t < T_1 \quad (B14a)$$

$$= FG(T_1) - \int_{T_1}^t FGAB1(t) dt \quad \text{falls } t \geq T_1 \quad (B14b)$$

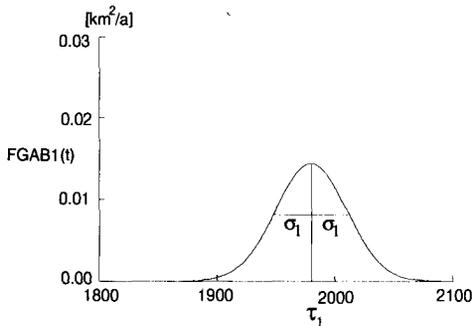
$$FGn(t) = FG(t) - \sum_{a=1}^{n-1} FGn(T_a) \quad \text{falls } t < T_n \quad (B14c)$$

$$= FG(T_n) - \sum_{a=1}^{n-1} FGn(T_a) - \int_{T_n}^t FGABn(t) dt \quad \text{falls } t \geq T_n \quad (B14d)$$

Die Abbruchgebäudefläche  $FGABn(t)$  wird mit einer Gausskurve beschrieben, welche durch den Zeitpunkt der grössten Abbruchtätigkeit  $\tau_0$ , die Varianz  $\sigma_0$  und den Anteil der total abzubauenden Gebäudefläche einer Jahrgangsklasse  $\alpha_n$  definiert ist:

$$FGABn(t) = \alpha_n * FGn(T_n) * \frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma_n}} * e^{-\frac{(t-\tau_n)^2}{2 * \sigma_n}} \quad (B15)$$

Zur Vereinfachung wird in der Standardvariante angenommen, dass der gesamte Gebäudepark einem Umbau unterliegt, dass also  $\alpha_n = 1$  ist. Mit Hilfe der Summenkurve für  $FG(t)$  und der Zusammensetzung zum Zeitpunkt 1995 (WÜEST&PARTNER 1995) lassen sich die Parameter für die Funktion (B15) grob abschätzen (vgl. Tab. B8).



**Abb. B9:** Darstellung der jährlichen Gebäudeabbruchfläche am Beispiel der Gebäudeklasse 1 gemäss Formel (B15). Die Fläche unter der Gausskurve ist gleich  $\alpha_1 * FG1(T_1)$ .

### B3.2 Holz in Gebäuden mkn, man, $k_{5,n-9}$ (t,t')

#### Holzdecken von Gebäuden mkn, man

Es wird angenommen, dass die Konstruktions- und die Ausbauholzdecke einer Jahrgangsklasse konstant bleibt, d.h. dass durch Gebäudesanierungen zwar Holzteile ausgewechselt werden, dass die Holzdecken insgesamt aber nicht verändert wird. Aus Erhebungen im Kanton Aargau (WÜEST&PARTNER 1995), in Deutschland (MANTEL 1967, KROTH 1991) sowie im Schweizer Mittelland (GEIGER 1995, LÜTHI 1995) wurden die Parameter abgeschätzt. Die Varianz der Einzelgebäude liegt nach LÜTHI T. (1995) bei rund 50-100%. Der Fehler am gesamten Gebäudepark dürfte demnach bei rund 20-30% liegen.

**Tab. B9:** Unterteilung der Bauelemente in Konstruktions- und Ausbauholz.

Bauelemente Hochbau nach EKG <sup>7</sup>		Konstr.-holz	Ausbauholz
<i>Rohbau bis Bodenplatte</i>			
D2	Fundament und Bodenplatte	x	
<i>Rohbau Gebäude ab Bodenplatte</i>			
E0	Decken (inkl. Auskragungen)	x	
E1	Dächer		
	Tragwerk	x	
	Dachhaut		x
E2	Stützen	x	
E4	Aussenwände EG/OG		
	Tragkonstruktion	x	
	Fassade (verkleidete Aussenhaut)		x
E5	Öffnungen		
	Fenster		x
	Ausstüren, Tore		x
	Sonnenschutz, äussere Abschlüsse		x
E6	Innenwände Rohbau		
	Tragende Innenwände	x	
	Nicht tragende Innenwände	x	
<i>Ausbauten</i>			
M1	Trennwände und Innentüren		x
M2	Schutzelemente		x
M3	Bodenbeläge		x
M4	Wandverkleidungen		x
M5	Deckenverkleidungen		x
M6	Einbauten		x
M7	Küchen		x

Die Unterteilung in Konstruktions- und Ausbauholz wurde im wesentlichen von (WÜEST&PARTNER 1995) übernommen (siehe Tabelle B11). Die einzige Änderung besteht darin, dass zusätzlich die Möbel zum Ausbauholz gezählt werden,

<sup>7</sup> EKG = Elementkostengliederung

## Anhang B: Kalibrierung und Validierung

da sie ebenfalls abhängig von der BGF sind. Aufgrund des jährlichen Möbelverbrauches von 30 kg Holz/E\*a (PLANCONSULT 1998) sowie einer angenommenen Lebensdauer von 20 Jahren wurde das Möbellager mit rund 600 t/E (1991) bzw. 5 kg/m<sup>2</sup> (im gesamten betrachteten Zeitraum) veranschlagt.

Die Parameter mkn und man werden abgeschätzt aufgrund von verschiedenen Untersuchungen des Gebäudeparkes in Regionen des Schweizer Mittellandes (GEIGER 1995, LÜTHI 1995, WÜEST&PARTNER 1995). Für das Modell mit 11 Gebäudeklassen werden folgende Werte angenommen:

**Tab. B10:** Konstruktions- und Ausbauholzdichten mkn/man ( in kg TS/m<sup>2</sup>). Variante 1: bis 2000 reale Entwicklung, ab 2000 konstante Holzdichten. Variante 2: reine Holzbaweise. Variante 3: reine Steinbaweise mit geringem Holzanteil.

Jahrgangsklasse		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		1900	1920	1940	1960	1980	2000	2020	2040	2060	2080	2100
Var. 1	mkn	40	35	30	20	10	10	10	10	10	10	10
	man	50	40	30	20	10	10	10	10	10	10	10
Var. 2	mkn	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	man	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Var. 3	mkn	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	man	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

### Nutzungszeiten von Ausbauholz $k_{5,n-9}$ (t,t')

Die durchschnittliche Lebensdauer von Gütern aus Ausbauholz wurde durch (AMT FÜR BUNDESBAUTEN 1995) abgeschätzt (Tabelle B11).

**Tab. B11:** Durchschnittliche Nutzungszeiten von Gütern aus Ausbauholz. (Daten zu Bauteilen nach EKG aus AMT FÜR BUNDESBAUTEN (1995), Möbel geschätzt).

Bauteil	Nutzungszeit [a]
E1 Dächer: Dachhaut	k.A.
E4 Aussenwände EG/OG: Fassade	30
E5 Öffnungen:	
Fenster	25 (40)
Aussentüren, Tore	25 (40)
Sonnenschutz, äussere Abschlüsse	30
M1 Trennwände und Innentüren	35
M2 Schutzelemente	50
M3 Bodenbeläge (inkl. Aufbau)	30-40
M4 Wandverkleidungen	35
M5 Deckenverkleidungen	25-30
M6 Einbauten	k.A.
M7 Küchen	25
Möbel	20

Die Aufenthaltszeiten von Ausbauholz in den Gebäuden werden als gaussverteilt angenommen (Formel B11). Der verwendete Ansatz für die Transferfunktion lautet

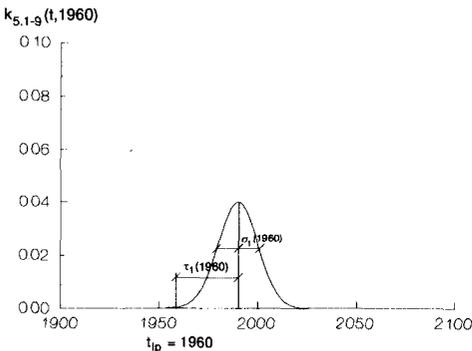
$$k_{5,n-9}(t, t') = \frac{1}{N_0(t_{IP})} * e^{-\frac{(t_{Op}-t_{IP}-\tau_n(t_{IP}))^2}{2 * (\sigma_n(t_{IP}))^2}} \quad (B16)$$

$$N_0(t_{IP}) = \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t-\tau_n(t_{IP}))^2}{2 * (\sigma_n(t_{IP}))^2}} dt$$

Diese Transferfunktion wird in (BADER 1992) eingeführt und in (BACCINI 1996) ausführlich diskutiert. Sie erlaubt, Güter- und Stoffflüsse in Prozessen zu beschreiben, die durch eine statistisch schwankende Aufenthaltszeit charakterisiert sind. Die Parameter  $\tau_0(t_{IP})$  und  $\sigma_0(t_{IP})$  repräsentieren die Verweilzeit respektive die Breite. Sie werden aufgrund von Tabelle B11 wie folgt gewählt:

$$\tau_1(t_{IP}) = \tau_2(t_{IP}) = \dots = \tau_n(t_{IP}) = 30a$$

$$\sigma_1(t_{IP}) = \sigma_2(t_{IP}) = \dots = \sigma_n(t_{IP}) = 10a$$



**Abb. B10:** Transferfunktion für Ausbauholz im Prozess "Gebäude Ausbau" am Beispiel der Gebäudeklasse 1 mit  $t_{IP} = 1960$ ,  $\tau_1 = 30a$  und  $\sigma_1 = 10a$  gemäss Formel (B16). Die Fläche unter der Kurve ist gleich 1, d.h. das gesamte Ausbauholz folgt der Gaussverteilung.

### Validierung anhand des Endholzverbrauches

XYLOIKOS wird validiert anhand des Pro-Kopf-Endholzverbrauches der Schweiz. Der Endholzverbrauch der Schweiz wurde in den 90er Jahren zwei mal mittels *Stichprobenerhebung* in verschiedenen Betrieben erhoben (PLANCONSULT 1993, 1998). (Vgl. Abb. 4.20).

### B3.3 Holzprodukte $k_{hp}(t)$ , $k_{6-9}(t, t')$

#### Konsum von neuen Holzprodukten $k_{hp}(t)$

Die nicht im Hochbau oder als Möbel eingesetzten Holzprodukte werden vereinfacht als "Holzprodukte" bezeichnet. Die entsprechenden Güter sind mit den zugehörigen Mengen in Tabelle B12 dargestellt:

**Tab. B12:** Entwicklung des jährlichen Bedarfes an Neu-Holzprodukten. Angaben in [kg TS/E\*a]. Die Daten für 1991 stammen aus (PLANCONSULT 1993), die früheren Daten sind geschätzt (kursiv).

Güter	1900	1930	1960	1991
Tiefbauten	10	10	10	10
Bau-Hilfsstoffe	5	5	10	13
Verpackungen	10	15	20	25
Do-it-yourself u. Holzwaren	20	20	10	10
<b>Total</b>	<b>45</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>58</b>

Der Neu-Holzproduktfluss pro Kopf wird konstant angenommen:

$$k_{hp}(t) = 50 \text{ kg TS/E*a}$$

#### Nutzungszeiten von Holzprodukten $k_{6-9}(t, t')$

Über die Aufenthaltszeiten der nicht im Hochbau eingesetzten Holzprodukte im Prozess "Konsum" liegen keine systematischen Untersuchungen vor. Es wird angenommen, dass sie wie die Ausbauholzprodukte gaussverteilt sind:

$$k_{6-9}(t, t') = \frac{1}{N_0(t_{Ip})} * e^{-\frac{(t_{Op} - t_{Ip} - \tau_n(t_{Ip}))^2}{2 * (\sigma_n(t_{Ip}))^2}} \quad (B17)$$

$$N_0(t_{Ip}) = \int_0^{\infty} e^{-\frac{(t - \tau_n(t_{Ip}))^2}{2 * (\sigma_n(t_{Ip}))^2}} dt$$

Die durchschnittliche Aufenthaltszeit  $\tau_n$  und die Varianz  $\sigma_n$  werden geschätzt:

$$\tau_1(t_{Ip}) = \tau_2(t_{Ip}) = \dots = \tau_n(t_{Ip}) = 10a$$

$$\sigma_1(t_{Ip}) = \sigma_2(t_{Ip}) = \dots = \sigma_n(t_{Ip}) = 5a$$

### B3.4 Papier KP (t), k<sub>3-7-10</sub> (t), k<sub>8-7</sub> (t), k<sub>8-10</sub> (t)

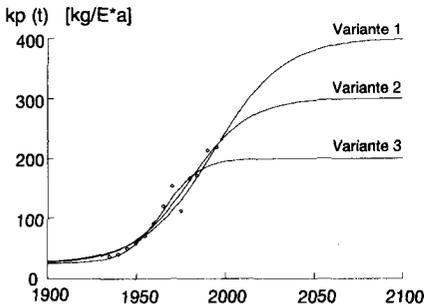
#### Konsum von Papier KP (t)

Es wird angenommen, dass der Papierverbrauch in der Region KSM dem Schweizerischen Durchschnitt entspricht. In den Archiven des ZPK ("Entwicklung der Schweizerischen Papierindustrie") konnten zuverlässige Zahlen des Papierverbrauches ab dem Jahr 1935 gefunden werden. Weitere Dokumente ("Total der Monatsstatistiken") weisen Produktionsmengen - welche relativ gut mit den Konsummengen übereinstimmen - gehen bis ins Jahr 1917 zurück, weisen gegenüber den "Entwicklungen in der Papierindustrie" bis zu drei mal kleinere Werte auf. Es ist anzunehmen, dass darin nur die dem Verband angeschlossenen Papierproduzenten erfasst wurden.

Für ein logistisches Wachstum des Papierverbrauches wird folgender Ansatz aufgestellt:

$$kp(t) = kp_0 + \frac{kp_\infty - kp_0}{1 + e^{-\alpha(t-T^*)}} \quad (B18)$$

Die Parameter werden durch nichtlineare Regression ermittelt. Der Sockelwert  $kp_0$  und der Endwert  $kp_\infty$  werden für drei Varianten vorgegeben (einpendeln des Papierverbrauches auf 200, 300 und 400 kg/E\*a). Durch proben von verschiedenen  $T^*$  können die zugehörigen Werte  $\alpha$  mit Hilfe des Quasi-Newton-Verfahrens berechnet werden (Tab. B13).



**Abb. B11:** Entwicklung des Pro-Kopf-Papierverbrauches in der Schweiz und Annäherung durch 3 Varianten von logistischen Wachstumskurven. Die Daten stammen aus den Archiven des ZPK.

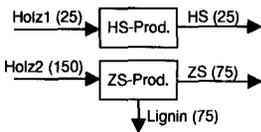
**Tab. B13:** Parameter zur Beschreibung des Pro-Kopf-Papierverbrauches mit der Funktion (B18), ermittelt durch nichtlineare Regression.

	$k_{p0}$	$k_{p\infty}$	$T^*$	$\alpha$
Variante 1	25	400	1990	0.053
<b>Variante 2</b>	<b>25</b>	<b>300</b>	<b>1980</b>	<b>0.061</b>
Variante 3	25	200	1965	0.099

### Lignin aus Papierholz: $k_{3-7-10}(t)$

Als Frischfaserstoffe dienen Zellstoff (heute in der Schweiz ca. 75%) und Holzschliff bzw. TMP (ca. 25%). Zur Zellstoffproduktion wird in DER Schweiz meist das Sulfitverfahren angewandt, bei dem das Lignin aus den Holzschnitzeln mit Bisulfit-Säure unter Druck herausgelöst wird. Die Ausbeute an Zellulose beträgt ca. 50% der eingesetzten Holzmenge (BOLLIGER 1992). Dagegen wird bei der Holzschliffproduktion bzw. dem TMP-Verfahren das gesamte Lignin in die Faserstoffe transferiert. Unter der vereinfachten Annahme, dass das Verhältnis von Zellstoff und Holzschliff konstant bleibt, gilt

$$k_{3-7-10}(t) = 75/175 = 0.43$$

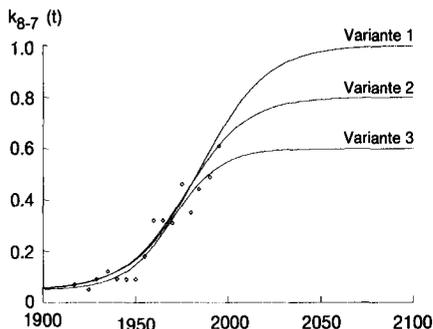


**Abb. B12:** Ligninanfall bei der Holzschliff- (HS) und Zellstoff- (ZS) Herstellung.

### Recyclingrate von Papier $k_{8-7}(t)$

Für die Entwicklung der Recyclingrate wird ein logistischer Ansatz verwendet (B14). Er wird so formuliert, dass ein Sockelwert ( $k_0$ ) und ein Endwert ( $k_\infty$ ) vorgegeben werden können.

$$k_{8-7}(t) = k_0 + \frac{k_\infty - k_0}{1 + e^{-\alpha \cdot (t - T^*)}} \quad (\text{B19})$$



**Abb. B13:** Recyclingrate von Papier in der Schweiz. Die Daten stammen aus den Archiven des ZPK. Die Recyclingraten vor 1960 sind geschätzt aufgrund des Altpapieranteiles derjenigen Firmen, welche damals im ZPK vertreten waren (nur ca. 30%).

**Tab. B14:** Parameter zur Beschreibung der Recyclingrate mit Hilfe der Formel (B19).  $k_0$  und  $k_\infty$  wurden vorgegeben,  $\alpha$  wurde durch probieren mit verschiedenen  $T^*$  mit Hilfe des Quasi-Newton-Verfahrens berechnet.

	$k_0$	$k_\infty$	$T^*$	$\alpha$
Variante 1	0.05	1.0	1985	0.056
<b>Variante 2</b>	<b>0.05</b>	<b>0.8</b>	<b>1977</b>	<b>0.061</b>
Variante 3	0.05	0.6	1970	0.077

### Thermische Verwertung von Altpapier $k_{8-10}(t)$

Neben einigen Grossverteilern (Migros und Coop) und seit 1997 der Swissair (total 15'000 t TS/CH\*a = 2 kg TS/E\*a) werden in der Schweiz keine grösseren Mengen an Altpapier in Feuerungen verwertet (VOCK 1997). Das in den KVA's verbrannte Altpapier wird nicht als Brennaltpapier gerechnet, da diese primär eine stoffliche Optimierung der Feuerung anstreben. Für die Zeitspanne 1900-2000 wird ein konstanter Transferkoeffizient angenommen:

$$k_{8-10}(t) = 0$$

### B3.5 Holz- und Altholzwirtschaft $k_{3-10}(t)$ , $k_{9-3}(t)$ , $k_{9-10}(t)$ , $H_o(\text{Holz})$ , $H_u(\text{Holz})$

#### Energetisch genutztes Restholz $k_{3-10}(t)$

Unter Restholz werden hier Nebenprodukte der Holzverarbeitung verstanden, welche energetisch genutzt werden. Im Modell wird der Ansatz gemacht, dass

das Restholz proportional zur total verarbeiteten Holzmenge ist. Gesamt-schweizerisch wurden im Jahr 1995 2756 m<sup>3</sup> Endholzprodukte hergestellt, welche einen Restholzfluss von 751 m<sup>3</sup> verursachten (BFS 1996). Daraus errechnet sich ein Transferkoeffizient von 0.21. Es wird angenommen, dass dieses Verhältnis konstant ist:

$$k_{3-10}(t) = 0.2$$

### Altholzrecycling $k_{9-3}(t)$

Man unterscheidet zwei Arten von stofflichem Altholzrecycling: die direkte Wiederverwendung von wertvollen Hölzern (z.B. zur Restauration von alten Kirchen) und die Verwertung in der Spanplattenproduktion. (STAHEL 1991) schätzen die direkte Wiederverwendung in der Schweiz zu Beginn der 80er-Jahre auf 0.6 kg TS/E\*a. Zur Spanplattenherstellung werden zwischen 7-20 kg TS/E\*a Altholz aus der Schweiz nach Italien exportiert (VOCK 1997a). In der Schweiz verwendet heute kein Spanplattenhersteller Altholz als Sekundärrohstoff. Bei einem totalen Altholzaufkommen von 100 kg TS/E\*a (VOCK 1997a) beträgt damit die Recyclingrate heute rund 0.07-0.2.

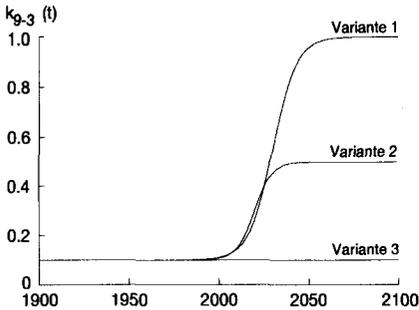
Über das Altholzrecycling zu Beginn dieses Jahrhunderts können nur sehr grobe Schätzungen gemacht werden. Während die direkte Wiederverwendung bedeutender gewesen sein dürfte, war damals die Verwertung in Spanplattenwerken noch nicht möglich. Insgesamt dürfte die Recyclingrate noch kleiner gewesen sein als heute.

Da es sich um relativ kleine Mengen handelt, wird der vereinfachte Ansatz gemacht, dass die Recyclingrate in diesem Jahrhundert konstant war.

$$k_{9-3}(t) = k_0 + \frac{k_\infty - k_0}{1 + e^{-\alpha*(t-T^*)}} \quad (\text{B20})$$

**Tab. B15:** Parameter zur Beschreibung der Recyclingrate mit Hilfe der Formel (B15).  $k_0$  und  $k_\infty$  wurden vorgegeben,  $\alpha$  wurde durch probieren mit verschiedenen  $T^*$  mit Hilfe des Quasi-Newton-Verfahrens berechnet.

	$k_0$	$k_\infty$	$\alpha$	$T^*$
Variante 1	0.1	1.0	0.15	2030
Variante 2	0.1	0.5	0.2	2020
<b>Variante 3</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>	<b>0.25</b>	<b>2010</b>



**Abb. B14:** Drei Varianten der Entwicklung der Altholzrecyclingrate.

### Energetische Verwertung von Altholz $k_{9-10}$ (t)

Bis zu Beginn der 90er-Jahre bestand praktisch kein Markt für Altholz. In der Regel wurde es auf wilden Deponien abgelagert oder verbrannt. Die energetisch verwerteten Anteile können daher nur sehr grob abgeschätzt werden (Tabelle B16). Das in der KVA's verbrannte Altholz wird aus den gleichen Gründen wie das Altpapier (Kapitel B4.2) nicht als Brennholz gerechnet. Nicht inbegriffen ist ferner das "inoffizielle" Altholz, welches in kleineren privaten Feuerungen verbrannt wird (VOCK 1997b).

**Tab. B16:** Entwicklung des Anteiles an Brennholz gemessen am gesamten Altholzanfall in der Schweiz. Die Daten stammen aus (VOCK 1997a). Die kursiv gedruckten Zahlen sind Annahmen.

	1990	1993	1996
Brennholz Schweiz (t/a)	34'000	58'000	114'000
(kg TS/E*a)	5	8	16
Total Altholz Schweiz (kg TS/E*a)	700'000	700'000	700'000
(kg TS/E*a)	100	100	100
$k_{9-10}$	0.05	0.08	0.16

Für die energetische Altholzverwertung wird ein logistisches Wachstum angenommen:

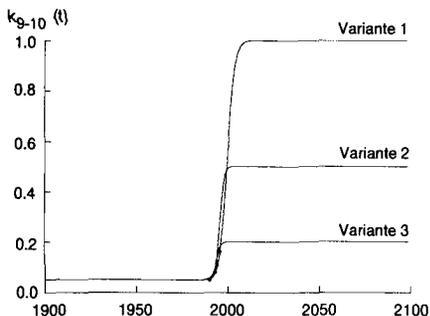
$$k_{9-10}(t) = k_0 + \frac{k_\infty - k_0}{1 + e^{-\alpha(t-T^*)}} \quad (B21)$$

Es gilt aber in jedem Fall die Randbedingung

$$k_{9.3}(t) + k_{9-10}(t) \leq 1 \quad (B22)$$

**Tab. B17:** Parameter zur Beschreibung der Rate der thermischen Verwertung von Altholz mit Hilfe der Formel (B16).  $k_0$  und  $k_\infty$  wurden vorgegeben,  $\alpha$  wurde durch probieren mit verschiedenen  $T^*$  nach dem Quasi-Newton-Verfahren berechnet.

	$k_0$	$k_\infty$	$\alpha$	$T^*$
Variante 1	0.05	1.0	0.507	2000
Variante 2 (Szen. 2)	0.05	0.5	0.884	1996
<b>Variante 3</b>	<b>0.05</b>	<b>0.2</b>	<b>0.624</b>	<b>1993</b>



**Abb. B15:** Anteil des energetisch verwerteten Altholzes für drei Varianten.

Heizwerte  $H_o(\text{Holz})$ ,  $H_u(\text{Holz})$

Der obere und der untere Heizwert werden wie folgt gewählt:

$$H_o(\text{Holz}) = 17 \text{ MJ/kg}$$

$$H_u(\text{Holz}) = 15 \text{ MJ/kg}$$

## B4 Energieversorgung

### B4.1 Forstwirtschaft $e_{FW} (t)$ , $\alpha_{FW} (t)$

Energieverbrauch der Forstwirtschaft  $e_{FW} (t)$

Je nach Ernteverfahren werden unterschiedliche Energieverbräuche verursacht (Tab. B18).

**Tab. B18:** Energieverbrauch der Forstwirtschaft in der Region KSM, aufgeteilt nach unterschiedlichen Ernteverfahren.

	Anteil in KSM <sup>8</sup> [%]	spez. E.verbr. <sup>9</sup> [MJ/m <sup>3</sup> ]	total [MJ/m <sup>3</sup> ]	total [MJ/kg TS]
Helikopter	0	380	0	0
Mobilseilkran	10	170	17	0.03
Konvent. Seilkran	0	110	0	0
Motormanuell	70	110	77	0.14
Vollmechanisiert	20	90	18	0.03
<b>total</b>	<b>100</b>		<b>112</b>	<b>0.2</b>

Annahme:  $e_{FW}(t) = 0.2 \text{ MJ/kg TS}$

Holzenergie in der Forstwirtschaft  $\alpha_{FW}(t)$

Annahme:  $\alpha_{FW}(t) = 0$

#### B4.2 Holzwirtschaft $e_{HW}(t)$ , $\alpha_{HW}(t)$

Energieverbrauch der Holzwirtschaft  $e_{HW}(t)$

Die bisher ausführlichste Untersuchung zum Energieverbrauch der Holzverarbeitung wurde Mitte der 80-er-Jahre in Deutschland durchgeführt (RESSEL 1986, vgl. Tabelle B19). Danach liegt der spezifische Energieverbrauch der Holzverarbeitung bei 3.6 MJ/kg TS. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts dürfte der spezifische Energieverbrauch näher bei Schnittholz gelegen haben, also bei rund 1 MJ/kg TS. In Unkenntnis des genaueren Verlaufes wird ein logistisches Wachstum angenommen.

$$e_{HW}(t) = e_{HW_0} + \frac{e_{HW_\infty} - e_{HW_0}}{1 + e^{-\alpha(t-T^*)}} \quad (\text{B21})$$

Die Anzahl bekannter Punkte (2) reicht damit nicht aus, um die Parameter (4) genau zu bestimmen. Trotzdem können plausible Verläufe angenommen werden, indem neben dem Sockelwert  $e_{HW_0}$  verschiedene Endwerte  $e_{HW_\infty}$  sowie eine Steigung  $\alpha$  angenommen werden.  $T^*$  wird dann durch anpassen der Kurve an den Punkt  $e_{HW}(2000) = 3.6 \text{ MJ/kg TS}$  ermittelt.

<sup>8</sup> Die Anteile in der Untersuchungsregion KSM wurden mit Hilfe von (HÄNGGLI 1997) grob abgeschätzt.

<sup>9</sup> Die spezifischen Energieverbräuche für Helikopter, Mobilseilkran und konventionellen Seilkran stammen aus (WINKLER 1997), jene für Bodenseilzug und Forwarder aus (KNECHTLE 1997).

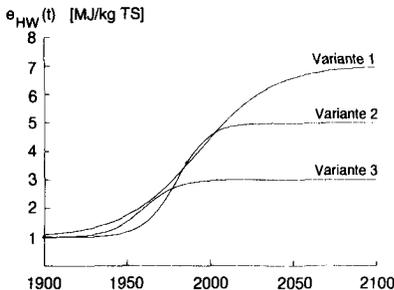
## Anhang B: Kalibrierung und Validierung

**Tab. B19:** Energieverbrauch der deutschen Holzverarbeitung. Die Rohdaten stammen von (RESSEL 1986). Die Spanplattenherstellung verursacht zwei Drittel des gesamten Energieverbrauches der Holzverarbeitung.

Produktion	Menge (D, 1985) [Mio m <sup>3</sup> /a]	el. Energie [MJ/m <sup>3</sup> ]	therm. Energie [MJ/m <sup>3</sup> ]	total Pri- mär-En. <sup>10</sup> [MJ/m <sup>3</sup> ]	total Pri- mär-E. <sup>11</sup> [MJ/kgTS]	total D [PJ/a]
Schnittholz <sup>12</sup>	9.7	120	290	610	1.1	5.9
Hobelwaren	1.5	110	-	290	0.5	0.4
Holzleimbaut.	0.3	410	3'020	4'100	7.5	1.2
Furnier	0.2	1'150	9'950	13'000	23.6	2.6
Sperrholz	0.3	650	4'170	5'900	10.7	1.8
Spanplatten	6.0	500	2'700	4'000	7.3	24
Durchschnitt		270	1290	2000	<b>3.6</b>	$\Sigma=36$

**Tab. B20:** Parameter zur Beschreibung des spezifischen Energieverbrauches der Holzwirtschaft mit Hilfe von Formel (B23).  $e_{HW0}$  und  $e_{HW\infty}$  wurden vorgegeben. Durch Einsetzen und Proben unterschiedlicher  $T^*$  konnte mit Hilfe des Quasi-Newton-Verfahrens das zugehörige  $\alpha$  berechnet werden. Die Variante 3 wurde von Hand bestimmt.

	$e_{HW0}$	$e_{HW\infty}$	$T^*$	$\alpha$
Variante 1	1	7	1993	0.045
<b>Variante 2</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>1980</b>	<b>0.103</b>
Variante 3	1	3	1960	0.1



**Abb. B16:** Abschätzung des spezifischen Energieverbrauches der Holzverarbeitung, angenähert durch drei logistische Verläufe gemäss Formel (B23).

<sup>10</sup> Umrechnung Strom auf Primärenergie: Faktor 2.65 entspricht Wirkungsgrad von 37.8% (Strommix nach UCPTE 1988).

<sup>11</sup> Annahme: 550 kg TS/m<sup>3</sup>

<sup>12</sup> Annahme: 25% des Schnittholzes werden technisch getrocknet. (Vgl. Ressel S. 127).

### Holzenergie in der Holzwirtschaft $\alpha_{HW}(t)$

Nach Tab. B19 macht der thermische Energieverbrauch rund 65% des totalen Primärenergieverbrauches aus (2.3 MJ/kg TS). Rund 70% des thermischen Energieverbrauches entfallen auf die Spanplattenproduktion. Diese setzt dafür rund 90-95% Holz als Energieträger ein (LAUBRUGG 1997). Rechnet man bei den übrigen Holzverarbeitenden Betrieben mit einem Anteil von 80% Holzenergie an der thermischen Energie, so ergibt dies total:

$$\alpha_{HW}(t) = 0.58$$

### B4.3 Papierwirtschaft $e_{RP}(t)$ , $e_{FF}(t)$ , $\alpha_{PW}(t)$

#### Energieverbrauch pro eingesetztem Recyclingpapier $e_{RP}(t)$ , $e_{FF}(t)$

In einer Schweizer Papierfabrik werden im Jahr 1996 folgende Energiemengen zur Altpapieraufbereitung aufgewendet (MONTANGERO et al.1997):

1.05 MJ/kg Strom

0.79 MJ/kg Thermische Energie

Bei einem Wirkungsgrad der Stromproduktion von 37.8% (Strom-Mix der UCPTTE 88) ergibt sich für die Faserstoffgewinnung ein Primärenergieaufwand von 3.6 MJ/kg. Die beiden Papiermaschinen haben folgende Verbräuche:

PM1: 2.9 MJ/kg Strom (= 7.6 MJ/kg Primärenergie)

8.1 MJ/kg thermische Energie

total PM1: 15.7 MJ/kg

PM5: 2.5 MJ/kg Strom (= 6.5 MJ/kg Primärenergie)

5.7 MJ/kg thermische Energie

total PM5: 12.2 MJ/kg

Annahme:  $e_{RP}(t) = 16$  MJ/kg

#### Energieverbrauch pro eingesetztem Frischfaserstoff:

Faserstoffgewinnung aus Thermomechan. Pulp (TMP) (MONTANGERO 1997):

5.8 MJ/kg Strom (= 15.2 MJ/kg Primärenergie nach UCPTTE 88-Mix)

0.3 MJ/kg thermische Energie

total: 15.5 MJ/kg

Annahme:  $e_{FF}(t) = 28$  MJ/kg

### Holzenergie in der Papierwirtschaft $\alpha_{PW}(t)$

Die Perlen Papier AG setzte 1996 für die Energieversorgung rund 32% Abfälle ein (1992: 21%), wobei Holz den dominanten Anteil ausmacht (MONTANGERO 1997). Wird der Strombedarf gemäss dem UCPTTE-Mix auf Primärenergie umgerechnet, so beträgt der Anteil der Abfälle 18% (1996) bzw. 12% (1992). Für den

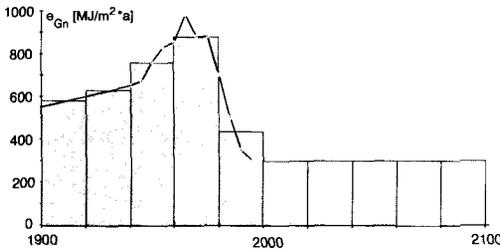
gesamten Zeitraum von 1900 bis 2000 wird mit einem konstanten Wert gerechnet.

$$\alpha_{pW}(t) = 0.1$$

#### B4.4 Gebäudebetrieb $e_{Gn}(t)$ , $\alpha_{Gn}(t)$

##### Wärmeenergieverbrauch für Gebäudebetrieb $e_{Gn}(t)$

Die Entwicklung der Energiekennzahl Wärme (Heizung und Warmwasser) für Mehrfamilienhäuser ist in Abb. B17 ersichtlich. Für Einfamilienhäuser und Gebäude der Aktivität Arbeiten sind keine entsprechenden Zeitreihen verfügbar. In einer umfassenden Untersuchung zu Beginn der 80er-Jahre (WICK 1983) lag die durchschnittliche Energiekennzahl Wärme der Einfamilienhäuser um ca. 1.2% über dem Wert der Mehrfamilienhäuser. Die Mittelwerte für Verwaltungsgebäude, Schulen, Verkaufsläden und Lager-/Werkstattgebäude streuten dagegen zwischen -30% und +10% gegenüber den Mehrfamilienhäusern. Zur Abschätzung des gesamten Wärmeenergieverbrauches von Gebäuden wird die Annahme getroffen, dass die Energiekennzahl Wärme für den gesamten Gebäudepark demjenigen der Mehrfamilienhäuser entspricht.



**Abb. B17:** Energiekennzahl Wärme von Mehrfamilienhäusern nach Baujahr gemäss (Wick 1983, 1991). Die Energiekennzahlen werden angenähert durch konstante Werte pro Gebäudeklasse. Die angenommenen Werte nach 2000 entsprechen für die Standardvariante dem Wert um 1995.

**Tab. B21:** Energiekennzahlen Wärme  $e_{G,n}$  [MJ/m²\*a]. Der Wert der Jahrgangsklasse 1 wird durch Extrapolation geschätzt.

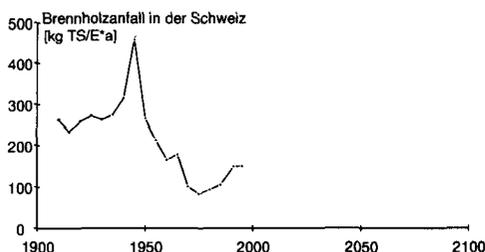
Jahrgangs- klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	-1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
Variante 1	500	580	610	740	850	400	300	300	300	300	300
Variante 2	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850
Variante 3	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150

## Holzenergie für Gebäudebetrieb $\alpha_{Gn}$ (t)

Der Anteil Holzenergie an der Gebäudewärmeversorgung kann auf drei Arten abgeschätzt werden:

1. Aus der Entwicklung des gesamtschweizerischen Brennholzanfalles (BEW 1987) (Abb. B18) und der Entwicklung der Jahrgangsklassen sowie den Wärmeenergieverbräuchen pro Jahrgangsklasse.
2. Aus dem Brennholzanfall in KSM gemäss Modellrechnungen aus XYLOIKOS und der Entwicklung der Jahrgangsklassen sowie den Wärmeenergieverbräuchen pro Jahrgangsklasse.
3. Aus dem heutigen Brennholzanfall und einer Annahme zur Verteilung auf die Jahrgangsklassen.

Bei allen Ansätzen wird angenommen, dass der Brennholzanfall auch dem Brennholzkonsum entspricht. Da der Brennholzenergieverbrauch einer Jahrgangsklasse im Modell konstant ist, sich aber die Werte in der Realität infolge Gebäudesanierungen verändert hat, verschieben sich die Werte je nach dem gewählten Ansatz. Die ersten beiden Ansätze gehen davon aus, dass der Energieverbrauch dem Zustand beim Neubau entsprechen. Der dritte Ansatz eicht den Energieverbrauch am heutigen Gebäudebestand. Um möglichst gute Resultate für die Simulation der künftigen Entwicklung zu erhalten, wird der dritte Ansatz gewählt, wobei zur Abschätzung der Verteilung auf die Jahrgangsklassen die ersten beiden Ansätze zur Unterstützung beigezogen werden. Damit wird der Brennholzverbrauch zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Modell tendentiell zu klein.



**Abb. B18:** Entwicklung der gesamten Pro-Kopf-Brennholzmenge aus Forstwirtschaft, 1. und 2. Verarbeitungsstufe. Die Daten stammen aus (BEW 1987, PLANCONSULT 1993, BFS 1996).

**Tab. B22:** Anteil Holzenergie zur Gebäudewärmeversorgung  $\alpha_{G,n}$ . Die Werte der älteren Jahrgangsklassen sind geeicht auf den heutigen Verbrauch.

Jahrgangs- klasse	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	<1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
<b>Variante 1</b>	0.08	0.07	0.02	0.02	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Variante 2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Variante 3	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005

### B4.5 Solarenergie $G(t)$ , $\eta_{SK,n}(t)$ , $\beta_{FSK/FGn}(t)$

#### Globalstrahlung $G(t)$

Abbildung B19 zeigt den Jahresverlauf der Globalstrahlung am Beispiel Olten, das als repräsentativ für das gesamte KSM-Gebiet betrachtet werden kann. (ME-TEOTEST 1995) Die Globalstrahlung wird durch das Jahresmittel approximiert.

$$G(t) = 1083 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a} = 3900 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$$

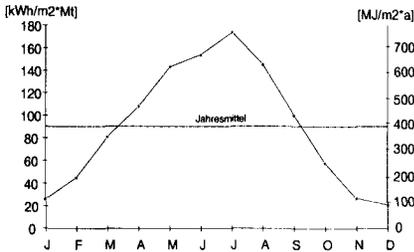


Abb. B19: Strahlungssumme der Globalstrahlung pro Monat für Olten.

#### Jahreswirkungsgrad Sonnenkollektoren $\eta_{SK,n}(t)$

Annahme:  $\eta_{SK,1}(t) = \eta_{SK,2}(t) \dots = \eta_{SK,n_{Geb}}(t) = \eta_{SK} = 0.25$

#### Sonnenkollektorfläche $\beta_{FSK/FGn}(t)$

Die durchschn. Geschoszahl aller Wohngebäude der Schweiz beträgt 2.5 (GABATHULER 1984). Da für die Arbeitsgebäude keine analoge Zahl bekannt ist, wird für den gesamten Gebäudepark mit 2.5 Geschosse pro Gebäude gerechnet. Die (horizontale) Dachfläche beträgt dementsprechend  $0.4 \cdot FG$ . Damit gilt die Randbedingung

$$\beta_{FSK/FGn}(t) \leq 0.4 \tag{B24}$$

Tab. B23: Verhältnis Sonnenkollektorflächen zu Bruttogeschossfläche in den 11 Jahrgangsklassen.

Jahrgangs- klasse	1 <1900	2 -1920	3 -1940	4 -1960	5 -1980	6 -2000	7 -2020	8 -2040	9 -2060	10 -2080	11 -2100
Variante 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Variante 2	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Variante 3	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

# **Anhang C: Szenarien**

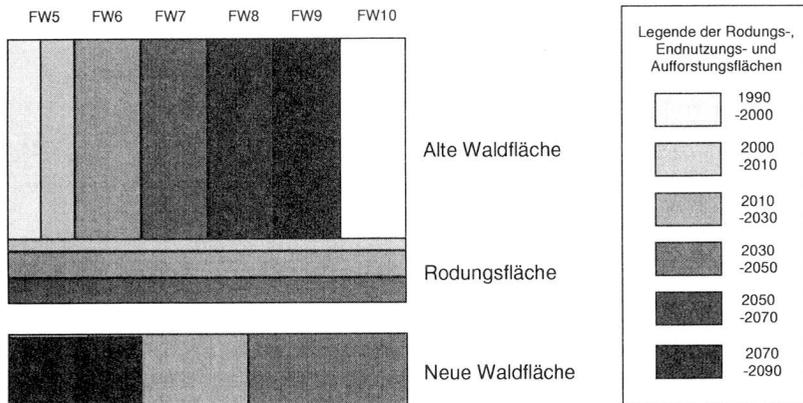
<b>C1 Szenarien "Umbau Wald" (S1) .....</b>	<b>C-2</b>
C1.1 Schneller Umbau des Waldes von 2000-2010 (S1.1) .....	C-2
C1.2 Langsamer Umbau des Waldes von 2000-2050 (S1.2).....	C-3
<b>C2 Szenarien "Umbau Gebäudepark" (S2).....</b>	<b>C-4</b>

## C1 Szenarien "Umbau Wald" (S1)

### C1.1 Schneller Umbau des Waldes von 2000-2010 (S1.1)

Die heutige Waldflächenanordnung soll von 2000-2010 übergeführt werden in die Waldflächenanordnung des Entwurfes "City-Forest-Web". Es gibt unendlich viele Möglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen. Die gewählte Variante basiert auf folgenden Annahmen:

1. Die zu rodende Waldfläche weist eine gleichförmige Altersstruktur auf.
2. Lineare Rodung und lineare Aufforstung: Pro Jahr wird ein Zehntel der zu rodenden Fläche gefällt bzw. ein Zehntel der aufzuforstenden Fläche neu bestockt.
3. Der durch den Eingriff gestörte Aufbau der Altersstruktur wird sofort wieder übergeführt in einen Wald mit ausgeglichener Altersstruktur (sture Anwendung des Altersklassenmodelles).

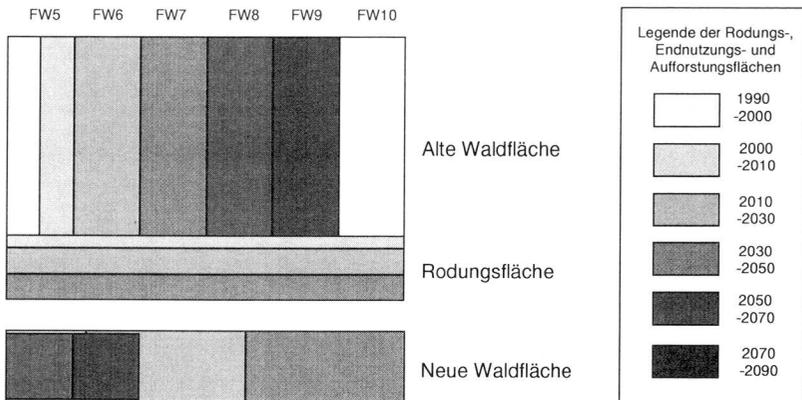


**Abb. C1.1:** Schematische Darstellung des Waldumbaus.

## C1.2 Langsamer Umbau des Waldes von 2000-2050 (S1.2)

Die heutige Waldflächenanordnung soll von 2000-2050 übergeführt werden in die Waldflächenanordnung des Entwurfes "City-Forest-Web". Es gibt unendlich viele Möglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen. Die gewählte Variante basiert auf folgenden Annahmen:

1. Die zu rodende Waldfläche weist eine gleichförmige Altersstruktur auf.
2. Lineare Rodung und lineare Aufforstung: Pro Jahr wird ein Fünfzigstel der zu rodenden Fläche gefällt bzw. ein Fünfzigstel der aufzuforstenden Fläche neu bestockt.
3. Der durch den Eingriff gestörte Aufbau der Altersstruktur wird sofort wieder übergeführt in einen Wald mit ausgeglichener Altersstruktur (Sture Anwendung des Altersklassenmodelles).



**Abb. C1.2:** Schematische Darstellung des Waldumbaus in 50 Jahren.

## C2 Szenarien "Umbau Gebäudepark" (S2)

Der Gebäudepark soll so umgebaut werden, dass er bis im Jahr 2050 aus regional verfügbaren, erneuerbaren Energieträgern betrieben werden kann.

Annahmen:

- Als Energieträger werden Holz (Brennholz und Brennaltholz) sowie Sonnenkollektoren auf der Dachfläche der Solargebäude eingesetzt.
- Die energetische Verwertung von Altholz  $k_{9,3}(t)$  steigt in den nächsten Jahren von ca. 15% auf 50% an und wird zur Gebäudeheizung eingesetzt (Variante 2 in Anhang B35).
- Eine Reduktion des Energiebedarfes zum Gebäudebetrieb kann nur durch eine andere Konstruktionsweise erzielt werden. XYLOIKOS kann keine energetischen Gebäuderenovationen erfassen. Diese können zwar den Energiebedarf in vielen Fällen stark senken<sup>1</sup>, ein solarer Betrieb ist aber dadurch in der Regel noch nicht möglich.
- Die Parameter werden von heute bereits existierenden Niedrigenergiehäusern entnommen.
- Die Holzdicke der Gebäude (man, mkn) bleiben künftig unverändert.
- Die Entwicklung der Pro-Kopf-Gebäudefläche wird nicht beeinflusst (wie bei Standardszenario).

Es werden drei Umbaustrategien in Form von Szenarien betrachtet:

1. Standardszenario S0: Fortführung des Trendes.
2. Szenario 2.1: Abwarten bis 2040 und schneller Umbau von 2040-2050.
3. Szenario 2.2: Gezielter, langsamerer Umbau 2000-2050.

---

<sup>1</sup> In den Gebäuden aus den 50er bis 70er-Jahren kann durchschnittlich etwa mit einer Halbierung des Energieverbrauches gerechnet werden (Bukowiecki...).

## Anhang C: Szenarien

**Tab. C3.1:** Durchschnittliche Lebensdauer der Gebäude  $\tau_{G,n}$ :

A-Kl.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	-1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
S0	100 ±30										
S1	100 ±30	100 ±30	100 ±30	90 ±25	70 ±20	50 ±15	30 ±10	10 ±3	100 ±30	100 ±30	100 ±30
S2	100 ±30	90 ±25	80 ±22	70 ±20	60 ±18	50 ±15	100 ±30	100 ±30	100 ±30	100 ±30	100 ±30

**Tab. C3.2:** Energiekennzahl Wärme  $e_{G,n}$ :

A-Kl.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	-1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
S0	500	580	610	740	850	400	300	300	300	300	300
S1	500	580	610	740	850	400	300	300	130	130	130
S2	500	580	610	740	850	400	130	130	130	130	130

**Tab. C3.3:** Sonnenkollektorfläche pro Bruttogeschossfläche  $\beta_{FSKn/FGn}$ :

A-Kl.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	-1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
S0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1
S2	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

**Tab. C3.4:** Anteil Holzenergie an der Gebäudeheizung  $\alpha_{G,n}$ :

A-Kl.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	-1900	-1920	-1940	-1960	-1980	-2000	-2020	-2040	-2060	-2080	-2100
S0	0,12	0,12	0,12	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
S1	0,12	0,12	0,12	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01	0,23	0,23	0,23
S2	0,2	0,12	0,12	0,06	0,01	0,01	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23

Solargebäude am Bsp. Haus P. Reichert

FG = 200m<sup>2</sup> BGF

## Anhang C: Szenarien

### Energieverbrauch:

- Warmwasser: **100 MJ/m<sup>2</sup>\*a** (geschätzt aus CH Durchschnitt)  
kann übers Jahr gerade etwa abgedeckt werden mit Kollektorfläche: 18.2 m<sup>2</sup>  
(Exposition WSW, Neigung ca. 40°)  
-> Leistung der Kollektoren = 1100 MJ/m<sup>2</sup>\*a  
-> Wirkungsgrad der Kollektoren: 1100/3900 = 28%
- Heizung: übers Jahr gesehen ausschliesslich mit Holz:  
5-6 Ster Harth. = 2000-2500 kg TS/a = 30-40'000 MJ/a = **150-200 MJ/m<sup>2</sup>\*a**

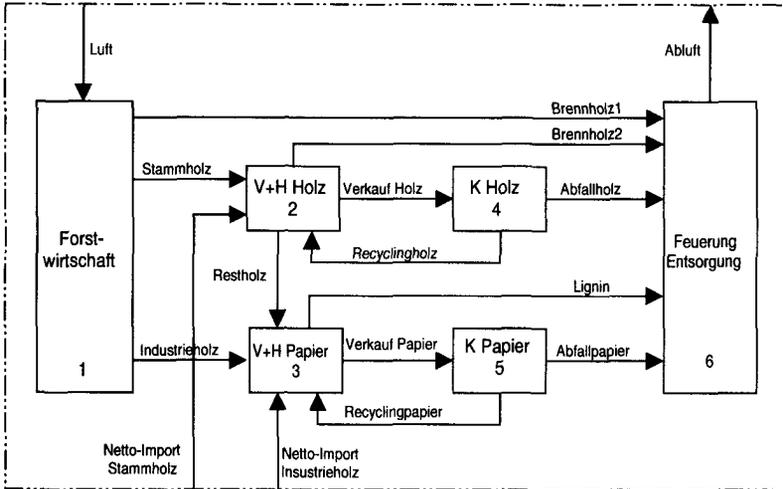
### Bemerkung zum Haus:

- keine Wärmerückgewinnungsanlagen
- Wärmeversorgung:  
April - September: Heisswasser ausschl. aus SK, keine Heizung erf.  
Okt. und März: Heisswasser ausschl. aus SK, Heizung mit Holz und SK  
Nov. - Feb.: Heisswasser mit Holz und SK, Heizung ausschl. mit Holz

# **Anhang D: Mathematische Beschreibung des quasistationären Modelles**

<b>D1 Systemstruktur .....</b>	<b>D-2</b>
<b>D2 Systemvariablen und Unbekannte.....</b>	<b>D-3</b>
<b>D3 Systemgleichungen .....</b>	<b>D-3</b>
D3.1 Bilanzgleichungen.....	D-3
D3.2 Modellansatz .....	D-3
<b>D4 Parameter.....</b>	<b>D-4</b>
<b>D5 Auflösung des Gleichungssystems nach den Systemvariablen.....</b>	<b>D-5</b>
<b>D6 Berechnung der Parameter .....</b>	<b>D-6</b>
<b>D7 Fehlerrechnung .....</b>	<b>D-6</b>

## D1 Systemstruktur



**Abb. D1:** Systemstruktur des regionalen Holzhaushaltes für das quasistationäre Modell.

Legende:

**Forstwirtschaft** = Wald innerhalb der Region und dessen Bewirtschaftung, **V+H Holz** = Verarbeitung und Handel mit Holz der in SYNOIKOS konsumierten Holzprodukte, **V+H Papier** = Verarbeitung und Handel mit Papier und Rohstoffen zur Papierproduktion der in SYNOIKOS konsumierten Papierprodukte, **K Holz** = Konsum von Holzprodukten in der Region, **K Papier** = Konsum von Papierprodukten innerhalb der Region, **Feuerung / Entsorgung** = Anlagen zur Verfeuerung oder Entsorgung von Holz- und Papier.

## D2 Systemvariablen und Unbekannte

Lager:	$M^{(1)}, M^{(2)}, M^{(3)}, M^{(4)}, M^{(5)}, M^{(6)}$	6
Lagerveränderungen:	$\dot{M}^{(1)}, \dot{M}^{(2)}, \dot{M}^{(3)}, \dot{M}^{(4)}, \dot{M}^{(5)}, \dot{M}^{(6)}$	6
Flüsse:	$A_{71}, A_{12}, A_{13}, A_{16}, A_{42}, A_{72}, A_{23}, A_{24}, A_{26},$ $A_{53}, A_{73}, A_{35}, A_{36}, A_{46}, A_{56}, A_{67}$	<u>16</u>
total Unbekannte		28

## D3 Systemgleichungen

### D3.1 Bilanzgleichungen

- 1)  $\dot{M}^{(1)} = A_{71} - A_{12} - A_{13} - A_{16}$
- 2)  $\dot{M}^{(2)} = A_{12} + A_{42} + A_{72} - A_{23} - A_{24} - A_{26}$
- 3)  $\dot{M}^{(3)} = A_{13} + A_{23} + A_{53} + A_{73} - A_{35} - A_{36}$
- 4)  $\dot{M}^{(4)} = A_{24} - A_{42} - A_{46}$
- 5)  $\dot{M}^{(5)} = A_{35} - A_{53} - A_{56}$
- 6)  $\dot{M}^{(6)} = A_{16} + A_{26} + A_{36} + A_{46} + A_{56} - A_{67}$

### D3.2 Modellansatz

- 7)  $M^{(1)} = M_0^{(1)} = MW$  (Randbedingung)
- 8)  $M^{(2)} = 0$
- 9)  $M^{(3)} = 0$
- 10)  $M^{(4)} = M_0^{(4)} = MH$  (Randbedingung)
- 11)  $M^{(5)} = M_0^{(5)} = MP$  (Randbedingung)
- 12)  $M^{(6)} = 0$
- 13)  $\dot{M}^{(2)} = 0$
- 14)  $\dot{M}^{(3)} = 0$
- 15)  $\dot{M}^{(6)} = 0$
- 16)  $A_{71} = ZW$

- 17)  $A_{12} + A_{13} + A_{16} = NW$
- 18)  $A_{24} = VH$
- 19)  $A_{35} = VP$
- 20)  $A_{42} + A_{46} = AH$
- 21)  $A_{12} = k_{012} * (A_{12} + A_{13} + A_{16})$
- 22)  $A_{13} = k_{013} * (A_{12} + A_{13} + A_{16})$
- 23)  $A_{23} = k_{23} * (A_{12} + A_{42} + A_{72})$
- 24)  $A_{26} = k_{26} * (A_{12} + A_{42} + A_{72})$
- 25)  $A_{36} = k_{s36} * (A_{13} + A_{23} + A_{73})$
- 26)  $A_{42} = k_{042} * (A_{42} + A_{46})$
- 27)  $A_{53} = k_{53} * A_{35}$
- 28)  $A_{56} = k_{56} * A_{35}$

## D4 Parameter

Die Parameter wurden so gewählt, dass sie möglichst den realen Steuerungsgrößen entsprechen. Sie werden im folgenden nochmals aufgelistet.

p1 = MW	= Holzlager im Wald (stehender Vorrat)
p2 = MH	= Holzlager in Konsumgütern (z.B. Konstruktionen)
p3 = MP	= Papierlager
p4 = ZW	= Zuwachs an Holz im Wald
p5 = NW	= (Holz-)Nutzung des Waldes
p6 = VH	= Holzverkauf
p7 = VP	= Papierverkauf
p8 = AH	= Altholz
p9 = $k_{012}$	= Transferkoeffizient bezüglich totalem Output
p10 = $k_{013}$	= "
p11 = $k_{23}$	= Transferkoeffizient
p12 = $k_{26}$	= "
p13 = $k_{042}$	= Transferkoeffizient bezüglich totalem Output
p14 = $k_{53}$	= Transferkoeffizient
p15 = $k_{56}$	= "
p16 = $k_{s36}$	= Transferkoeffizient bezüglich selektiven Inputflüssen ( $A_{13} + A_{23} + A_{73}$ )

## D5 Auflösung des Gleichungssystems nach den Systemvariablen

$$M^{(1)}(t) = MW + (ZW - NW) \cdot t$$

$$M^{(2)}(t) = 0$$

$$M^{(3)}(t) = 0$$

$$M^{(4)}(t) = MH + (VH - AH) \cdot t$$

$$M^{(5)}(t) = MP + (1 - k_{53} - k_{56}) \cdot VP \cdot t$$

$$M^{(6)}(t) = 0$$

$$A_{71} = ZW$$

$$A_{12} = k_{012} \cdot NW$$

$$A_{13} = k_{013} \cdot NW$$

$$A_{16} = (1 - k_{012} - k_{013}) \cdot NW$$

$$A_{42} = k_{042} \cdot AH$$

$$A_{72} = \frac{VH}{1 - k_{23} - k_{26}} - k_{012} \cdot NW - k_{042} \cdot AH$$

$$A_{23} = \frac{k_{23}}{1 - k_{23} - k_{26}} \cdot VH$$

$$A_{24} = VH$$

$$A_{26} = \frac{k_{26}}{1 - k_{23} - k_{26}} \cdot VH$$

$$A_{53} = k_{53} \cdot VP$$

$$A_{73} = \frac{1 - k_{53}}{1 - k_{53} - k_{56}} \cdot VP - \frac{k_{23}}{1 - k_{23} - k_{26}} \cdot VH - k_{013} \cdot NW$$

$$A_{35} = VP$$

$$A_{36} = \frac{k_{53} \cdot (1 - k_{53})}{1 - k_{53} - k_{56}} \cdot VP$$

$$A_{46} = (1 - k_{042}) \cdot AH$$

$$A_{56} = k_{56} \cdot VP$$

$$A_{67} = (1 - k_{012} - k_{013}) \cdot NW + \frac{k_{26} \cdot VH}{1 - k_{23} - k_{26}} + \left( k_{56} + \frac{k_{53} \cdot (1 - k_{53})}{1 - k_{53} - k_{56}} \right) \cdot VP + (1 - k_{042}) \cdot AH$$

## D6 Berechnung der Parameter

Siehe Tab. 3.1 und Anhang B

## D7 Fehlerrechnung

$$\left(\sigma_{M^{(1)}}\right)^2 = \left(\sigma_{MW}\right)^2 + t^2 * \left(\dot{M}^{(1)}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{ZW}\right)^2 + \left(\sigma_{NW}\right)^2}{\left(ZW - NW\right)^2} \right]$$

$$\left(\sigma_{M^{(2)}}\right)^2 = 0$$

$$\left(\sigma_{M^{(3)}}\right)^2 = 0$$

$$\left(\sigma_{M^{(4)}}\right)^2 = \left(\sigma_{MH}\right)^2 + t^2 * \left(\dot{M}^{(4)}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{VH}\right)^2 + \left(\sigma_{AH}\right)^2}{\left(VH - AH\right)^2} \right]$$

$$\left(\sigma_{M^{(5)}}\right)^2 = \left(\sigma_{MP}\right)^2 + t^2 * \left(\dot{M}^{(5)}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{VP}\right)^2}{\left(VP\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{k_{53}}\right)^2 + \left(\sigma_{k_{56}}\right)^2}{\left(1 - k_{53} - k_{56}\right)^2} \right]$$

$$\left(\sigma_{M^{(6)}}\right)^2 = 0$$

$$\left(\sigma_{A_{71}}\right)^2 = \left(\sigma_{ZW}\right)^2$$

$$\left(\sigma_{A_{12}}\right)^2 = \left(A_{12}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{NW}\right)^2}{\left(NW\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{k_{012}}\right)^2}{\left(k_{012}\right)^2} \right]$$

$$\left(\sigma_{A_{13}}\right)^2 = \left(A_{13}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{NW}\right)^2}{\left(NW\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{k_{013}}\right)^2}{\left(k_{013}\right)^2} \right]$$

$$\left(\sigma_{A_{16}}\right)^2 = \left(A_{16}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{NW}\right)^2}{\left(NW\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{k_{012}}\right)^2 + \left(\sigma_{k_{013}}\right)^2}{\left(1 - k_{012} - k_{013}\right)^2} \right]$$

$$\left(\sigma_{A_{42}}\right)^2 = \left(A_{42}\right)^2 * \left[ \frac{\left(\sigma_{AH}\right)^2}{\left(AH\right)^2} + \frac{\left(\sigma_{k_{42}}\right)^2}{\left(k_{042}\right)^2} \right]$$

Anhang D: Mathematische Beschreibung des quasistationären Modelles

$$(\sigma_{A_{72}})^2 = \left[ \frac{(A_{72})^2 * (1 - k_{23} - k_{26})^2}{(VH - (1 - k_{23} - k_{26}) * (k_{012} * NW + k_{042} * AH))^2} * \left( \frac{(\sigma_{VH})^2}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} + (k_{012})^2 * (\sigma_{NW})^2 + (k_{042})^2 * (\sigma_{AH})^2 + (NW)^2 * (\sigma_{k_{012}})^2 \right) + \frac{VH * ((\sigma_{k_{23}})^2 + (\sigma_{k_{26}})^2)}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} + (AH)^2 * (\sigma_{k_{042}})^2 \right]$$

$$(\sigma_{A_{23}})^2 = (A_{23})^2 * \left[ \frac{(\sigma_{VH})^2}{(VH)^2} + \frac{(1 - k_{26})^2 * (\sigma_{k_{23}})^2}{(k_{23})^2 * (1 - k_{23} - k_{26})^2} + \frac{(\sigma_{k_{26}})^2}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} \right]$$

$$(\sigma_{A_{24}})^2 = (\sigma_{VH})^2$$

$$(\sigma_{A_{26}})^2 = (A_{26})^2 * \left[ \frac{(\sigma_{VH})^2}{(VH)^2} + \frac{(\sigma_{k_{23}})^2}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} + \frac{(1 - k_{23})^2 * (\sigma_{k_{26}})^2}{(k_{26})^2 * (1 - k_{23} - k_{26})^2} \right]$$

$$(\sigma_{A_{53}})^2 = (A_{53})^2 * \left[ \frac{(\sigma_{VP})^2}{(VP)^2} + \frac{(\sigma_{k_{53}})^2}{(k_{53})^2} \right]$$

$$(\sigma_{A_{73}})^2 = \left[ \frac{(A_{73})^2}{\left( \frac{1 - k_{53} * VP - \frac{k_{23}}{1 - k_{23} - k_{26}} * VH - k_{013} * NW}{1 - k_{S36}} \right)^2} * \left( (k_{013})^2 * (\sigma_{NW})^2 + \left( \frac{k_{23}}{1 - k_{23} - k_{26}} \right)^2 * (\sigma_{VH})^2 + \left( \frac{1 - k_{53}}{1 - k_{S36}} \right)^2 * (\sigma_{VP})^2 + (NW)^2 * (\sigma_{k_{013}})^2 + \left( \frac{VH * (1 - k_{26})}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} \right)^2 * (\sigma_{k_{23}})^2 + \left( \frac{k_{23} * VH}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} \right)^2 * (\sigma_{k_{26}})^2 + \left( \frac{VP}{1 - k_{S36}} \right)^2 * (\sigma_{k_{53}})^2 + \left( \frac{VP * (1 - k_{53})}{(1 - k_{S36})^2} \right)^2 * (\sigma_{k_{S36}})^2 \right]$$

$$(\sigma_{A_{35}})^2 = (\sigma_{VP})^2$$

$$(\sigma_{A_{36}})^2 = (A_{36})^2 * \left[ \frac{(\sigma_{VP})^2}{(VP)^2} + \frac{(\sigma_{k_{53}})^2}{(1 - k_{53})^2} + \frac{(\sigma_{k_{S36}})^2}{(k_{S36})^2} \right]$$

Anhang D: Mathematische Beschreibung des quasistationären Modelles

$$(\sigma_{A_{46}})^2 = (A_{46})^2 * \left[ \frac{(\sigma_{AH})^2}{(AH)^2} + \frac{(\sigma_{k_{042}})^2}{(1 - k_{042})^2} \right]$$

$$(\sigma_{A_{56}})^2 = (A_{56})^2 * \left[ \frac{(\sigma_{VP})^2}{(VP)^2} + \frac{(\sigma_{k_{56}})^2}{(k_{56})^2} \right]$$

$$(\sigma_{A_{67}})^2 = (A_{67})^2 * \left[ \frac{(1 - k_{012} - k_{013})^2 * (\sigma_{NW})^2}{\left( (1 - k_{012} - k_{013}) * NW + \frac{k_{26} * VH}{1 - k_{23} - k_{26}} + \left( \frac{ks_{36} * (1 - k_{53})}{1 - ks_{36}} + k_{56} \right) * VP + (1 - k_{042}) * AH \right)^2} + \left( \frac{k_{26}}{1 - k_{23} - k_{26}} \right)^2 * (\sigma_{VH})^2 + \left( k_{56} + \frac{ks_{36} * (1 - k_{53})}{1 - ks_{36}} \right)^2 * (\sigma_{VP})^2 + (1 - k_{042})^2 * (\sigma_{AH})^2 + (NW)^2 * \left( (\sigma_{k_{012}})^2 + (\sigma_{k_{013}})^2 \right) + \left( \frac{k_{26} * VH}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} \right)^2 * (\sigma_{k_{23}})^2 + \left( \frac{VH * (1 - k_{23})}{(1 - k_{23} - k_{26})^2} \right)^2 * (\sigma_{k_{26}})^2 + (AH)^2 * (\sigma_{k_{042}})^2 + \left( \frac{ks_{36} * VP}{1 - ks_{36}} \right)^2 * (\sigma_{k_{53}})^2 + (VP)^2 * (\sigma_{k_{56}})^2 + \left( \frac{VP * (1 - k_{53})}{(1 - ks_{36})^2} \right)^2 * (\sigma_{ks_{36}})^2 \right]$$

# Lebenslauf

MÜLLER, Daniel Beat

Geburtsdatum	23. Mai 1965
Zivilstand	ledig
Nationalität	Schweiz

## Schulen / Ausbildung

1993 - 1998	Doktorat der technischen Wissenschaften an der ETH Zürich
1985 - 1991	Studium der Kulturtechnik an der ETH Zürich
1978 - 1984	Kantonsschule in Trogen (AR), Matura Typ C
1972 - 1978	Primarschule in Dornach (SO) und Trogen (AR)

## Berufstätigkeit

1993 - 1998	Doktorand am Lehrstuhl für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik (S+E) der ETH Zürich und der gleichnamigen Abteilung an der EAWAG Dübendorf
1991 - 1997	Unterrichtsassistent am Lehrstuhl für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik (S+E) der ETH Zürich
1993 - 1997	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am transdisziplinären Stadtentwicklungsprojekt SYNOIKOS am Institut für Orts- Regional- und Landesplanung (ORL) der ETH Zürich
1994 - 1996	Präsident der Unterrichtskommission an der Abteilung für Kulturtechnik und Vermessung an der ETH Zürich, Beiträge zur Entwicklung eines Grobkonzeptes für die neuen Studiengänge für Geomatik und Umweltingenieurwissenschaften
1991 - 1993	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik der ETH Zürich, u.a. Arbeiten über den regionalen Kohlenstoffhaushalt
1991	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich

Wie können Regionen in der Holzversorgung ihre Abhängigkeit vom Hinterland in Grenzen halten, wenn sie ihre Wälder weder über- noch unternutzen wollen? Welche Funktionen kann und soll Holz künftig als Baumaterial, als Rohstoff zur Papierherstellung und als Energieträger übernehmen? Wie können Ziele und Massnahmen in Forst-, Holz-, Papier-, Bau- und Abfallwirtschaft miteinander koordiniert werden?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde ein Modell (XYLOIKOS) entwickelt, welches den regionalen Holzhaushalt über eine Zeitspanne von 200 Jahren (1900-2100) simuliert. Es handelt sich um das erste dynamische Simulationsmodell, welches den Wald, die Forstwirtschaft, die Holzverarbeitung sowie den Konsum und die Entsorgung von Holzprodukten in Bezug auf technisch-naturwissenschaftliche Aspekte miteinander verknüpft. Am Beispiel der Region Olten-Oensingen-Zofingen im Schweizer Mittelland werden Umbauszenarien für den Wald und den Gebäudepark - die wichtigsten Holzlager - untersucht und in Bezug auf Kriterien einer nachhaltigen Regionalentwicklung bewertet.