Modellierung des Kronenwachstums der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.)

Winfried Kurth, Branislav Sloboda
Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
Institut für Forstliche Biometrie und Informatik
Büsgenweg 4, D-37077 Göttingen, Deutschland --- E-mail: wkurth@ufobi4.uni-forst.gwdg.de

Georg-August-Universität Göttingen

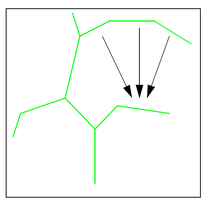
Institut für Forstliche Biometrie und Informatik

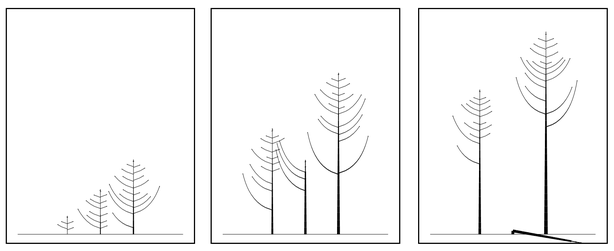
SENSITIVE GRAMMATIKEN

ZUR FORMALEN BESCHREIBUNG DER MORPHOLOGIE-ENTWICKLUNG

Die klassischen (nichtsensitiven) Lindenmayer-Systeme sind formale Grammatiken (Regelsysteme), die - ohne Einbeziehung externer Einflüsse - auf Zeichenketten operieren, welche in dreidimensionale Pflanzenarchitekturen übersetzt werden können. Die ersten Anwendungen betrafen Algen und einige krautartige Pflanzen, deren Morphologie relativ starr vom Genotyp bestimmt ist.
Für den Zweck, die Strukturdynamik von Waldbäumen in einem ökosystemaren Zusammenhang abzubilden, musste dieses Konzept in vielfacher Hinsicht erweitert werden:

- Sensitivität,
  um z.B. den Einfluss von Beschattung auf das Triebwachstum zu modellieren,

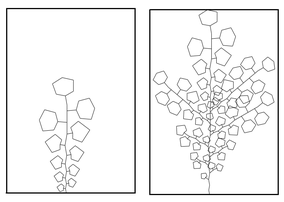




Qualitatives Modell dreier beschattungssensitiver Modellpflanzen. Drei Entwicklungsstufen (v. links n. rechts).

- Zweiphasigkeit, um annuelle Strukturbildungen vom langfristigen Wachstum zu trennen,

- Schachtelung von Grammatiken,
  um die hierarchische Struktur von Jahrestrieben (aus Wachstumseinheiten, Zonen der Prä- und Neoformation, Internodien...) zu erfassen,

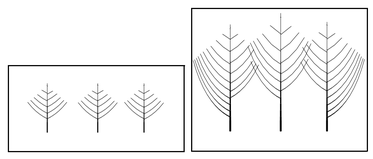


Qualitatives Modell eines Laubbaum-Jahrestriebes mit neoformierter Zone (subapikaler Bereich) und Heterophyllie. Zwei aufeinanderfolgende Jahresschritte.

- Lokale, strukturgebundene Variablen, um Zustandsinformationen (z.B. Assimilatvorräte) zu verwalten.

Qualitatives Modell dreier beschattungssensitiver Bäume mit einfachem Kohlenstoffhaushalt, realisiert mit lokalen Registervariablen. Zustand vor Kronenschluss (links) und danach (rechts).

Der mittlere Baum reagiert auf die Konkurrenz mit einem verstärkten Höhenwachstum, weil er weniger Seitenäste versorgen muss - ein Systemverhalten, das nicht explizit in die zugrundeliegende Wachstumsgrammatik (aus 20 Regeln) hineingeschrieben wurde.



Literatur:
W. Kurth, Morphological models of plant growth: Possibilities and ecological relevance. Ecological Modelling, 75/76 (1994), 299-308.
W. Kurth, Stochastic sensitive growth grammars: A basis for morphological models of tree growth. Naturalia Monspeliensia, h.s. (to appear).

EMPIRISCHE GRUNDLAGEN

FÜR QUANTITATIVE MORPHOLOGIE-MODELLE

Zur Aufstellung von Wachstumsgrammatiken, die reale Baumarten beschreiben, sind biometrische Erhebungen nötig, die die grobe Struktur des Einzelbaumes sowie stichprobenartig die Verzweigung einzelner Jahrestriebe erfassen. Zu ermitteln sind dabei jeweils auch der Altersgradient sowie die Unterschiede zwischen Licht- und Schattenmorphologie.

Untersuchte Grössen:

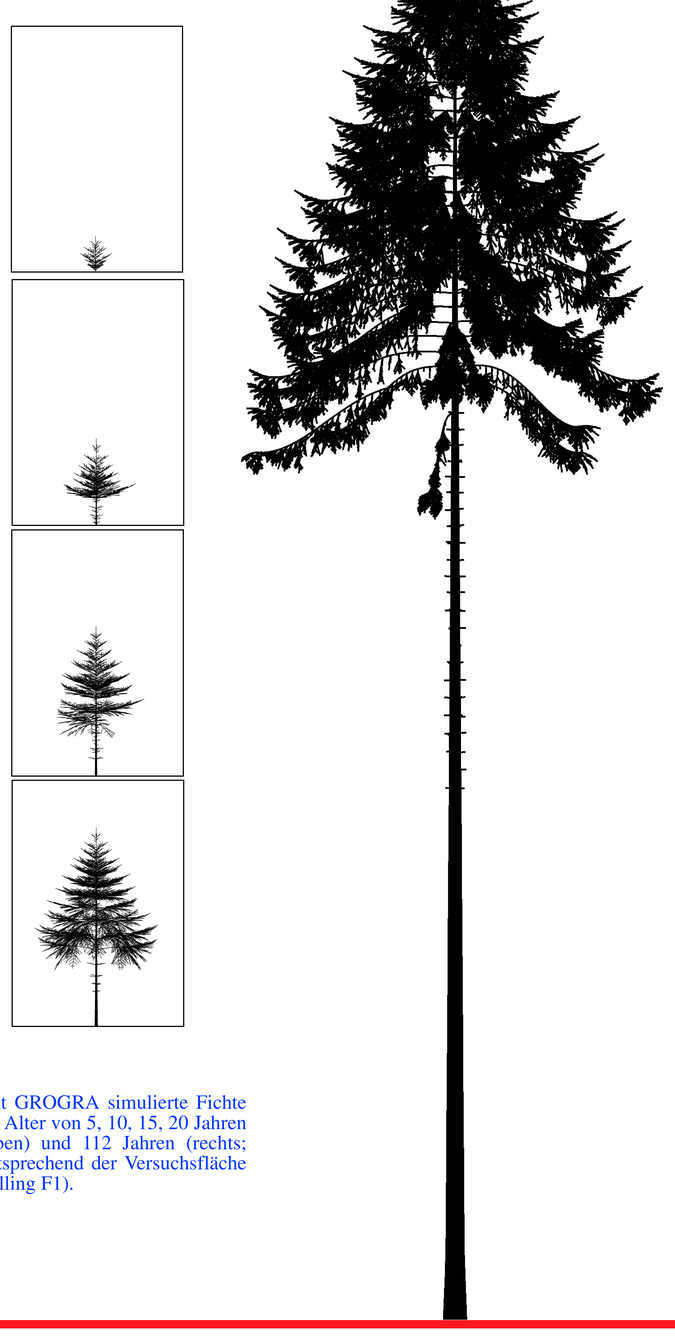
- grobskalig:
  Baumkoordinaten, Höhen, Kronenradien (Luftbildauswertung)
  Höhen, Durchmesser, Schaftkurven (terrestrische Photogrammetrie)

- feinskalig:
  Jahrestrieblängen, -durchmesser, -massen,
  Verzweigungswinkel,
  Blatt-, Nadeltrockenmassen,
  Blatt-, Nadelanzahlen,
  Blatt-, Nadeloberflächen,
  Kartierung der Verzweigungsstruktur.

Literatur:
W. Kurth und D. Lanwert, Biometrische Grundlagen für ein dynamisches Architekturmodell der Fichte (Picea abies (L.) Karst.). Allg. Forst- u. Jagdzeitg., 166 (1995), 177-184.
D. Lanwert, Morphologische Untersuchungen an den Kronen junger Fichten (Picea abies (L.) Karst.) und ihre Darstellung in einem auf CAD basierenden Modell. Diplomarbeit, Universität Göttingen 1994.

QUANTITATIVE MORPHOLOGIE-MODELLE

AM BEISPIEL FICHTE



Mit GROGRA simulierte Fichte im Alter von 5, 10, 15, 20 Jahren (oben) und 112 Jahren (rechts; entsprechend der Versuchsfläche Solling F1).

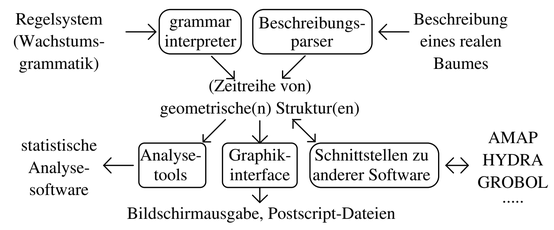
DAS SIMULATIONSWERKZEUG GROGRA

(GROWTH GRAMMAR INTERPRETER)

GROGRA verarbeitet stochastische, sensitive Wachstumsgrammatiken und konstruiert daraus Zeitreihen von dreidimensionalen Strukturen (die Bäume und Bestände repräsentieren können). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Ergebnisse morphologischer Messungen direkt einzulesen, im gleichen Format wie die künstlichen Bäume abzuspeichern und Datenanalysen vorzunehmen.

GROGRA wurde auf der CeBIT 96 vorgestellt und liegt in verschiedenen Versionen vor: Für Silicon-Graphics-Geräte (dies ist die leistungsfähigste Version), für andere Unix-Workstations und für den PC. Es gibt Datenschnittstellen zu anderen Programmsystemen und für die gängigen Graphikformate (Postscript, HPGL, Autocad).

Literatur: W. Kurth, Growth Grammar Interpreter GROGRA 2.4: A software tool for the 3-dimensional interpretation of stochastic, sensitive growth grammars in the context of plant modelling. Introduction and Reference Manual. Ber. FZW, B38, Göttingen 1994.



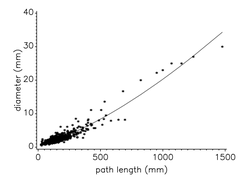
Prinzipieller Aufbau der Software GROGRA

ANALYSE UND WEITERVERARBEITUNG DER STRUKTUREN

Analyseoptionen:

- Durchmesser-Pfadlängen-Relation

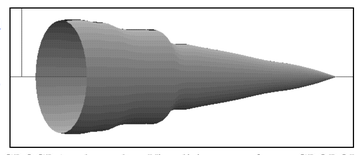
  -> Bestätigung der Hypothese von McMahon & Kronauer (1976) zur elastischen Selbstähnlichkeit



Beziehung zwischen mittlerer Pfadlänge L und Durchmesser D für die Jahrestriebe eines realen Fichtenzweigsystems (N=666), ausgewertet mit GROGRA. Die nichtlineare Regression $D = c * (L+L_0)^a$ wurde angepasst. Der theoretische Wert a = 1,5 liegt im 95%-Konfidenzintervall (1,38; 1,55).

- Schaftformanalyse für den Baumstamm

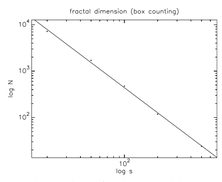
  -> Vergleich der simulierten Stämme mit fotogrammetrisch erhobenen Schaftformdaten (Anwendung: Validierung von Allokationsmodellen)



Output der mit GROGRA gekoppelten Visualisierungssoftware GROBOL (*Growth of Boles display*; D. Lanwert): Liegende Baumschaft-Hülle, in x-Richtung (entsprechend der Höhe) gestaucht.

- Dimensionsanalyse

  -> Reale und simulierte Fichtenzweige haben eine fraktale Struktur, ihr Raumfüllungsgrad über verschiedene Skalenbereiche kann durch eine fraktale Dimension von ca. 1,8 beschrieben werden.



Doppelt-logarithmischer Scale-Anzahl-Plot für eine fraktale Dimensionsbestimmung an einem realen Fichtenzweig, gewonnen mit GROGRA und GROFANT (*GROGRA Fractal Analysis Tool*; S. Luther).

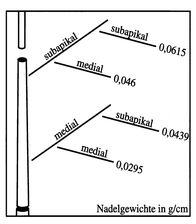
Modellschnittstellen zur Weitergabe von 3D-Informationen:

- Interface zu *MicroEnv* (Strahlungsmodell; Bioklimatologie Göttingen): Diskretisierung des Baumes oder Bestandes in Kuben,
- Interface zu *HYDRA* (Baumwasserflussmodell; forstliche Biometrie Göttingen, Th. Früh): „Schonende“ Anpassung der Topologie und Geometrie des simulierten Baumes an die Erfordernisse der Numerik der Baumwasserfluss-Simulation,
- Interface zu AMAP (Baumarchitekturmodell; Unité de Modélisation, CIRAD, Montpellier): Austausch kompletter Baumstrukturen möglich,
- Integration in ein umfassenderes Struktur-Funktions-Modell (im Aufbau) zur Modellierung des Kohlenstoffhaushalts

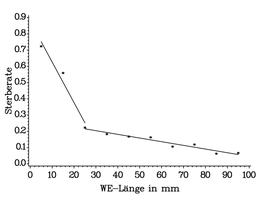
Literatur: Th. Früh, Entwicklung eines Simulationsmodells zur Untersuchung des Wasserflusses in der verzweigten Baumarchitektur. Dissertation, Universität Göttingen 1995.

Solche Erhebungen wurden an Fichten und Buchen im Solling (Versuchsflächen F1 und B1) durchgeführt. (Ergänzend wurden in Bangor (Wales) GROGRA-basierte Modelle für Eiche und Bergahorn entwickelt.) Die Auswertung der Daten ist noch nicht abgeschlossen, es können erst vorläufige Ergebnisse gezeigt werden. Besonders wichtig für dynamische Struktur-Funktions-Modelle ist der bisher kaum quantitativ im Freiland untersuchte Zusammenhang zwischen der Lichtexposition und morphologischen Parametern des Verzweigungssystems.

Einfluss von Triebposition und Länge:

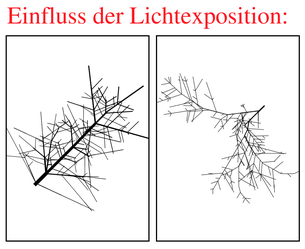


Einfluss der Position des Triebes im Verzweigungssystem auf die Nadeltrockenmasse pro cm: Akrotoner Trend. (Daten von 14-jährigen Fichten aus Göttingen, Lanwert 1994.)

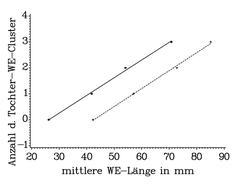


Beziehung zwischen der Trieblänge und der Sterberate der Wachstumseinheiten (WE; Jahrestriebe), erhoben an N = 1298 mindestens einjährigen WE aus unterschiedlichen Kronenbereichen der F1-Fläche. Stückweise Approximation durch Geraden.

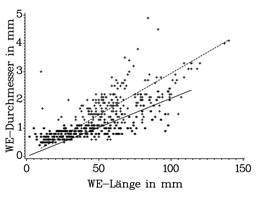
Einfluss der Lichtexposition:



Verzweigungsproben aus dem Sonnen- (links) und Schattenbereich (rechts) von Fichtenkronen der F1-Fläche.
Rekonstruktion mit GROGRA.



Beziehung zwischen Clusteranzahl von Verzweigungspunkten und mittlerer Jahrestrieblänge: Unterschiede zwischen Schattenkrone (Sterne, N = 925) und Sonnenkrone (Kreuze, N = 388). Regressionsgerade für die Schattenkrone durchgezogen, für die Sonnenkrone gestrichelt.



Durchmesser-Längen-Beziehung an letztjährigen Jahrestrieben der F1-Fläche: Proben aus der Schattenkrone (Sterne; Ausgleichsgerade durchgezogen) und aus der Sonnenkrone (Kreuze, Ausgleichsgerade gestrichelt).

Nadeltrockenmasse und *Nadeloberfläche* pro Jahrestrieb können gut aus der Trieblänge L und der Lichtexposition abgeleitet werden:
$\ln y = a_1 * \ln L + a_2 * \ln K + a_3$ mit Bestimmtheitsmass $R^2 = 0{,}89$ bzw. $R^2 = 0{,}94$. (y = Nadeltrockenmasse bzw. -oberfläche, K = Lichtanpassungs-Kennwert: 0 = Schatten-, 1 = Sonnenherkunft des untersuchten Jahrestriebes.) Die Hinzunahme weiterer Parameter (z.B. des Nadelalters) in diese multivariate Regression führt dagegen zu keiner wesentlichen Verbesserung mehr.