

SIMULATIONSSTUDIEN ZUR THEORIE DER OBEREN BAUMGRENZE

Mit 9 Abbildungen

REINER SCHWARZ

Summary: Simulation studies concerning the theory of the upper timber-line.

Hitherto global upper timber-line surveys have had to do without accurate control of thermal growth conditions in any study region. In order to overcome the difficulties of estimating the maximum altitude of tree growth conformable to theory, a simulation model named SIMBA has been developed. Meeting the frost dehydration theory (= FTT) in its essence, the model proceeds from the idea that a lack of summer heat prohibits full ripening of the leaves, reducing protection against water loss if, in the following winter and spring-time, water supply is blocked by frozen ground. Such events may cause lethal water deficits for the leaves. The model is driven by a stochastic temperature generator which produces mean daily temperatures and oscillations proceeding from parameters measured at a nearby reference station.

The upper boundary of thermally-constrained tree growth can be evaluated by varying the corresponding height parameter. Results are tested against the observed altitude of the timber-line. Residuals as well as model behaviour give information about the range of the theory's validity. The study confirms tree growth as being limited in cold and cool temperate northern latitudes, continental boreal climates included, as postulated by FTT. An exception has to be made for the oceanic climate of the island arc of East Asia, where collapse by snow overcharge is considered to be a stronger limiting factor.

The model is also valid for dry-summer subtropical regions of the northern hemisphere. Under these climatic conditions, tree growth is not affected by reduced maturity of leaves, frost dehydration being their only cause of death. Extreme exposition differences in the E-W oriented ranges of the Himalayas can be considered by variation of the latitude input parameter.

Having furnished evidence for the FTT referring to the holarctic flora, great residuals in climatically comparable southern hemisphere regions stand for floristic differences. Central Chile exhibits residuals caused by a lack of neotropical species comparable with northern conifers.

Simulation runs for tropical high mountains show a declining tree growth before frost dehydration actually occurs. But observed timber-lines regularly lie 200 m below the modelled limits. Limiting factors of tree growth under tropical conditions have therefore to remain obscure.

1. Problemstellung und Forschungsstrategie

Das Phänomen, daß die natürlichen Baumformationen in bestimmten Meereshöhen eine obere Grenze besitzen, die in verschiedenen Teilen der Erde unterschiedlich hoch liegt, hat sich bis heute allen Versuchen einer überall gesicherten

Erklärung widersetzt. Schlichte globale Parallelisierungen der oberen Baumgrenze mit klimatischen Schwellenwerten und Extremdauerwerten waren nicht erfolgreich und dürften, zumindest in ihrer einfachen Form, keine Aussicht auf Erfolg haben (vgl. HERMES 1955, S. 255f.). Dies erscheint auch nicht erstrebenswert, weil die Korrelationen mit Isothermen oder Andauerwerten in der Regel keinen expliziten Erklärungshintergrund besitzen.

Rationalen Bedürfnissen kommen eher solche Vorstellungen entgegen, welche die obere Baumgrenze als Folge sicher akzeptierter, experimentell zugänglicher Naturgesetze ableiten. Einfache Konzepte dieser Art können allerdings relativ konservative Tests nicht bestehen. So müssen einige gedankliche Konstruktionen, welche bezüglich Samenreife, Jahresstoffbilanz oder Bodentemperaturen allein auf mangelnde Sommerwärme bauen, sich den manchmal ausgedehnten Krummholzgürtel vorhalten lassen, in dem die baumartige Lebensform noch über die obere Baumgrenze hinaus erfolgreich ist. Ebenso sind die mit der Meereshöhe abnehmenden tiefen Wintertemperaturen nicht für die Höhenlage der oberen Baumgrenze verantwortlich, weil es selbst unter extremsten Bedingungen dieser Art in NE-Sibirien noch Baumwuchs gibt.

Bestand hatte bislang nur eine bestimmte Theorie – hier kurz Frostrocknistheorie (= FTT) genannt –, welche mangelnde Ausreife der Blätter in zu kühlen Sommern mit erhöhtem Frostrocknisrisiko während des nachfolgenden Winters und vor allem Frühjahrs kombiniert. Dieser Gedanke ist – zumindest in den gemäßigten und kalten Klimazonen – unwiderlegt geblieben und bildet daher die Grundlage der hier vorgelegten Studie.

Überprüfungen von geökologischer, geobotanischer und forstwissenschaftlicher Seite waren vornehmlich auf die Beobachtung des Baumwachstums unter klimatischen Streßbedingungen am jeweiligen Standort gerichtet. Sie konnten die Verträglichkeit der FTT mit grundlegenden pflanzenphysiologischen Erkenntnissen absichern. Hierüber berichten HERMES (1955), WALTER (1960 und 1968), ELLENBERG (1963), HOLTMEIER (1974) und FRANZ (1979) je zusammenfassend.

Ungeklärt ist die Frage, wo die Grenzen dieser Theorie liegen. HERMES (1955, S. 260) hat aufgrund seiner weltweit ausgedehnten Sammlung einschlägiger Literaturhinweise den Gedanken zur Diskussion gestellt, die obere Baumgrenze könne in Trockengebieten und in den wechselfeuch-

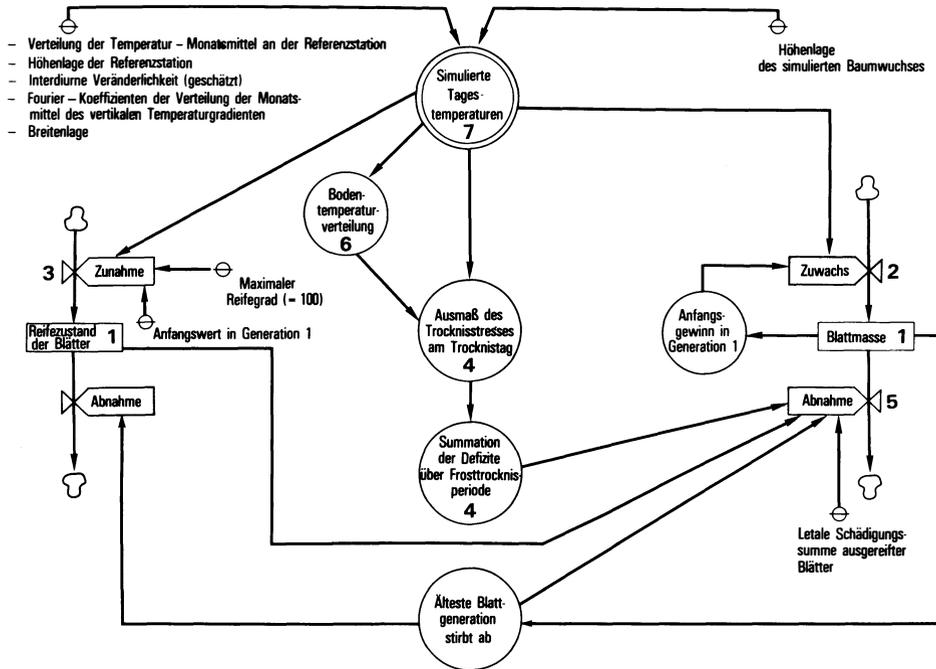


Abb. 1: Grobstruktur des Modells SIMBA. Die den Elementen beigegefügte Ziffern beziehen sich auf die Abschnittsnummern von Kapitel 2 im Text

Rough outline of the SIMBA model. The figures attached to the elements refer to paragraph number of chapter 2 in the text

ten Tropen trockenheitsbedingt sein. Deshalb liege sie dort oft tiefer als nach den Temperaturen erwartet werden könnte. Genau diese nach den Temperaturen erwartete Baumgrenzhöhe konnte aber bislang nicht aufgrund eines theoretischen Vorverständnisses operational angegeben werden. In diese Lücke stößt das hier konzipierte Simulationsmodell, um das Problem der Gültigkeitsgrenzen der FTT anzugehen. Dabei folgt das strategische Konzept dem von HERMES angedeuteten Weg, die theoretisch postulierte mit der tatsächlichen Höhenlage der oberen Baumgrenze zu vergleichen.

Eine solche nachvollziehbare Hypothesenerzeugung quantitativer Art kann nur mit Hilfe regional variierender Parameter über Rechenschritte gewonnen werden. Hierzu eignen sich Digitalrechner ganz besonders, weil sie gestatten, komplexe Theorien auf operationale Weise in entsprechende Computer-Programme abzubilden. Die Stärke quantitativ rechnerischer Problembehandlung liegt in der logisch konsistenten Hypothesenformulierung. Unsicherheiten entstehen dagegen bei der Festlegung des Ablehnungsbereichs.

Im Falle der oberen Baumgrenze bestehen sie darin, daß es sich definitionsgemäß um eine gedachte obere Grenze handelt, die nur gelegentlich vom direkt beobachtbaren Baumwuchs wirklich erreicht wird. Eine Depression der tatsäch-

lich beobachtbaren Baumgrenze können nicht nur lokale natürliche Besonderheiten, sondern auch systematische anthropogene Einflüsse im Bereich der Subökumene bewirken. Aus dieser Situation ergibt sich ein zweiseitiger asymmetrischer Ablehnungsbereich. Wird Baumwuchs über der im Simulationsmodell postulierten Höhengrenze angetroffen, so spricht dies ganz generell gegen die zugrundeliegende Theorie, die ja eine obere Schranke erklären soll. Weniger hart sind die Ablehnungskriterien bei der Abweichung der beobachteten Wuchsgrenze der Bäume unter die postulierte Grenzhöhe. Hierbei bieten nur mehrere betragsgleiche Abweichungen innerhalb eines einheitlichen Klimatyps einige Sicherheit.

2. Operationalisierung im Simulationsmodell SIMBA

Basis des Modells ist der Gedanke, daß mangelnde Sommerwärme keine volle Ausreifung der Nadeln oder Blattanlagen gestattet. Die davon betroffenen Sproßteile besitzen dann einen zu geringen Verdunstungsschutz, so daß sie im nachfolgenden Winter und Frühjahr unter Trockenstress stark gefährdet sind. Gefährdung dieser Art tritt vor allem in Form der Frostrocknis auf. Dabei wird durch Frost im Wurzel- und Stammbereich der Wassernachschub aus dem

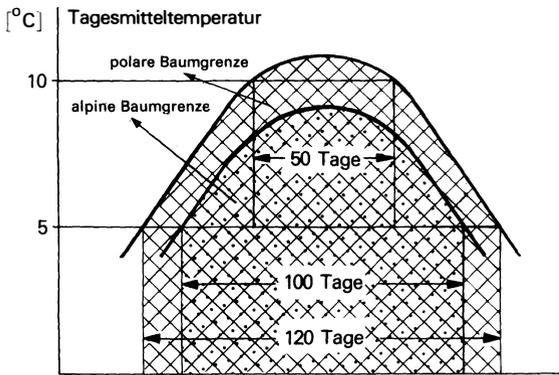


Abb. 2: Zur Schätzung der Temperatursumme von Tagen über 5°C Mitteltemperatur an der polaren und der alpinen Baumgrenze
For estimating the temperature total of days with a mean temperature exceeding 5°C. at the polar and alpine timber-line

Boden ganz oder teilweise gesperrt, während die durch Einstrahlung erwärmten Sproßteile Verdunstungsverluste erleiden.

Hieraus resultiert die in Abb. 1 dargestellte Grobstruktur des Modells. Das Flußdiagramm bedient sich der Zeichenschreibweise der Simulationssprache DYNAMO (vgl. NIEHAUS et al. 1972), während im Rechner das Modell in der allgemeinen Programmiersprache FORTRAN implementiert wird. Die den Systemelementen beigefügten Ziffern beziehen sich auf die Abschnitte innerhalb dieses Kapitels, das dem Leser die Grundannahmen verdeutlichen soll.

2.1. Die Zustandsgrößen Blattmasse und Reifezustand

Zur Darstellung der vom Modell hypothetisch produzierten Aussagen dienen die Zustandsgrößen. Entsprechend der im Modell abzubildenden Theorie geben sie Masse und Reifezustand der assimilierenden Sproßteile an. Da der im Sommer erreichte Reifezustand entscheidend für die Resistenz der Triebe im nächstfolgenden Frühjahr ist, müssen die Zustände von mindestens zwei Blattgenerationen fortgeschrieben werden. Hierbei können immergrüne und winterkahle Bäume gleichbehandelt werden, denn die winterliche Transpiration von Nadeln und Knospen ist, bezogen auf das Frischgewicht, nicht grundsätzlich verschieden (WALTER 1968, S., 400f.). Damit jedoch die Chancen der Laubbäume gewahrt bleiben, nach einem Frostrocknis-Totalschaden noch im selben Jahr behelfsmäßig wieder auszutreiben, werden nicht nur zwei, sondern drei Blattgenerationen laufend fortgeschrieben. Dies entspricht zugleich auch der Mindestlebensdauer der Blätter immergrüner Arten.

2.2. Zunahme der Blattmasse

Die Blattmasse soll über Erfolg oder Mißerfolg des Baumwachstums Auskunft geben. Sie muß zur Darstellung der

FTT nicht absolut geschätzt werden. Insbesondere braucht für diesen Zweck das Modell keine Zwänge zu berücksichtigen, welche die Blattmasse bei erfolgreichem Wachstum nach oben begrenzen. Geht man davon aus, daß Baumgrenzbäume ab etwa 5°C Tagesmitteltemperatur TM eine positive Nettoassimilation aufweisen (vgl. TAYLOR 1958; ELLENBERG 1963, S. 511) und damit produktiv werden, so genügt es, die täglichen Zuwachsraten TZ proportional zur bestehenden Blattmasse BM je Generation und damit auch zur assimilierenden Blattfläche sowie proportional zum Reifefaktor r (vgl. 2.3.) anzusetzen. In allen Blattgenerationen wird eine Anfangsmasse von 1 angenommen. Dieser ist ein entsprechender Reifegewinn von 50 zugeordnet. Da Bäume – im Gegensatz zu krautigen Pflanzen – einen Teil ihrer Assimilate in die dauerhafte Holzproduktion investieren müssen, trägt ein Proportionalitätsfaktor von .01 dem beobachteten geringen Wachstum an der oberen Baumgrenze Rechnung:

$$TZ = .01 * BM * TM$$

2.3. Blattreifung

Bei Tagesmitteltemperaturen TM über 5°C wird der Reifezustand jeder Blattgeneration um $r * TM$ erhöht, bis der maximale Reifegrad von 100 erreicht ist. Bei einem vorgegebenen Anfangswert des Reifegrads von 50 je Blattgeneration müssen 50 Reifepunkte erreicht werden, damit die Triebe voll ausreifen. Zur Bestimmung eines geeigneten Reifefaktors r werden die Verhältnisse an der alpinen mit denen an der polaren Baumgrenze verglichen.

Polare Baumgrenze:

Aus den von SMEDS (1960, S. 157) zusammengestellten Klimadaten von Finnland ist die Temperatursumme ST von Tagesmitteln über 5°C an der Baumgrenze durch Integration in Abb. 2 zu schätzen: $ST = 1130$. Dieser Wert ist verträglich mit den Beobachtungen von HOLTMEIER (1974, S. 43 ff.), der einen Fall von Frostrocknis nahe der polaren Baumgrenze in Finnisch Lapland nachweisen konnte. Aus den dort veröffentlichten Daten läßt sich entnehmen, daß in den Jahren 1966 und 1967, als die Nadeln zur vollen Reife gelangten, ST die Werte 1260 und 1550 erreichte, wogegen die nicht ausgereiften Nadeln des Jahres 1968 nur in den Genuß von $ST = 985$ gelangt waren. Aus $r_p * ST = 50$ läßt sich mit $ST = 1130$ ein Reifefaktor $r_p = .044$ bestimmen.

Alpine Baumgrenze:

Demgegenüber liegen die Verhältnisse an der alpinen Baumgrenze anders. Aus der Zusammenstellung von ELLENBERG (1963, Abb. 311) läßt sich ersehen, daß dort im Durchschnitt 100 Tage mit Mitteltemperaturen über 5°C für Baumwuchs ausreichen. Tagesmittel von 10°C werden im Durchschnitt nicht erreicht. Wie aus den Temperaturdiagrammen von HOLTMEIER (1974, S. 9) hervorgeht, erreichen die mittleren Tagestemperaturen maximal 9°C. Integration in Abb. 2 ergibt einen Schätzwert von $ST = 700$, was einem Reifefaktor von $r_a = .072$ entspricht.

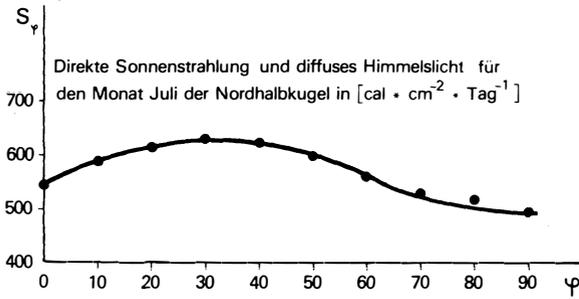


Abb. 3: Breitenabhängige Globalstrahlung
Global radiation dependent upon latitude

Dieser signifikante Unterschied zwischen polarer und alpiner Baumgrenze beruht offensichtlich darauf, daß für den Reifungsprozeß nicht die Temperatursumme, sondern das Lichtangebot entscheidend ist. Während mit Wärmesummen die Strahlungsbilanz erfaßt wird, die sich aus Ein- und Ausstrahlung zusammensetzt, ist für den Lichtgenuß der Pflanzen allein die Einstrahlung maßgebend. Bei letzterer überlagern sich die beiden Einflüsse der breitenabhängigen Globalstrahlung und der höhenabhängigen Extinktion.

Erstere wird für den innerhalb der Vegetationsperiode zentral gelegenen Monat Juli mittels Polynomregression aus Abb. 3 geschätzt. Dabei finden die Angaben für Juni und September in WEISCHET (1977, S. 65) Verwendung, wobei der Juni mit doppeltem Gewicht eingetragt: $S_p = 542 + 6.73 * \varphi - .155 * \varphi^2 + .0083 * \varphi^3$.

Für die höhenbedingte Lichtstrahlung S_h ergeben sich Anhaltspunkte aus der von WALTER (1960, S. 358) wiedergegebenen Tabelle der Messungen von SEYBOLD. Interpolation liefert den Zusammenhang von S_h mit der Meereshöhe h : $S_h = .08094 * 1n(h + 206.7)$ (vgl. Abb. 4).

Es wird angenommen, daß der Reifefaktor r proportional zum Überlagerungspunkt $S_p * S_h$ beider Einflüsse mit dem Proportionalitätsfaktor f ist. Dann gilt für die polare Baum-

grenze in Finnisch Lappland ($\varphi = 70^\circ$; $h = 0$) $f_p = r_p / (S_p * S_h) = .00019$ und ebenso für die zentralalpine Baumgrenze ($\varphi = 47^\circ$; $h = 2250$) $f_a = r_a / (S_p * S_h) = .00019$.

Insgesamt ergibt sich also bei sparsamer Parametrisierung ein Reifefaktor $r = S_p * S_h * .00019$.

2.4. Frosttrocknisbedingung und Ausmaß des Trockenstresses am Trockenstag

Eine Frosttrocknisperiode beginnt, wenn die Tagesmitteltemperatur unter 0°C absinkt. Dann wird angenommen, daß durch Frost in der obersten Bodenschicht die Leitgefäße für die Wasserzufuhr zu den Blattorganen gesperrt sind. Tatsächlich tritt wegen der Gefrierpunktniedrigung der konzentrierten Nährlösung die Sperre erst bei etwas tieferer Temperatur ein. Der hieraus entstehende Fehler fällt aber nicht ins Gewicht, weil bei den geringen Lufttemperaturen zu Beginn einer Frosttrocknisperiode infolge des geringen Sättigungsdefizits der Luft nur vernachlässigbare Wasserverluste auftreten. Entscheidend sind die Verluste dann, wenn die Tagestemperaturen über den Gefrierpunkt ansteigen, während der tiefere Untergrund gefroren bleibt. Das Ende der Frosttrocknisperiode ist erreicht, wenn der Wurzelraum frostfrei wird. Hierüber gibt die Bodentemperaturverteilung (vgl. 2.6.) Auskunft.

Für die Schadwirkung am Trockenstag ist maßgebend, welcher Anteil des Transpirationsverlustes aus dem teilweise gefrorenen Boden gedeckt werden kann. Zur proportionalen (nicht absoluten) Schätzung des Transpirationsverlustes bei Frosttrocknisbedingungen darf man davon ausgehen, daß der Boden in einer gewissen Tiefe gefroren ist. Dem im Profil abwärts gerichteten Temperaturgefälle entspricht ein ebensolches Dampfdruckgefälle der Porenluft (Feuchteinversion, vgl. GEIGER 1961, S.107). Deshalb ist eine Feuchteabgabe des Bodens an die bodennahe Luftschicht nicht zu erwarten. Umgekehrt ist der Boden eher in der Lage, eventuellen Taufall zu absorbieren. Auch von den Blättern der Bäume her unterbleibt wegen der bei Frost-

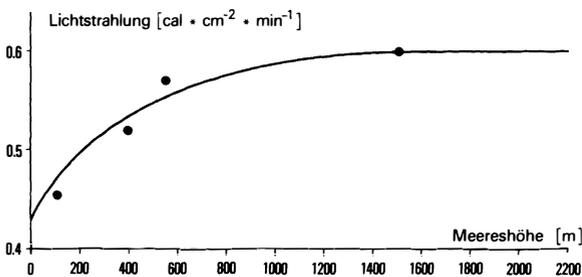


Abb. 4: Höhenabhängigkeit der Lichtstrahlung
Altitudinal dependency of light radiation

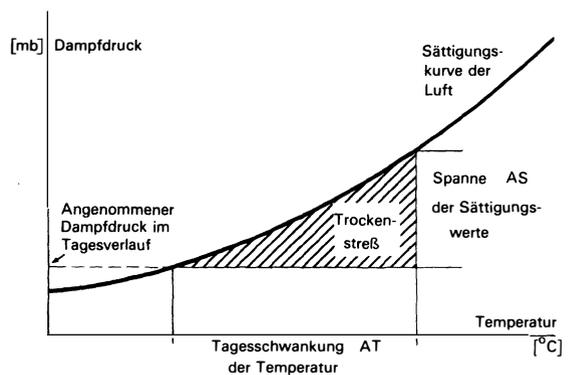


Abb. 5: Zur Schätzung des Trockenstresses am Trockenstag
For the estimation of aridity stress on dryness day

trocknisbedingungen geschlossenen Stomata eine nennenswerte Feuchteabgabe an die Luft. Die absolute Feuchtezunahme der Luft im Tagesverlauf bleibt deshalb vernachlässigbar gering. Es kann daher angesetzt werden, daß der Trockenstreß der Blätter ungefähr proportional zum Produkt aus Tagesschwankung der Temperatur und der entsprechenden Spanne der Sättigungswerte ist (vgl. Abb. 5).

Das Ausmaß des schädlichen Defizits läßt sich dann mit demjenigen Anteil am Trockenstreß schätzen, der dem noch frostgesperrten Anteil des Wurzelraumes im Bodenprofil entspricht. Alle diese täglichen Defizite werden bis zum Ende der Frosttrocknisperiode zum gesamten Defizitbetrag DS aufsummiert.

2.5. Realisierung der Schädwirkung am Ende einer Frosttrocknisperiode

Entscheidender Parameter ist diejenige absolute Defizitsumme DLA, welche auf voll ausgereifte Blattorgane letal wirkt. Dieser Parameter muß durch Anpassung des fertigen Modells an beobachtete Baumgrenzhöhen im bekannten Gültigkeitsbereich der FTT festgelegt werden (vgl. 2.8.). Aus ihm wird für jede Blattgeneration entsprechend ihres Reifezustands die spezifische letale Defizitsumme DL errechnet. Ausgehend von der Annahme, daß der Verdunstungsschutz dem Quadrat des erreichten relativen Reifegrads RG proportional ist, ergibt sich $DL = ((RG/100.) ** 2.) * DLA$.

Zusammen mit der Defizitsumme DS am Ende einer Frosttrocknisperiode errechnet sich hieraus der generationsspezifische Schädigungsfaktor SF, mit dem die Blattmasse in jeder Generation reduziert wird. Die Beziehung zwischen Defizitsumme DS und Schädigungsfaktor SF (vgl. Abb. 6) wird so bestimmt, daß bei geringen Defizitsummen kaum eine Reduktion der Blattmasse eintritt, bei Defizitsummen in der Nähe des letalen Grenzwertes sich hingegen die Schädigung progressiv verstärkt, bis für $DS \geq DL$ SF = 0 wird. Für $DS < DL$ gilt dabei $SF = (1. - DS/DL) ** 0.1$.

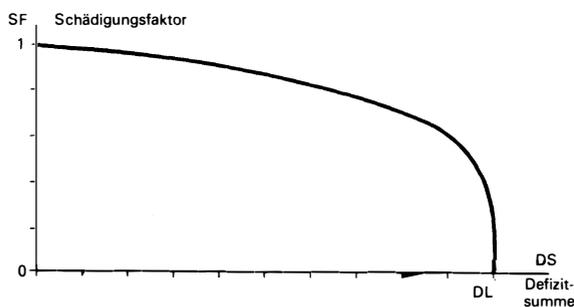


Abb. 6: Beziehung zwischen Defizitsumme und Schädigungsfaktor
Relation between deficit total and damage factor

2.6. Bodentemperaturverteilung

Zur Schätzung des gefrorenen Bodenprofilanteils ist eine Übersicht über die Bodentemperaturen notwendig. Hierzu wird eine mittlere Temperaturleitfähigkeit eines homogenen Bodens angenommen. Diese Annahme ist auch für schwankenden Wassergehalt der Böden vertretbar, da mit steigendem Wassergehalt sowohl die Wärmeleitfähigkeit WL als auch die Wärmekapazität C in gleichem Maße zunehmen, so daß die Temperaturleitfähigkeit TL als ihr Quotient $TL = WL/C$ bei den in der Natur vorkommenden Bodenwassergehalten annähernd konstant ist (vgl. BOLT aus: SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1970, S. 244, Abb. 82). Auch der Effekt, daß Eis die doppelte Temperaturleitfähigkeit gegenüber wasserhaltigem Boden besitzt, gleicht sich in etwa durch den Wärmegewinn bzw. -verlust beim Gefrieren bzw. Auftauen aus.

Unter diesen vereinheitlichenden Annahmen läßt sich zur Simulation der Temperaturen im Bodenprofil ein einfaches Modell verwenden. Es geht davon aus, daß in mehreren Metern Tiefe konstant die Jahresmitteltemperatur herrscht, kurz unter der Bodenoberfläche dagegen die aktuelle Tagesmitteltemperatur. Die Jahresmitteltemperatur läßt sich als gleitendes Mittel der vorangegangenen 360 Tage (= 1 Modelljahr) auffassen, das aktuelle Tagesmittel dagegen als gleitendes Mittel der Länge 1. Auch in dazwischenliegenden Bodentiefen läßt sich die Bodentemperatur gut mit gleitenden Mitteln entsprechender Länge schätzen. So entspricht dem halbjährlichen gleitenden Mittel die Bodentemperatur in 2 m Tiefe (vgl. SCHMIDT u. LEYST aus: GEIGER 1961, S. 68, Abb. 27). Besonders hervorzuheben ist, daß auch die Phasenverschiebung um 3 Monate mit zum Ausdruck kommt. Dies ist im Hinblick auf die FTT deshalb wichtig, weil das Minimum der Bodentemperaturen in dieser Tiefe in das Frühjahr fällt, wo erhöhte Blattertemperaturen bereits zu hohen Verdunstungsverlusten führen.

Ein Problem stellt noch die Berücksichtigung der winterlichen Schneedecke dar. Sie bewirkt je nach ihrer Dauer höhere Bodentemperaturen als sie den Lufttemperaturen entsprechen. MAURER (aus WALTER 1960, S. 35) zeigt für die Schweizer Alpen, daß in der Nähe der Baumgrenze die mittleren Bodentemperaturen in 1.20 m Tiefe um mehr als 2 °C über der mittleren Lufttemperatur liegen. Wenn wir diesen Einfluß aus Vereinfachungsgründen außer acht lassen, so riskieren wir wegen der dadurch verschärften Frosttrocknisbedingungen eine geringere Baumgrenzhöhe im Modell zu erhalten, als sie einer korrekten Abbildung der Theorie entspricht. Dieser Fehler läßt sich durch Eichung der letalen Defizitsumme DAL (vgl. 2.8.) an beobachteten Baumgrenzhöhen ausgleichen. Hierzu eignen sich Gebiete, die einerseits eine ähnliche Schneedeckendauer aufweisen und für welche andererseits die Richtigkeit der FTT gut gesichert ist.

2.7. Simulation der Tagestemperaturen

Zur Simulation der im Modell benötigten Tagestemperaturen werden Monte-Carlo-Techniken verwendet. Probleme

entstehen daraus, daß sich die Simulationsmethoden den von der Klimatologie angebotenen Verteilungsmaßen anpassen müssen. Bezüglich der Tagesmitteltemperaturen besteht das Grundgerüst aus dem mittleren jährlichen Temperaturgang, der aus den Monatsmitteln an entsprechenden Referenzstationen geschätzt wird. Die Schätzung des auf Tage bezogenen Temperaturganges erfolgt mit Hilfe einer FOURIER-Interpolation, wobei die Koeffizienten bis zur 3. Ordnung nach der SIMPSONSchen Regel bestimmt werden (vgl. Conrad u. Pollak, 1962).

Da als Referenzstationen in aller Regel keine Höhenstationen zur Verfügung stehen, kommt einer geeigneten Temperaturreduktion auf die für den jeweiligen Simulationslauf gewählte Meereshöhe eine hohe Bedeutung zu. Neben wenigen eigenen Berechnungen leisten hierbei die von BÖGEL (1956) anhand geeigneter Stationspaare bestimmten distanzkorrigierten Jahrgänge des vertikalen Höhengradienten der Temperatur gute Dienste. Dabei werden 50 Stationspaare ausgewählt, die jeweils für den betreffenden Klimatyp und die entsprechende Region (z.B. Peruanische Westkordilliere, Alpennordrand, S-Alaska) charakteristisch sind. Auch hier werden die auf Tage bezogenen Gradienten aus den Monatsmitteln mit der FOURIER-Interpolation bestimmt. Durch tageweise Reduktion auf die gewählte Meereshöhe läßt sich dort der tageweise mittlere Jahrgang der Temperatur schätzen.

Aufbauend auf dieser Grundlage werden die im Simulationslauf verwendeten Tagesmittel der Temperatur randomisiert. Der von der beschreibenden Klimatologie angebotene Verteilungsparameter ist die interdiurne Veränderlichkeit. Sie kann aufgrund sporadischer Angaben im Handbuch der Klimatologie von KÖPPEN u. GEIGER (1936) grob geschätzt werden. Der Simulation zufallsverteilter Tagesmitteltemperaturen unter Einhaltung dieses Verteilungsparameters dient eine Variante der Monte-Carlo-Technik, die in zwei Schritten vorgeht.

Ausgehend von der Mitteltemperatur t_{-1} des Vortages wird zunächst entschieden, ob die Tagesmitteltemperatur t_0 steigt oder fällt. Diese Entscheidung wird anhand einer

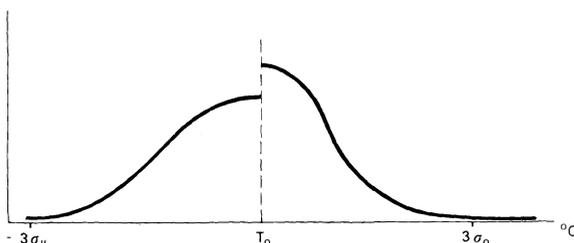


Abb. 7: Asymmetrische Normalverteilung zur Simulation der Tagesmittel der Temperatur

Asymmetric normal distribution for simulation of daily mean temperature values

asymmetrischen Normalverteilung um die mittlere Tagestemperatur T_0 getroffen (vgl. Abb. 7), wobei die 3σ -Grenzen den in einer 30jährigen Periode beobachteten absoluten Abweichungsextrema der Tagesmittel vom Monatsmittel entsprechen. Hierfür werden für $\varphi = 48^\circ$ die beobachtungskonformen Werte $\sigma_0 = 5^\circ\text{C}$ und $\sigma_u = 5.5^\circ\text{C}$ angesetzt und in Anpassung an die Breite φ mit $.45 \cdot \cos \varphi$ modifiziert. Entsprechend dieser Verteilung um T_0 wird eine standardnormalverteilte Zufallszahl R_1 erzeugt. Übertrifft R_1 die standardisierte Tagesmitteltemperatur \bar{t}_{-1} des Vortages, so wird der aktuelle Tag wärmer, sonst kälter. (Für \bar{t}_{-1} gilt $\bar{t}_{-1} = (t_{-1} - T_0) / \sigma_0$, wenn $t_{-1} \geq T_0$ und $\bar{t}_{-1} = (t_{-1} - T_0) / \sigma_u$, wenn $t_{-1} < T_0$).

Der zweite Schritt bestimmt den Betrag $v = |t_0 - t_{-1}|$ der Veränderung gegenüber dem Vortag. Während der vorangegangene Schritt die Einhaltung der mittleren Tagesmittel garantiert, dient der zweite der Berücksichtigung der interdiurnen Veränderlichkeit IV. Mit Hilfe einer zweiten standardnormalverteilten Zufallszahl R_2 läßt sich v mit $v = (|R_2| / .655) \cdot IV$ erzeugen. Die so gewonnenen Werte v besitzen den Mittelwert IV.

Für die Simulation der Trockenstreßbedingungen wird zusätzlich die Tagesamplitude der Temperatur benötigt. Ihr Jahresmittel kann grob aus den beigegebenen bzw. leicht daraus ableitbaren Modellparametern geographische Breite, Meereshöhe und Jahresamplitude der Temperatur geschätzt werden. Dazu dient ein multiples Regressionsmodell, das auf möglichst gute Reproduktion der Varianz (hier 52%) angelegt ist und in das u. a. auch nichtlineare Prädiktoren wie Logarithmus der Meereshöhe oder Potenzen des Sinus der Breite eingehen. Die Regressionshyperebene wird von 258 weltweit und vor allem in Höhenbereichen verteilten Stützstellen (= Klimastationen) geschätzt, an denen über die mittlere aperiodische Tagesschwankung AT (Handbuch der Klimatologie von KÖPPEN u. GEIGER 1936) berichtet wird.

Die Änderung der Tagesamplitude mit der Sonnenhöhe im Jahrgang ist durch Modifikation mit einer überlagerten Sinusschwingung durch $AT \cdot (1 + (A \cdot \sin(d/2)))$ faßbar. Hierin ist d die Nummer des Tages im Jahrgang, wobei das Jahr zu 360 Tagen gerechnet wird. Die Amplitude A wird dabei vom Unterschied der Sonnenhöhen an den Umkehrpunkten bestimmt: $A = |\sin(\varphi - 23.5^\circ) - \sin(\varphi + 23.5^\circ)|$. Eine Zusammenstellung von Häufigkeitsverteilungen von bezüglich AT extremen Stationen zeigt, daß die Tagesamplituden grob als im Intervall $[0, 2 \cdot AT]$ gleichverteilt betrachtet werden können. Randomisierung mit einer in $[0, 1]$ gleichverteilten Zufallszahl R ergibt schließlich $AT = 2 \cdot R \cdot AT$.

2.8. Handhabung des Modells

Nachdem die einzelnen Bausteine nach dem in Abb. 1 angegebenen Muster in einem FORTRAN-Programm zusammengefügt sind, muß zunächst die geeignete letale Defizitsumme DLA anhand gesicherter Beobachtungen bestimmt werden. Diese Justierung des Modells erfolgt an folgenden drei Eichgebieten: Zentralalpen (Bernina-Hospiz, Baumgrenzhöhe 2250 m), Finnisch Lappland (Sodankylä, Baum-

grenzhöhe 500 m), Rocky Mountains (Pikes Peak, Baumgrenzhöhe 3750 m). In allen drei Fällen mußte DLA übereinstimmend auf 11000 eingestellt werden, damit das Modell die beobachtete Baumgrenzhöhe korrekt anzeigt.

Diesem Eichvorgang kommt eine wichtige Bedeutung zu. Durch ihn wird ein pflanzenspezifischer Parameter in das Modell eingeführt, der sich nur auf bauartbedingte Eigenschaften von Bäumen beziehen kann, die aufgrund ihrer natürlichen Verbreitungsmöglichkeiten Zugang zu den jeweils betrachteten Höhenbereichen haben. Eine adäquate Abbildung der FTT im Modell muß sich deshalb auf ein bestimmtes Florenreich beschränken. Entsprechend der Existenz gesicherter Eichregionen kommt hierfür nur die Holarktis infrage. Erst wenn hier die Theorie hinreichend gesichert erscheint, kann durch formale Anwendung des Modells in anderen Florenreichen die Frage untersucht werden, ob und in welchem Ausmaß sich der dort gegebene Florenpool hinsichtlich der baumgrenzbestimmenden Eigenschaften von dem der Holarktis unterscheidet.

Die erwartete Baumgrenzhöhe ist mit Hilfe eines Suchalgorithmus zu ertasten, bei dem jeweils ein Modellbäumchen versuchsweise in die vermutete Meereshöhe gepflanzt wird. Sein Wuchererfolg oder -mißerfolg über eine Periode von 30 Jahren entscheidet dann über die Änderung der vermuteten Höhenlage beim nächsten Versuch. Dieser Suchvorgang muß „von Hand“ gesteuert werden, denn bei dem hohen Rechenzeitbedarf eines Durchlaufes wären automatisierte Suchalgorithmen unwirtschaftlich. Insgesamt läuft die Handhabung des Modells nach dem in Abb. 8 dargestellten Schema ab.

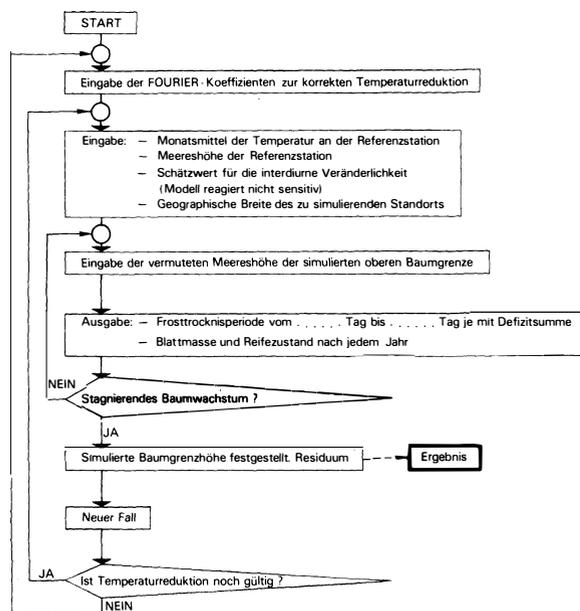


Abb. 8: Schema zur Handhabung des Simulationsmodells SIMBA
Diagram for manipulation of the SIMBA simulation model

3. Erkenntnisse aus den Simulationsläufen

Für ca. 100 weltweit gestreute Referenzstationen werden die Modellvorstellungen getestet. Dabei sind die ausgewählten Lokalitäten durch die Bedingung des Vorliegens generalisierter Beobachtungen eingeschränkt. Lokale geländebezogene Modifikationen bleiben außer acht. Wichtigste Quellen für die benutzten Beobachtungsbefunde sind daher neben vielen regional begrenzten Studien die Arbeiten von HERMES (1955), WALTER (1962; 1968) und FRANZ (1979).

Bereits die Verteilung der Residuen (= Abweichungen des hypothetischen Erwartungswerts von der beobachteten Baumgrenzhöhe) zeigt, daß die Frosttrocknis tatsächlich eine echte obere Schranke darstellt, die vom beobachteten Baumwuchs nirgendwo übertroffen wird (vgl. Abb. 9). Die Diskussion konzentriert sich deshalb vorwiegend auf Bereiche, wo diese hypothetische Grenze nicht erreicht wird. Es müssen dort stärker einschränkende Bedingungen hinzutreten, welche Baumwuchs bereits unterhalb der Frosttrocknisgrenze verhindern.

Interessanterweise werden diese Grenzbedingungen z. T. ebenfalls durch SIMBA erfaßt. Dieses bringt ja nicht nur die komplexen Frosttrocknisbedingungen, sondern auch die Wuchsleistung der Bäume unter den thermischen Klimaverhältnissen am Standort zum Ausdruck. Über die simulierte Baumgrenzhöhe hinaus ist deshalb auch das Modellverhalten im Baumgrenzbereich relevant.

3.1. Kalt- und kühlgemäßigte Breiten der Nordhalbkugel

Beachtliche Residuen treten im Bereich der nördlichen Hemisphäre an Kontinenträndern innerhalb der gemäßigten Zone auf. Die hohen Werte im Bereich Skandinaviens sind ganz eindeutig auf den atlantischen Küstensaum beschränkt, dessen tiefe Baumgrenzlage zunächst unerwartet ist. Mit überzeugenden Argumenten hält LINDEMANN (1970) die Waldarmut dieses Küstenstreifens für anthropogen bedingt. Die schneearmen, milden Winter gestatten dort eine traditionelle Schafhaltung, welche eine sommerliche Beweidung der unmittelbar angrenzenden Bergregionen einschließt. Ihre Bindung an die küstennahen Höfe macht verständlich, warum der natürliche Baumwuchs im Innern des skandinavischen Gebirges, vom Verbiß des Jungwuchses verschont, bis zur Frosttrocknisgrenze reicht. Es handelt sich um dieselbe Wirtschaftsform, welche Island innerhalb weniger Jahrhunderte nach der Erstbesiedlung völlig waldfrei gemacht hat. Da sich dort der Entwaldungsvorgang in historischer Zeit ereignet hat (vgl. HESMER 1961), wird die ehemalige natürliche Baumgrenze bei ca. 400 m zur Residuenbestimmung herangezogen.

Die geringeren Residuen des südlicher gelegenen Japan beziehen sich nicht auf den Küstenbereich, sondern auf die Höhenregion der japanischen Alpen. Eine Erklärung für die Fehlbeträge bietet FRANZ (1979, S. 322). Ihrzufolge dringen Bäume zwar in den *Pinus pumila*-Krummholzgürtel ein, kommen dann aber durch Schneebruchschäden um. Diese dürften ganz regelhaft im gemäßigten ozeanischen Klima

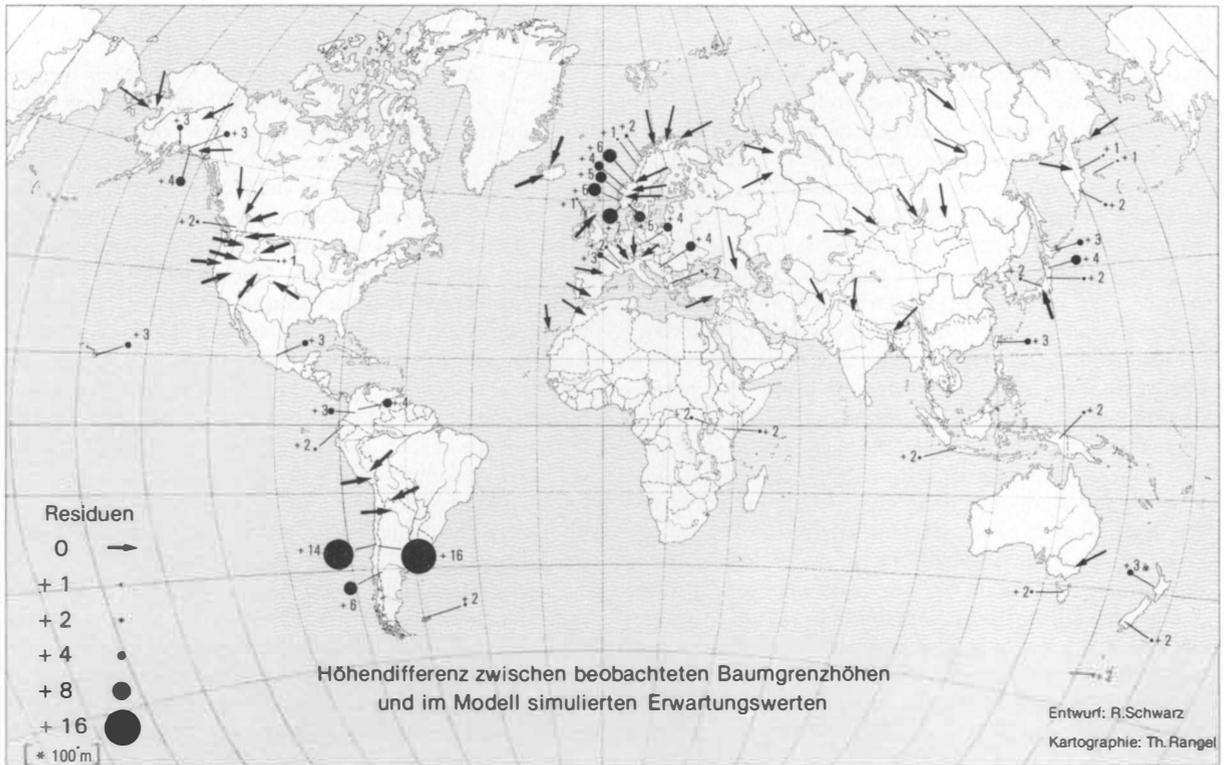


Abb. 9: Höhendifferenz zwischen beobachteten Baumgrenzhöhen und im Modell simulierten Erwartungswerten
Altitudinal difference between observed timber-line altitudes and expected values simulated in the model

des ostasiatischen Inselbogens für die geringe Höhendifferenz zur simulierten Baumgrenze verantwortlich sein.

In den gemäßigten Breiten bis zur polaren Baumgrenze weist das Modellverhalten genau die von der FTT behaupteten Züge auf, indem mangelnde Ausreifung der Triebe in einzelnen Jahren und Frostrocknisbedingungen an der Baumgrenze zusammenwirken. Anderes Verhalten zeigt dagegen das Modell in den Subtropen.

3.2. Subtropen

Hier erreichen die Blattorgane stets volle Reife, so daß die im Modell dargestellte Wuchsgrenze allein durch das Ausmaß der Frostrocknisdefizite bestimmt wird. Zwar ist anzunehmen, daß die im Modell nicht berücksichtigten Trockenheitsbedingungen die enormen Wuchsleistungen, welche die Modellbäume zwischen den Frostrockniskatastrophen zeigen, drastisch einschränken. Dennoch gibt das Modell an den wenigen, der korrekten Darstellung der Temperaturverhältnisse günstigen Stellen die beobachtete Baumgrenze richtig an. Allerdings muß die Voraussetzung vorliegen, daß Expositionsunterschiede kaum eine Rolle spielen, wie beim N-S verlaufenden Salang-Paß im afghanischen Hindukush, oder daß die Exposition von Abdachung und Referenzstation vergleichbar sind. Gelegentlich wird auch

eine Referenzstation in expositionsneutraler Lage zur gemittelten Baumgrenzhöhe in Beziehung gesetzt.

Aus den verschwindenden Residuen für subtropisch sommertrockene Gebiete der Nordhalbkugel geht hervor, daß auch dort der Baumwuchs durch Frostrocknis seine obere Begrenzung findet. Dieser Befund spricht dafür, die gelegentlich aufgeworfene Frage (z. B. HERMES 1955, S. 265 oder WALTER 1960, S. 82), ob in Trockengebieten die obere Baumgrenze thermisch oder xerisch bedingt sei, zugunsten der Temperatur als Minimumfaktor zu entscheiden. Es soll dabei nicht übersehen werden, daß es besonders trockenheitsangepaßte Arten (z. B. *Juniperus thurifera*) sind, welche hier bis zur Frostrocknisgrenze vordringen. Doch ist eine xeromorphe Blattstruktur zugleich auch als Anpassung an die Frostrocknisbedingungen zu verstehen.

Oft herrschen in Baumgrenzhöhe Klimabedingungen, die denen der baumfeindlichen Steppen entsprechen. Doch haben Bäume auf skelettreichen Hochgebirgsböden nicht die erdrückende Konkurrenz der Krautschicht im Kampf um das Bodenwasser zu erleiden. Dem Umstand, daß solche Böden meist auch keine rentable weidwirtschaftliche Nutzung zulassen, dürften die Beobachtungsmöglichkeiten einer natürlichen oberen Baumgrenze zu verdanken sein.

Eine eigene Diskussion erfordern die Verhältnisse im Himalaya. Simulation mit der Referenzstation Leh (Ladakh,

3506 m) am südexponierten Hang des oberen Industales ergibt letale Frostrocknis in allen Höhen ab 3500 m. Das Ergebnis entspricht den Angaben von SCHWEINFURTH (1957, S. 320), wonach in S-Exposition die Artemisiensteppe bis zur alpinen Stufe reicht. Dagegen steigen Baumbestände in Nordexposition bis 4000 m. Ebensolche krassen Expositionsunterschiede im westlichen Himalaya schildern auch TROLL (1938, S. 17f.), aus verschiedenen Quellen HERMES (1955, S. 84) und WISSMANN (1960, S. 268f.).

Nun ist das Modell SIMBA durchaus in der Lage, die Exposition zu berücksichtigen. Dazu sind lediglich die Winkel der Sonneinstrahlung auf den Hang entsprechend der Hangneigung α zu verändern. Dies geschieht bei der darzustellenden Nordexposition durch Eingabe der Breite $\varphi + \alpha$. Bezogen auf eine Basisdistanz von 10 km beträgt die mittlere Neigung des Hanges zum nördlich gelegenen Shyok-Tal $\alpha = 18.5^\circ$. Bei entsprechend veränderter Breitenangabe von $34.5^\circ + 18.5^\circ = 53^\circ$ zeigt das Modell tatsächlich eine durch Frostrocknis bestimmte obere Baumgrenze in 4000 m Höhe an.

Lhasa (Tibet, 3685 m) liegt in einem weiten Hochtal und darf daher bezüglich seiner Exposition als ausgeglichen angesehen werden. SIMBA bestimmt eine frostrocknisbedingte Baumgrenzhöhe von 3800 m, und zwar bei einem Temperaturmittel des wärmsten Monats von 17°C . Da an dieser Grenze volle Reife der Blätter erreicht wird, ist der Obstbau in der Umgebung von Lhasa verständlich. Für Südtibet gibt HERMES (1955, S. 84) maximale Baumgrenzhöhen von 4200–4300 m an. Diese Werte zeigt SIMBA bei einer Nordexposition von $\alpha = 10^\circ$, was etwa den durchschnittlichen Abdachungsverhältnissen der Gebirgsketten (Horizontabschirmung) im tibetanischen Hochland mit seiner vergleichsweise geringeren Reliefenergie entspricht. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist die Erkenntnis von SCHÄFER (1938, S. 56f.; zit. nach SCHWEINFURTH 1957, S. 322f.), der anlässlich einer ornithologischen Forschungsreise nach Ost-Tibet die Expositionsunterschiede bezüglich des Baumwuchses im Sinne der FTT erklärt.

Nachdem die Residuen für den holarktischen Bereich einer Gültigkeit des Modells und damit der FTT nicht entscheidend widersprechen, wird die Theorie für die folgende Betrachtung als bezüglich der Holarktis gesichert angesehen. Die formale Anwendung des Modells in tropischen und südhemisphärischen Gebieten auf dieser Basis geht von der Nullhypothese aus, die floristischen Unterschiede seien bezüglich der für die Höhenlage der oberen Baumgrenze entscheidenden bauartspezifischen Baummerkmale nicht signifikant. Die mit dem Modell ertastete, erwartete obere Baumgrenze entspricht dieser Nullhypothese. Gravierende Abweichungen der beobachteten oberen Baumgrenze müssen als Ablehnung gewertet werden. Bei verschwindenden Residuen ist jedoch zu beachten, daß der hier durchgeführte Test auf baumgrenzspezifischen floristischen Unterschied nicht sehr kritisch ist. Ohne Unterstützung durch ökophysiologische Untersuchungen darf daran keine Indifferenzbehauptung geknüpft werden.

In den Subtropen der Südhalbkugel finden sich testgeeignete Gebiete in SE-Australien und Mittelchile. In letzterem steigen Bäume nicht bis zur hypothetischen Frostrocknis-

grenze bei 3200 m auf. Auf der Breite von Santiago endet der natürliche Baumwuchs bereits in 1800 m Höhe. Aus der im Modell operationalisierten klimaökologischen Sicht ist diese niedrige Baumgrenze unverständlich, zumal auf 2000 m Höhe Kulturen von Sauerkirschen und Äpfeln angetroffen werden (WALTER 1968, S. 185). Einen Erklärungsansatz bietet der Vergleich mit Nordamerika, wo bei vergleichbaren klimatischen Bedingungen an der oberen Baumgrenze durchweg Nadelhölzer (Fichten-, Kiefern- und Tannenarten) auftreten. In Mittelchile, das zum neotropischen Florenreich mit Arten tropischer und subantarktischer Herkunft gehört, existieren keine Arten mit vergleichbaren Eigenschaften (vermutlich in bezug auf absolute Frosthärte). Das extreme Residuum muß deshalb auf ein „Loch“ im Florenpool zurückgeführt werden, das nicht durch Anpassung endemischer Arten gefüllt werden konnte (vgl. hierzu GOLTE 1978).

3.3. Tropen

Besonders aufschlußreich ist das Modellverhalten unter den Isothermie-Bedingungen der Tropen. Hier erlischt das Baumwachstum noch ehe Frostrocknis überhaupt auftritt. Deshalb ist mit Sicherheit auszuschließen, daß in den tropischen Hochgebirgen Bäume bis zur hypothetischen Frostrocknisgrenze aufsteigen. Doch auch die im Modell dargestellte Wachstumsschranke infolge zu geringer Tageswärme wird von der beobachteten innertropischen Baumgrenze regelmäßig nicht erreicht. Dies zeigen die gleichmäßigen Residuen (vgl. Abb. 9), welche in äquatornahen Hochgebirgen durchweg etwa 200 m betragen, wobei sich die verwendeten Angaben nicht auf die Obergrenze des geschlossenen Bergwaldes (*Ceja*) beziehen, sondern auf die höchsten Gehölzvorkommen in der Paramostufe (z. B. *Polylepis*), Schopfrosettenpflanzen ausgeschlossen. Über die tatsächlich höhenbegrenzenden Faktoren der Gehölze gibt es m. W. noch keine einigermaßen gesicherten Vorstellungen.

Dasselbe gilt für die effektiv-klimatisch verwandten, extrem ozeanischen Inseln der südhemisphärischen Mittelbreiten (Falkland, Auckland, Südinsel Neuseelands), wo sich dieselben Residuen bei gleichem Modellverhalten wie in den Innertropen ergeben.

Zusammenfassung:

Großräumige Baumgrenzstudien mußten bislang ohne genaue Kenntnis der thermischen Wuchsbedingungen im jeweiligen Untersuchungsgebiet auskommen. Um die damit verbundene Unsicherheit bei theoriekonformer Schätzung der oberen Baumgrenzhöhe zu überwinden, wurde das komplexe Simulationsmodell SIMBA entwickelt. Es besteht im Kern aus einer Operationalisierung der Frostrocknistheorie (= FTT), welche von der Vorstellung ausgeht, daß mangelnde Sommerwärme eine volle Ausreifung der Blätter verhindert. Dadurch wird deren Verdunstungsschutz gemindert, wenn im nachfolgenden Winter und Frühjahr die Wasserzufuhr durch Bodenfrost gesperrt ist. Das Modell

wird durch einen stochastischen Temperaturgenerator angetrieben, welcher Tagesmitteltemperaturen und Tageschwankungen der Temperatur aufgrund der Klimadaten einer nahegelegenen Referenzstation erzeugt. Bezüglich der entscheidenden Baumeigenschaften wird das Modell im Bereich des holarktischen Florenreiches geeicht.

Durch Experimentieren mit dem Modell kann die thermisch bestimmte Höhengrenze des Baumwuchses ermittelt werden. Sie wird gegen die jeweils beobachtete obere Baumgrenze getestet. Sowohl die Residuen wie auch das Modellverhalten im Baumgrenzbereich geben über die Reichweite der zugrundeliegenden Theorie Auskunft.

Die Ergebnisse bestätigen, daß Baumwuchs in den kalt- und kühlgemäßigten wie auch in kontinentalen borealen Klimaten durch Frostrocknis im Sinne der grundlegenden Theorie begrenzt wird. Eine Ausnahme bildet der ozeanische ostasiatische Inselbogen, wo Schneebruch als stärker limitierender Faktor erscheint.

Das Modell bleibt auch in den sommertrockenen Subtropen der Nordhalbkugel gültig, wo jedoch mangelnde Sommerwärme keine Rolle spielt, so daß allein die Frostrocknis dem Baumwuchs ein Ende setzt. Es läßt sich zeigen, daß auch die extremen Expositionsunterschiede in den E-W-Ketten des Himalaya durch SIMBA modelliert werden können. Große Residuen treten dagegen in Mittelchile auf, wo im neotropischen Pflanzenbereich keine den Nadelbäumen Nordamerikas vergleichbaren Arten existieren.

In den tropischen Hochgebirgen ergeben die Simulationsläufe, daß das Baumwachstum bereits zum Erliegen kommt, noch ehe Frostrocknis auftritt. Doch liegen die beobachteten Baumgrenzhöhen regelmäßig um 200 m unter den vom Modell postulierten Schranken. Somit bleiben die dort wirksamen Limitierungsfaktoren weiterhin im Dunkeln.

Literatur

- BADER, F. J. W.: Die Verbreitung borealer und subantarktischer Holzgewächse in den Gebirgen des Tropengürtels. Eine arealgeographische Studie in dreidimensionaler Sicht. *Nova Acta Leopoldina*, N.F. Nr. 148, Bd. 23, Leipzig 1960.
- BÖGEL, R.: Untersuchungen zum Jahresgang des mittleren geographischen Höhengradienten der Lufttemperatur in den verschiedenen Klimagebieten der Erde. *Ber. des Deutschen Wetterdienstes*, Bd. 4, Nr. 26, Bad Kissingen 1956.
- CONRAD, V., POLLAK, L. W.: *Methods in Climatology*. Cambridge Mass. 1962.
- ELLENBERG, H.: *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in kausaler, dynamischer und historischer Sicht*. Einführung in die Phytologie von H. WALTER, Bd. 4, Teil 2, Stuttgart 1963.
- : Leben und Kampf an den Baumgrenzen der Erde. In: *Naturwiss. Rdsch.* 19, 4, 1966, S. 133–139.
- ERN, H.: Die dreidimensionale Anordnung der Gebirgsvegetation auf der Iberischen Halbinsel. *Bonner Geogr. Abh.* 37, 1966.
- FRANZ, H.: *Ökologie der Hochgebirge*. Stuttgart 1979.
- FRANZ, H.-J.: *Physische Geographie der Sowjetunion*. Leipzig 1973.
- GEIGER, R.: *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. 4. Aufl., Braunschweig 1961.
- GOLTE, W.: Die südhemisphärischen Coniferen und die Ursachen ihrer Verbreitung außerhalb und innerhalb der Tropen. In: TROLL, C., LAUER, W. (Hrsg.): *Geoökologische Beziehungen zwischen der temperierten Zone der Südhalbkugel und den Tropengebirgen*. *Erdwiss. Forschung* 11, Wiesbaden 1978, S. 93–123.
- HENNING, I.: Horizontale und vertikale Vegetationsanordnung im Ural-System. In: *Erdwiss. Forschung* 4, Wiesbaden 1972, S. 17–32.
- : *Geoökologie der Hawaii-Inseln*. *Erdwiss. Forschung* 9, Wiesbaden 1974.
- HERMES, K.: Die Lage der oberen Waldgrenze in den Gebirgen der Erde und ihr Abstand zur Schneegrenze. *Kölner Geogr. Arb.* 5, 1955.
- HERZOG, T.H.: Baum-(Wald-) und Schneegrenze in den Kordillieren von Südamerika. In: *Mitt. Geogr. Ges. (für Thüringen) zu Jena* 39, 1931, S. 72–89.
- HESMER, H.: Waldvernichtung und Waldschaffung auf Island. In: *Forstarchiv* 32, H. 6, 1961, S. 109–119.
- HÖLLERMANN, P.: Naturräumliche Höhengrenzen und die Hochgebirgsstufe in Gebirgen des westlichen Nordamerika. In: JENTSCH, C., LIEDTKE, H. (Hrsg.): *Höhengrenzen in Hochgebirgen*. *Arbeiten aus dem Geogr. Inst. d. Univ. d. Saarlandes* 29, 1980, S. 75–117.
- HOLTMEIER, F.-K.: *Geoökologische Beobachtungen und Studien an der subarktischen und alpinen Waldgrenze in vergleichender Sicht (nördliches Fennoskandien/Zentralalpen)*. *Erdwiss. Forschung* 8, Wiesbaden 1974.
- JONES, G.: *Vegetation Productivity*. London 1979.
- KESSLER, A.: Studien zur Klimatologie der Strahlungsbilanz unter besonderer Berücksichtigung der tropischen Hochgebirge und deren kühltemperierten Zone der Südhalbkugel. In: TROLL, C., LAUER, W. (Hrsg.): *Geoökologische Beziehungen zwischen der temperierten Zone der Südhalbkugel und den Tropengebirgen*. *Erdwiss. Forschung* 11, Wiesbaden 1978, S. 49–61.
- KIENAPFEL, G.: Die Vulkanlandschaften der ostasiatischen Randbögen. Ein Beitrag zur Landschaftskunde Monsunasiens mit Ausschluß Formosas. *Veröff. d. Geogr. Inst. d. Albertus-Univ. zu Königsberg i. Pr.*, NF, Reihe Geographie Nr. 3, 1931.
- KLAUS, D.: *Systemanalytischer Ansatz in der geographischen Forschung*. *Karlsruher Manuskripte zur Math. u. Theoret. Wirtschaft. Sozialgeogr.* 47, Karlsruhe 1980.
- KNAPP, R.: *Die Vegetation von Nord- und Mittelamerika*. Stuttgart 1965.
- KÖPPEN, W.: Verhältnis der Baumgrenze zur Lufttemperatur. *Met. Zeitschrift* 37, 1920, S. 39–41.
- KÖPPEN, W., GEIGER, R. (Hrsg.): *Handbuch der Klimatologie*. 5 Bde., Berlin 1930–39.
- LANDSBERG, H. E. (Hrsg.): *World Survey of Climatology*. Bde. 5–13, 1969–77.
- LAUER, W.: Zusammenhänge zwischen Klima und Vegetation am Ostabfall der mexikanischen Meseta. In: *Erdkunde* 27, 1973, S. 192–213.
- LAUTENSACH, H., BÖGEL, R.: Der Jahresgang des mittleren geographischen Höhengradienten der Lufttemperatur. In: *Erdkunde* 10, 1956, S. 270–282.
- LINDEMANN, R.: Das Problem der Waldlosigkeit der norwegischen Atlantikküste. *Dtsch. Geographentag Kiel 1969, Tagungsber. u. wiss. Abh.* Wiesbaden 1970, S. 61–72.
- MÜLLER, M. J.: *Handbuch ausgewählter Klimastationen der Erde*. 2. Aufl., Trier 1980.

- NIEHAUS, F., RATH-NAGELS, S., VOSS, A.: Die kybernetische Simulationsmethode SYSTEM DYNAMICS. In: *Angewandte Informatik* 12, 1972, S. 5545–5552.
- PLESNIK, P.: Obere Waldgrenze in den Gebirgen Europas von den Pyrenäen bis zum Kaukasus. In: *Erdwiss. Forschungen* 4, Wiesbaden 1972, S. 73–92.
- SCHÄFER, E.: Ornithologische Ergebnisse zweier Forschungsreisen nach Tibet. *Journ. für Ornithologie* 86, 1938.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 7. Aufl., Stuttgart 1970.
- SCHWEINFURTH, U.: Die horizontale und vertikale Verbreitung der Vegetation im Himalaya. *Bonner Geogr. Abh.* 20, 1957.
- : Neuseeland – Betrachtungen und Studien zur Pflanzengeographie und Ökologie der antipodischen Inselgruppe. *Bonner Geogr. Abh.* 36, 1967.
- SCHWIND, M.: *Das Japanische Inselreich*. Bd. 1: Die Naturlandschaft. Berlin 1967.
- SMEDS, H.: Finland. In: SØMME, A. (Hrsg.): *A Geography of Norden*. Oslo 1960, S. 149–201.
- SPOMER, G. G.: Simulation of alpine soil temperature conditions. In: *Arctic and Alpine Research* 8 (3), 1976, S. 251–254.
- TAYLOR, J. A.: The growing season. *Aberystwyth Memoranda*, No. 1, U.C.W., Aberystwyth 1958.
- TROLL, C.: Der Nanga Parbat als Ziel deutscher Forschung. In: *Zeitschrift d. Ges. f. Erdk.*, Berlin 1938, S. 1–26.
- : Die tropischen Gebirge. Ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische Zonierung. *Bonner Geogr. Abh.* 25, 1959.
- : Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde. In: *Erdkunde* 18, 1964, S. 5–28.
- : The three-dimensional zonation of the Himalayan System. In: *Erdwiss. Forschungen* 4, Wiesbaden 1972, S. 264–275.
- WALTER, H.: *Standortslehre (analytisch-ökologische Geobotanik)*. 2. Aufl., Stuttgart 1960.
- : *Die Vegetation der Erde in ökologischer Betrachtung*. Bd. 1: Die tropischen und subtropischen Zonen. Jena 1962.
- : *Die Vegetation der Erde in öko-physiologischer Betrachtung*. Bd. 2: Die gemäßigten und arktischen Zonen. Jena 1968.
- : *Die Vegetation Osteuropas, Nord- und Zentralasiens*. Stuttgart 1974.
- WARDLE, P.: An explanation for Alpine timberlines. In: *New Zealand Journal of Botany* 9, 1971, S. 371–402.
- WEISCHET, W.: *Einführung in die Allgemeine Klimatologie*. Stuttgart 1977.
- WHITMORE, T. C.: *Tropical Rain Forests of the Far East*. Oxford 1975.
- WISSMANN, H. v.: Stufen und Gürtel der Vegetation und des Klimas in Hochasien und seinen Randgebieten. In: *Erdkunde* 14, 1960, S. 249–272 und 15, 1961, S. 19–44.

HOUSEHOLD STRUCTURE IN GERMANY, 1933: INDICES OF HOUSEHOLD COMPLEXITY AND DETERMINANTS OF REGIONAL VARIATION*)

With 12 figures and 3 tables

FRANZ-JOSEF KEMPER

Zusammenfassung: Haushaltsstruktur in Deutschland 1933: Indizes der Haushaltskomplexität und Einflußfaktoren der regionalen Differenzierung

Der Beitrag ist im Rahmen eines Forschungsprojektes entstanden, das die Veränderung der Haushalts- und Familienstrukturen in Deutschland während der letzten hundert Jahre in regionaler Sicht analysiert. Im Vordergrund steht die Frage nach der Veränderung der Haushaltsformen in Abhängigkeit vom ökonomischen und sozialen Wandel seit der Industrialisierung unter Berücksichtigung kulturspezifischer Rahmenbedingungen. Die Abnahme der durchschnittlichen Haushaltsgröße war am stärksten in der Zwischenkriegszeit. Daher wurde auf der Grundlage der Volkszählung von 1933 eine eingehendere Analyse der regionalen Unterschiede im Haushaltsbildungsverhalten unternommen.

In einem ersten Untersuchungsschritt mußte versucht werden, Indikatoren für das Haushaltsbildungsverhalten zu finden, das sich aus der Art des Zusammenlebens erwachsener Personen in komplexen Haushalten, z. B. von drei oder mehr Generationen, in Kernfamilien oder in Einzelpersonenhaushalten ergibt. Dazu wurden ein Gesamtindex und mehrere Teilindizes der Haushaltskomplexität

gebildet, die unabhängig von der demographischen Zusammensetzung der Bevölkerung sind. Als Gesamtindex wurde in Anlehnung an BURCH der Wert IOH (index of overall headship) konstruiert, der die Tendenz zur Bildung komplexer oder einfacher Haushalte über Haushaltsvorstandsquoten beschreibt. Dazu wird die Zahl der beobachteten Haushalte in Relation gesetzt zu einer Zahl von erwarteten Haushalten, die sich bei gegebener Alters-, Geschlechts- und Familienstandsgliederung der erwachsenen Wohnbevölkerung unter der Voraussetzung von Haushaltsvorstandsquoten einer Referenzbevölkerung ergeben müßte. Als Referenzbevölkerung mit geringer Komplexität wurde die Bevölkerung der Bundesrepublik am Ende des Untersuchungszeitraumes 1979 gewählt. Es wurde weiter davon ausgegangen, daß ein hoher Grad von Komplexität vor allem unter drei Bedingungen erreicht wird, die durch die Möglichkeiten, daß 1) verschiedene verheiratete Paare zusammenleben, 2) unverhei-

*) Erweiterte Fassung eines Referates, gehalten auf der "Conference on Historical Demography" des "Institute of British Geographers", Cambridge, 9.–11. September 1982.