

## Simulatie van groei van individuele grove dennen met behulp van het PINOGRAM model

**Een goed bosbeheer is een beheer waarbij de bebeerder inspeelt op de eigenschappen van het bos. Deze eigenschappen worden in hoge mate weergegeven door de structuur van het bos. De plaats en tijd van mogelijke ingrepen is sterk afhankelijk van deze structuur. Om de bosstructuur te kunnen voorspellen moet de groei van individuele bomen onder verschillende omstandigheden bekend zijn. Modellen voor groeivoorspellingen van individuele bomen en van bosstructuur zijn tot nu toe weinig ontwikkeld. Het in dit artikel besproken model heeft deze mogelijkheid wel. Het kan de invloed voorspellen van plantafstanden en dunningen op de groei van individuele bomen en op de ontwikkeling van de bosstructuur (Leersnijder 1992). Het model heeft betrekking op groei en ontwikkeling binnen gelijkjarige ongemengde opstanden. Dit model is uitgewerkt voor grove den (*Pinus sylvestris* L.) op de droge zandgronden van de Veluwe.**

### Groeimodellen

Een model van een systeem of proces is een theoretische beschrijving die kan helpen bij het begrijpen hoe het systeem of proces werkt of hoe het zou kun-

nen werken. Een model geeft dus niet de werkelijkheid weer, zoals helaas vaak wordt verondersteld. Het is doorgaans gebaseerd op een beperkt aantal waarnemingen en geeft, afhankelijk van de doelstelling waarvoor het model is ontworpen, de belangrijkste aspecten van het systeem of proces weer.

De modelvorm die men kiest om de groei van individuele bomen te voorspellen is afhankelijk van de aspecten van groei die men wil weten. Men kan groeimodellen indelen in fysiologische modellen, architectuurmodellen en mathematische modellen.

Fysiologische modellen hebben voornamelijk betrekking op de fysiologische processen die zich binnen de boom afspelen onder invloed van elementaire groeifactoren, zoals licht water en voedingsstoffen en de genetische eigenschappen van een soort of herkomst (vgl. Bormann and Likens 1979, Goudriaan 1982, Hari et al. 1985, Mohren 1987). Fysiologische modellen zijn daardoor sterk verklarende modellen en vooral geschikt om de invloed van veranderingen van de omgeving op groei van bomen en bossen in termen van biomassa te voorspellen (invloed van zure regen of bemesting, broeikas-effect).

Architectuurmodellen hebben voornamelijk betrekking op patronen en structuren. De verschijningsvorm van een (boseco)systeem wordt hierbij gerelateerd aan de soort of herkomst, en in zekere mate aan de omgeving en geschiedenis van het systeem (vgl. Aono en Kunii 1984, De

Reffye et al. 1989, Koop 1989). Architectuurmodellen zijn beschrijvende modellen en vooral geschikt om patronen en structuren te voorspellen in termen van sluitingsgraat, hoogte-diameter-verhouding, stamvorm, kroonvorm, etc.

De mathematische modellen ten slotte hebben vooral betrekking op correlaties en wiskundige trucs, waarmee de verandering van een systeem in de tijd kan worden beschreven. Vaak wordt hierbij gebruik gemaakt van de standruimte van bomen of van de dichtheid van een opstand (vgl. Carvalho Oliveira 1980, Faber 1983, McFadden and Oliver 1988). Ook de mathematische modellen kan men rekenen tot de beschrijvende modellen. Zij zijn vaak geschikt om de invloed van plantafstanden en dunningen te voorspellen.

Omdat de bosstructuur en de architectuurkenmerken van individuele bomen onder invloed van dunningen hier centraal staan, is gekozen voor een model dat het midden houdt tussen een mathematisch groeimodel en een architectuurmodel. Het model beweegt zich op de hiërarchische niveaus van de individuele boom en van de opstand. Het model is "PINOGRAM" genoemd, wat staat voor PINe GRowth Area Model, omdat het de invloed van de (steeds veranderende) standruimte op de groei van grove den beschrijft. Het model is voorlopig beperkt tot gelijkjarige en eensoortige opstanden van grove den. De gebruikte gegevens zijn verzameld op verschillende de-

len van de Veluwe.

Het doel van het model is een indicatie te geven van de afmetingen van elke individuele boom binnen een gelijkjarige opstand, onder steeds wisselende concurrentie met zijn buurbomen en op een willekeurig tijdstip, zodat opbrengst- en structuurgegevens kunnen worden afgeleid van de uitgangssituatie (groeiplaats, herkomst, plantafstand) en het gebruikte dunningsregime.

De verschijningsvorm van een boom (fenotype) ontstaat door de samenwerking van zijn genetische eigenschappen met diverse omgevingsfactoren. In dit kader wordt een onderscheid gemaakt tussen "normale groei" en "actuele groei". De "normale groei" van een boom wordt gedefinieerd als de groei veroorzaakt door de genetische eigenschappen van een boom, door een min of meer constante groeiplaatskwaliteit gedurende zijn leven en door concurrentie om licht, water en voedingsstoffen met buurbomen. De "actuele groei" van een boom wordt mede bepaald door alle omgevingsfactoren (dus incl. ziektes en plagen, zure regen, bemesting, ontwatering, etc.). De "normale groei" is dus eigenlijk de groei van een boom die wordt veroorzaakt door groeifactoren die voortdurend een rol spelen, terwijl de "actuele groei" mede wordt veroorzaakt door tijdelijke groeifactoren. Het PINOGRAM model houdt slechts rekening met de "normale groei".

### Het PINOGRAM groeimodel

Het PINOGRAM groeimodel beschrijft hoe boomafmetingen en opstandsstructuur onder invloed van diverse factoren veranderen. De belangrijkste invloedsfactoren op de "normale groei" en het boomuiterlijk zijn de genetische eigenschappen van de boom, de groeiplaats, de standruimte en de boomgeschiedenis.

### Genetische eigenschappen

In de Nederlandse bossen komen vele opstanden met verschillende (en soms gemengde) herkomsten voor van grove den. De genetische eigenschappen van individuele grove dennen zijn meestal niet precies bekend. Uit de literatuur is bekend dat de herkomst grote invloed kan hebben op de groei van bomen en met name op de hoogtegroeï (Wiersma 1985, van Soest 1952, Kriek 1983). In een herkomstproef in Kootwijk uit 1910, opgezet door Hesselink (1922) en later herbemonsterd door van Soest (1952), waren de groeiverschillen ook in 1987 nog duidelijk met het oog te zien. Aan de hand van correlatieberekeningen met de gegevens van van Soest (1952) kon geconstateerd worden dat diameter, volume en kroonlengte vooral sterk gerelateerd waren aan de boomhoogte en aan de gemiddelde stamafstand en minder duidelijk aan alleen de herkomst. Met andere woorden: de herkomst heeft een relatief geringe invloed op de verhoudingen tussen enerzijds de boomhoogte en anderzijds de diameter, het volume of de kroonlengte.

### Groeiplaats

Volgens de literatuur (e.g. La Bastide en Faber 1972, Schütz en Van Tol 1982) is de hoogte van een opstand bij een zekere leeftijd een veel gebruikte maat voor de geschiktheid van de groeiplaats.

Met behulp van de bosstatistiek en bodemklassificatie werden daarom een aantal groeiplaatsen, wisselend van arm naar rijk uitgezocht, om de invloed van groeiplaats en leeftijd op individuele dennen te bestuderen. Dit leverde geen bruikbare resultaten, omdat de spreiding in groei van individuele bomen per groeiplaats type veel te groot bleek. Ook bleek een groeiplaats type

(bijv. haarpodzol) zeer heterogeen te zijn in humusgehalte, leemgehalte en bodemprofiel, zodat de bodemklassificatie evenmin als de herkomst een aanknopingspunt biedt voor de exacte voorspelling van de groei van individuele bomen.

In het hier beschreven model wordt de hoogtegroeï van een boom daarom bepaald aan de hand van een in de literatuur beschreven functie (van den Burg et al. 1983), welke uitgaat van de maximaal bereikbare hoogte van de boom en de leeftijd.

$$h = S_{\text{ree}} * (1 - \exp(-H1 * t))^2$$

h = boomhoogte

t = boomleeftijd

S<sub>ree</sub> = maximaal bereikbare hoogte van de boom

H1 = 0.0248 en H2 = 1.04749

De maximaal bereikbare hoogte (S<sub>ree</sub>-waarde) is een maat voor de combinatie groeiplaats/herkomst en kan aan de hand van ervaringscijfers worden geschat. Voor een meer exacte bepaling van de hoogtegroeï is bekendheid met de fysiologische eigenschappen van de boom en met de groeiplaatseigenschappen in de directe omgeving van de boom noodzakelijk.

### Standruimte

De plantafstanden en het dunningsregime hebben directe invloed op de dichtheid van een stuk bos en op de standruimte van individuele bomen. Uit de literatuur (Wiedeman 1948, Faber 1971, 1983, 1986, Kellomäki 1986, Mc Fadden and Oliver 1988) en ook aan de hand van eigen metingen en berekeningen (Leersnijder 1992), blijkt de standruimte vooral van invloed op de radiale groei van bomen, zoals stamdiameter en kroonbreedte, en op de kroonlengte. De standruimte wordt meestal

geconstrueerd met behulp van veelhoeken. Eerst wordt vastgesteld met behulp van welke formule welk deel van de stamafstand wordt toebedeeld aan de proefboom. Diverse auteurs maken gebruik van de diameter voor standruimteberekeningen (Carvalho Oliveira 1980). Omdat de concurrentie om licht tussen een boom en zijn buurbomen van dezelfde soort vooral bepaald wordt door hun hoogteverschil wordt hier de voorkeur gegeven om het hoogteverschil in de standruimteberekeningen te verwerken in plaats van het diameterverschil (Fig 1A):

$$a[nr][i] = \frac{h[nr]^2}{h[nr]^2 + h[i]^2} * A[nr][i]$$

h[nr] = hoogte van proefboom  
 h[i] = hoogte van buurboom  
 a[nr][i] = normale standruimtevector  
 nr = nummer van proefboom  
 i = nummer van buurboom  
 A[nr][i] = stamafstand tussen proefboom en buurboom  
 C = competitie constante

Als de proefboom en de buurbomen even hoog zijn dan is a[nr][i] gelijk aan de halve boomafstand A[nr][i]. Voor alle buurbomen wordt op een afstand a[nr][i] vanaf de proefboom in de richting van de buurbomen i een loodlijn op de verbindinglijn tussen deze bomen getrokken. De oppervlakte die door de verschillende loodlijnen wordt ingesloten is per definitie de normale standruimte (vgl. Fig. 1A). Jack (1967), Schulz (1968), Prodan (1968) en Leersnijder (1992) beschrijven wiskundige methoden om de numerieke waarde van deze oppervlakte te bepalen. In het vervolg wordt a[nr][i] de normale standruimtevector genoemd.

De empirische constante C in formule (2) is toegekend om concurrentie ten gevolge van hoogteverschillen in de standruimte-

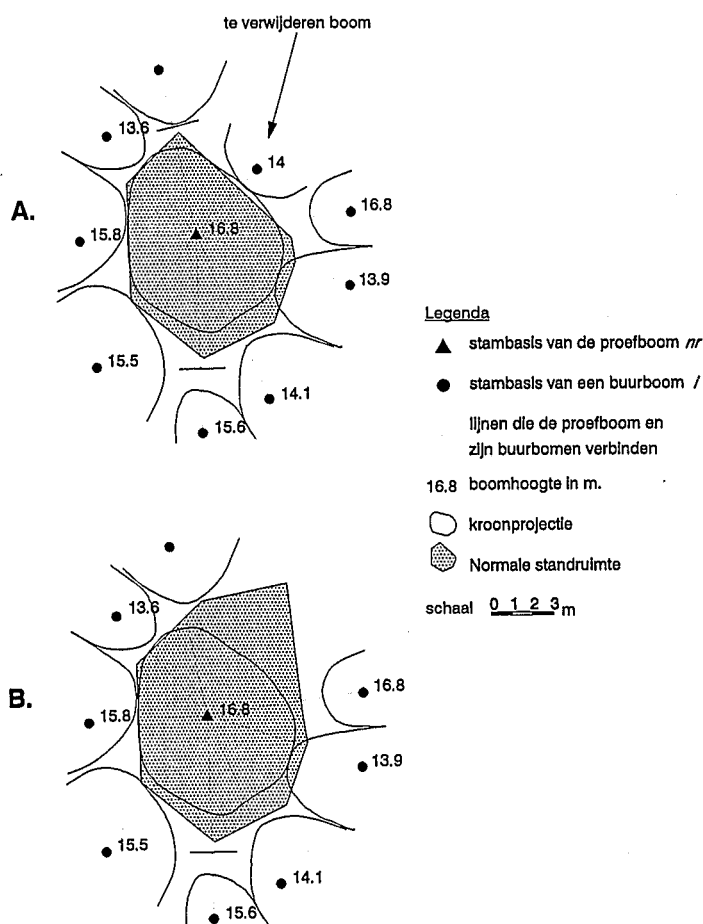


Fig. 1 De normale groei-ruimte van een boom. A. Voor dunning. B. Na dunning.

berekening meer tot uiting te laten komen. Een dergelijke concurrentiemaat wordt ook gebruikt door Faber (1983). De standruimte is berekend voor verschillende waarden van de constante. Van de standruimte wordt de gemiddelde normale standruimtevector  $\bar{a}$  afgeleid:

$$\bar{a} = \frac{\sqrt{\text{normale standruimte}}}{\pi}$$

De hoogte h, de gemiddelde normale standruimtevector  $\bar{a}$  en leeftijd t vormen gezamenlijk de vierdimensionale omgeving van de boom. Deze variabelen zijn gebruikt om de diameter, kroonlengte en kroonbreedte van bo-

men mee te voorspellen. De formules (Tabel 1) werden gevonden met behulp van niet-lineaire meervoudige regressie. De gegevens hiervoor werden verzameld aan de hand van metingen aan in totaal 158 bomen in 13 opstanden op de Veluwe (zie Leersnijder 1992: Tabel 7, B1 en Fig. 7). Uiteindelijk bleek de waarde 4 voor C bij de berekening van de gemiddelde normale standruimtevector  $\bar{a}$  het best te voldoen. De resultaten staan in tabel 1.

De waarden van de constanten voor de formules van Tabel 1 staan in Tabel 2. Let er op dat de

Tabel 1 Gebruikte formules met de berekende correlaties (R<sup>2</sup>) en variatie coëfficiënten (c.v.)

	formule	R <sup>2</sup>	c.v.
diameter	$dbh = t^{D1} \cdot h^{D2} \cdot \bar{a}^{D3} \cdot D4$	0.95	17%
kroonlengte	$cl = t^{CL1} \cdot h^{CL2} \cdot \bar{a}^{CL3} \cdot CL4$	0.73	20%
kroonbreedte	$cw = t^{CW1} \cdot h^{CW2} \cdot \bar{a}^{CW3} \cdot CW4$	0.84	20%

Tabel 2 Constanten van de formules uit tabel 1 voor diameter, kroonlengte en kroonbreedte

D1 = eerste constante voor  $dbh = 0.14240$ , etc.

constant	1	2	3	4
D	0.14240	0.63577	0.43714	1.58379
CL	-0.31238	0.45056	0.52910	3.87783
CW	-0.07894	0.16220	0.70191	2.02684

constanten worden gegeven in hoofdletters en de variabelen in cursieve kleine letters.

De bovengenoemde formules zijn gebruikt als basis voor de verdere groeiberekeningen (Leersnijder 1992).

### Boomgeschiedenis

De verschijningsvorm van een boom is uiteraard ook afhankelijk van de geschiedenis van de boom. Bijvoorbeeld een den die jaren lang een kleine standruimte heeft gehad, zodat veel taksterfte onder in de kroon is opgetreden, is doorgaans niet meer in staat daar nieuwe takken te vormen, ook al wordt de boom vrijgesteld (de boom wordt door zijn buurbomen "opgekroond").

De standruimte van een boom heeft meestal een onregelmatige vorm. Men kan zien dat een boom in sommige richtingen meer oppervlakte ter beschikking heeft dan in andere richtingen. Uit de metingen en correlatieberekeningen blijkt een boom doorgaans een bredere en diepere kroon te hebben in die richtingen waar hij meer ruimte heeft. De standruimte van een boom is echter niet statisch. Bij het planten van jonge bomen en na het

kappen van een buurboom kunnen de bomen niet onmiddellijk de dan beschikbare ruimte in beslag nemen. Na het kappen van een buurboom zien we de standruimte bovendien een geheel andere vorm aannemen (Fig. 1B).

In welke mate een boom binnen een bepaald tijdsinterval gebruik maakt van de beschikbare ruimte kan worden gerelateerd aan de potentiële kroonlengtetoename. Bij vrijstelling is het immers niet waarschijnlijk dat een den door zijn buurbomen wordt "opgekroond". De kroonlengtetoename is daarom gelijk aan de toename van de boomhoogte. Met behulp van de formule voor kroonlengtebijgroei kan dan worden berekend hoeveel standruimte een vrijgestelde boom na verloop van tijd inneemt, zolang hij niet opnieuw in concurrentie treedt met zijn nieuwe buurbomen. Op deze manier kan bijvoorbeeld worden berekend dat een pas geplante boom nog niet in staat is zijn hele ter beschikking staande (normale) standruimte te gebruiken. Ook kan worden berekend wanneer een boom in concurrentie met zijn buurbomen komt en in welke mate hij in staat is de door deze buurbomen reeds in gebruik zijn-

de standruimte te "veroveren". Concluderend kunnen we zeggen dat boomafmetingen in hoge mate worden bepaald door de steeds veranderende standruimte en de mate waarin een boom gebruik kan maken van zijn standruimte in de loop van de tijd. De berekeningsmethodes hiervoor worden gegeven in Leersnijder (1992).

### Het PINOGRAM simulatieprogramma

Het PINOGRAM model is vernoemd naar een simulatieprogramma, geschreven in MICROSOFT C. Het is een interactief programma, zodat de gebruiker zelf kan bepalen van welke situatie hij/zij wil gaan (plantafstanden, maximaal bereikbare hoogtes, mate van heterogeniteit) en welke dunningsmethode hij/zij wil volgen.

### Uitgangssituatie

Na het opstarten krijgt de gebruiker het volgende scherm te zien:

De gebruiker kan dus zelf aangeven wat de plantafstanden binnen een rij en tussen de rijen zijn bij aanvang. Daarna moet de gebruiker een range van maximaal

Initiele variabelen (meter, jaar)	
Geef plantafstand binnen een rij	1.5
Geef plantafstand tussen de rijen	1.5
Wat is de maximum hoogte van de kleinste volwassen boom? (8-30)	14
Wat is de maximum hoogte van de grootste volwassen boom? (kleinste-35)	24
Geef de leeftijd waarop u het bos wilt zien.	■

bereikbare hoogtes van de bomen opgeven (minimum en maximum  $S_{ree}$  waarde). De bereikbare hoogte van een boom kan als het resultaat van interactie tussen genetische boomeigenschappen en groeiplaats worden beschouwd. De minimum en maximum waarde kan men zien als een betrouwbaarheidsinterval voor  $S_{ree}$  waarden bij een normale verdeling. De bereikbare hoogte van elke boom afzonderlijk wordt door het programma vervolgens binnen de opgegeven range at random bepaald. De hoogtegroeï wordt berekend met een formule die de gemiddelde hoogtegroeï van de soort in Nederland beschrijft (Van de Burg et al. 1983). Tenslotte moet de gebruiker de leeftijd opgeven waarop hij/zij het bos wil zien.

Het programma laat vervolgens een kronenprojectie van een transect zien van 20 bij 50 meter, waarin de bomen zijn geplant in driehoeksverband (Fig. 2A). Daarnaast is het mogelijk van bepaalde delen van het transect een profiel diagram (Fig. 2B) te zien of een driedimensionale weergave (Fig. 2C). De getekende kronen geven hier slechts de levende kroon weer. Behalve structuurgegevens berekent het model ook klassieke produktiegegevens per ha en per boom en vindt zo goede aansluiting bij de vele modellen die met deze produktiegegevens werken.

### Dunningen

Nadat de eerste situatie is berekend en getekend, kan men een nieuwe leeftijd opgeven om het bos te zien. Daarbij kan men kiezen uit drie dunningsmethodes:

- 1 Een automatische laagdunning, waarbij men opgeeft hoeveel  $m^3$  gekapt moet worden. Het programma verwijdert vervolgens bomen beginnend bij de kleinste tot het opgegeven volume is bereikt.
- 2 Een automatische hoogdunning, waarbij men zowel het gewenste aantal  $m^3$  kan opgeven als de gewenste minimale kroonlengte/boomhoogte ratio van de grootste bomen. Het programma zorgt ervoor dat alle bomen, met een kleinere kroonlengte/boomhoogte ratio dan gewenst, in volgorde van hoogste tot laagste boom aan één kant worden vrijgesteld tot het gewenste volume is bereikt. Als een buurboom echter groter is wordt deze niet verwijderd. Als het gewenste dunningsvolume in één cyclus nog niet is bereikt, dan wordt de cyclus herhaald, zodat bomen aan twee kanten worden vrijgesteld, etc.
- 3 Handmatige dunning, waarbij men zelf met de muis of met de cursortoetsen kan aanwijzen welke bomen uit het transect verwijderd moeten worden. Zelfdunning treedt altijd op als een boom een te kleine boomhoogte/kroonbreedte verhouding M krijgt. M is hier de sterftefactor

en voor de grove den lijkt 6 een goede waarde (Leersnijder 1992). Vanzelfsprekend zijn er in werkelijkheid veel meer oorzaken mogelijk voor de sterfte van een boom en is het ook niet zo dat een boom in werkelijkheid onmiddellijk sterft als de boomhoogte/kroonbreedte verhouding de waarde 6 overschrijdt. Een simulatie van de ontwikkeling van een opstand, bij een plantafstand van anderhalve meter in en tussen de rijen, zonder dunningen met behulp van het PINOGRAM model vertoont sterke overeenkomsten met de 3/2-machts wet voor zelfdunning (Yoda et al. 1963, Harper 1977, White 1981):

$$\bar{v} = C1 * N^{-C2}$$

$\bar{v}$  = gemiddeld volume van een boom per hectare

N = stamtal per hectare

C1, C2 = constanten (C2 = 3/2)

Deze wet toegepast op bovengenoemd voorbeeld leverde voor C1 de waarde 8,57 en voor C2 de waarde 1,42 ( $R^2 = 0,98$ , variatiecoëfficiënt = 0,14). Deze hoge correlatie geeft een sterke indicatie voor de gebruiksmogelijkheid van de sterftefactor M.

### Voorbeelden van simulatie met PINOGRAM

Onderstaande voorbeelden geven een indicatie van wat met het PINOGRAM simulatieprogramma kan worden berekend. Als voorbeeld zijn min of meer standaard

teeltsystemen gebruikt om te testen hoe goed de resultaten overeenkomen met gegevens uit de literatuur en met wat we zelf in het bos kunnen waarnemen. Natuurlijk zijn er veel meer teeltsystemen die gesimuleerd kunnen worden. Bijvoorbeeld een uitgangssituatie met een zeer hoog stamtal per hectare tegenover een zeer laag. Of een uitgangssituatie met zeer heterogene groeimogelijkheden tegenover zeer homogene. Of het toepassen van weinig zware dunningen tegenover vele lichte, etc. (Leersnijder 1992).

Als uitgangssituatie in dit voorbeeld is genomen:

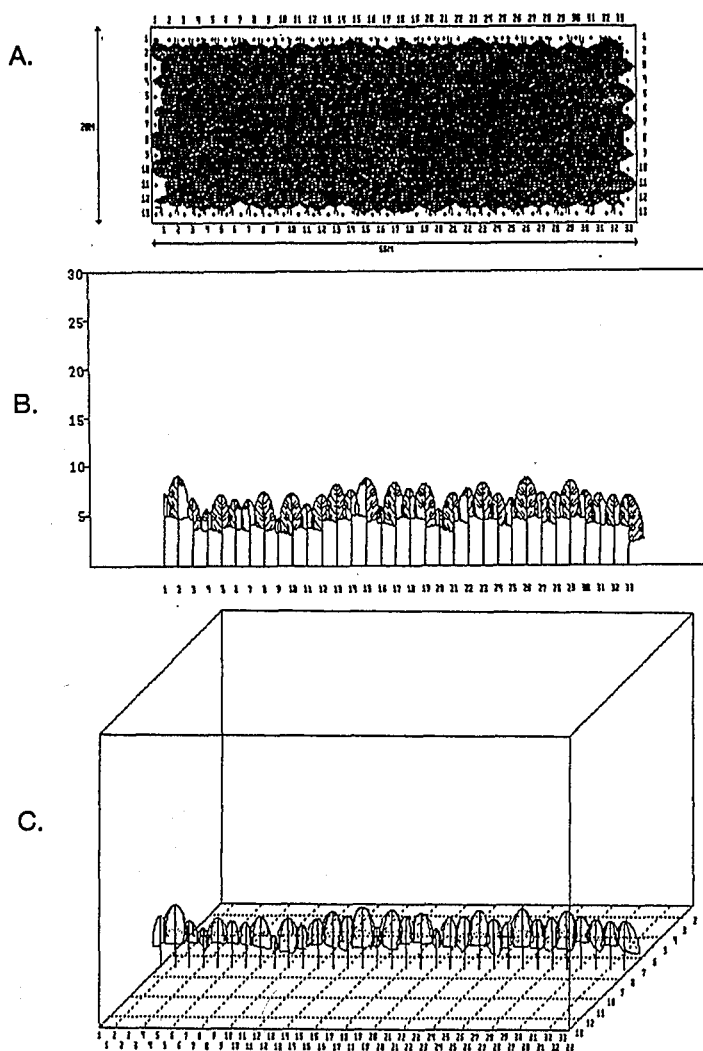
Plantafstand binnen een rij = 1.5  
 Plantafstand tussen de rijen = 1.5  
 Minimum  $S_{tree}$ -waarde = 14  
 Maximum  $S_{tree}$ -waarde = 24

De eerste 20 jaar vindt geen dunning plaats, daarna worden drie alternatieven uitgewerkt: zelfdunning, laagdunning en hoogdunning,

Figuur 2A laat de kronenkaart zien bij 20 jaar. Het is duidelijk te zien dat de kronen elkaar overlappen. Er zijn vrijwel geen gaten in het kronendak. De kronenbedekking (d.i. de som van alle oppervlakten van boomkronen gedeeld door het transectoppervlak) loopt op tot 120% in de leeftijdsfase tussen 20 en 30 jaar.

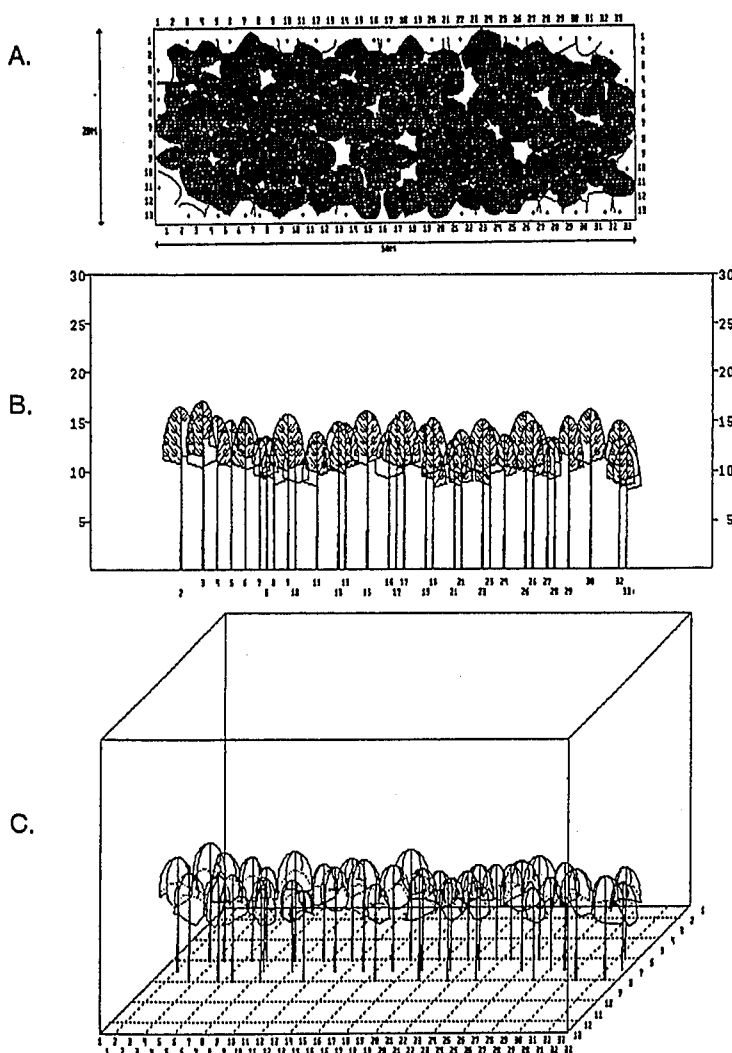
Figuur 2B en 2C presenteren respectievelijk een profielschets en een driedimensionale tekening van bomen in rij nummer 7. Het is goed te zien hoe de bomen elkaar opkronen. De opstandsboniteit is II tot III volgens Grandjean en Stoffels (1955) en II volgens Wiedemann (1943) en het Bosschap (1990). Het grondvlak en volume is lager bij Grandjean en Stoffels en bij Wiedemann, maar hoger bij het Bosschap.

Data per ha				
Row distance:	1.5	$S_{min}$ : 14.0	Max. diam: 11.0	Staanumber/ha: 4260
Dist. in row:	1.5	$S_{max}$ : 24.0	Min. diam: 3.4	Basal area/ha: 20.0
Age	: 20	$K_{mean}$ : 7.1	Mean diam: 7.7	Volume/ha : 90.0
		$K_{dom}$ : 9.1		Canopy clos. : 117.6%



■ Fig. 2 Simulatie van een 20-jarige opstand van grove den zonder dunning.  
 A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van rij 7; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van rij 7; assen: zie A.

Data per ha			
Row distance: 1.5	S <sub>min</sub> : 14.0	Max. dia: 22.7	Stemnumber/ha: 1590
Dist. in row: 1.5	S <sub>max</sub> : 24.0	Min. dia: 12.9	Basal area/ha: 34.8
Age : 60	R <sub>mean</sub> : 14.5	Mean dia: 16.7	Volume/ha : 273.1
	R <sub>dom</sub> : 16.9		Canopy clos. : 89.1%



■ Fig. 3 Simulatie van een 50-jarige opstand van grove den zonder dunning.  
 A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van de rijen 6-8; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van de rijen 6-8; assen: zie A.

### Zelfdunning (Figuren 3 en 4)

Bij het voorbeeld van zelfdunning (natuurlijke sterfte) wordt door de gebruiker geen dunning uitgevoerd. Hier valt op dat het grondvlak een waarde van ongeveer 37 m<sup>2</sup> per ha bereikt bij 35 jarige leeftijd, waarna deze waarde min of meer constant blijkt te blijven. Zolang de hoogtegroeï blijft doorgaan zal dus ook het volume per ha blijven toenemen, zoals in dit model inderdaad het geval is. De kronensluiting loopt aanvankelijk op tot ca 125% bij 30 jarige leeftijd. Daarna neemt deze weer gestaag af tot ca 60% bij 120 jarige leeftijd. Dit wordt veroorzaakt doordat na 30 jarige leeftijd de natuurlijke sterfte in veel grotere mate optreedt en de resterende kronen de gaten niet snel kunnen vullen.

De h/dbh-verhouding is gemiddeld bij 30 jarige leeftijd 102 en bij 40 jarige leeftijd 99 met een standaardafwijking van 9% resp. 7% en een maximum van 127 resp. 114. Oldeman (1974, 1990) beschrijft een h/d-ratio (d = diameter boven de wortelaanzet) van 100 als een referentielijn (d.i. geen regressielijn) voor weinig gereïtereerde loofbomen in het tropisch regenwoud. Bij hogere leeftijd neemt enerzijds het aantal reiteraties toe en anderzijds neemt de onderlinge concurrentie tussen bomen af, zodat de gemiddelde h/dbh verhouding ook afneemt.

### Laagdunning, hoogdunning (Figuren 5 t/m 8)

Op 20 en 25 jarige leeftijd werd een laagdunning uitgevoerd. Na 30 jarige leeftijd is een voorbeeld uitgewerkt met louter laagdunning en een voorbeeld met louter hoogdunning. De dunningssterkte (het te verwijderen aantal m<sup>3</sup>) is in allebei de voorbeelden zoveel mogelijk gelijk gehouden evenals het dunningstijdstip (zie Tabel 3).

De gemiddelde groei op 50 jarige leeftijd ( $\bar{i}_{50}$ ) lijkt ongeveer 7 m<sup>3</sup> per ha per jaar te zijn in de voorbeelden van laagdunning, hoogdunning. Wanneer we de hier besproken voorbeelden vergelijken met de opbrengsttabellen van Grandjean and Stoffels (1955) en Wiedemann (1943) is de h/d verhouding van de bomen bij ongeveer gelijk stamtal per ha in het hier besproken voorbeeld nog steeds iets lager. De opbrengsttabel volgens Het Boschap (1990) laat daarentegen weer iets lagere h/d verhoudingen dan het hier besproken voorbeeld zien.

Zoals te verwachten is de spreiding in boomafmetingen in het voorbeeld met hoogdunning groter dan bij laagdunning en natuurlijke sterfte. Bij de hoogdunning hebben de grootste bomen doorgaans symmetrischer kronen dan bij de laagdunning, wat de houtkwaliteit ten goede komt. In de eerste jaren is de gemiddelde diameter van het dunningshout bij laagdunning iets lager dan bij hoogdunning. Het aangeboden sortiment bij laagdunning is echter homogener dan bij hoogdunning.

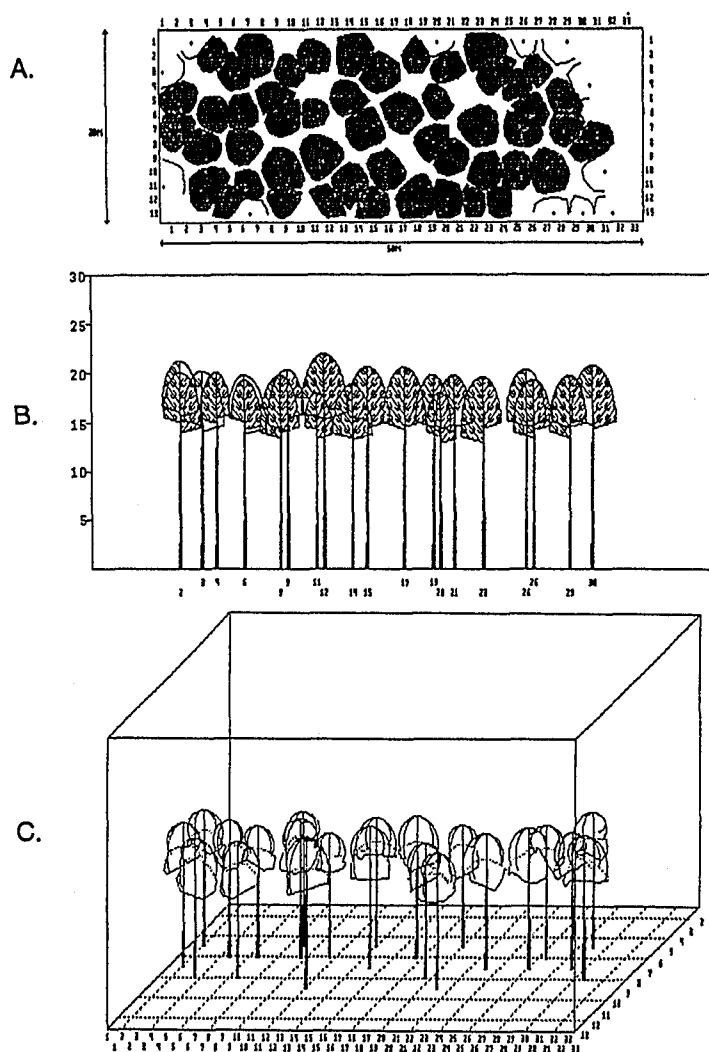
De kronensluiting is in dit voorbeeld bij laagdunning een fractie lager dan bij hoogdunning. In de voorbeelden loopt de kronensluiting terug van 120% bij 20 jarige leeftijd (nog ongedund) tot minder dan 40% bij 120 jarige leeftijd. Hieruit blijkt duidelijk hoezeer de hoeveelheid licht binnen de opstand bij toenemende leeftijd toeneemt.

## Discussie en conclusies

### Voordelen en gebruiksmogelijkheden van het model

Het PINOGRAM groeisimulatieprogramma maakt het mogelijk de groei van individuele bomen binnen een opstand zichtbaar te

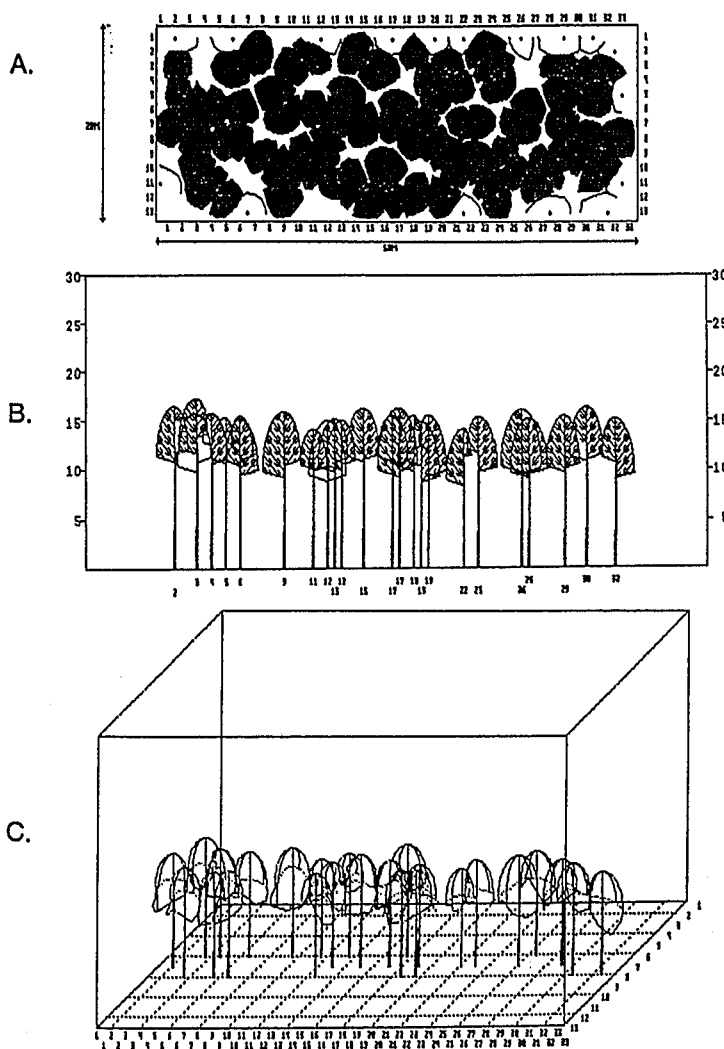
Data per ha			
Row distance: 1.5	S_min : 14.0	Max. diam: 32.8	Stemnumber/ha: 630
Dist. in row: 1.5	S_max : 24.0	Min. diam: 20.2	Basal area/ha: 35.5
Age : 100	H_mean : 19.6	Mean diam: 26.8	Volume/ha : 338.5
	H_dca : 21.6		Canopy clcs. : 64.0%



■ Fig. 4 Simulatie van een 100-jarige opstand van grove den zonder dunning. A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van de rijen 5-9; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van de rijen 5-9; assen: zie A.



Data per ha			
Row distance: 1.5	S <sub>min</sub> : 14.0	Max. diam: 23.7	Stannumber/ha: 940
Dist. in row: 1.5	S <sub>max</sub> : 24.0	Min. diam: 16.6	Basal area/ha: 28.3
Age : 50	H <sub>mean</sub> : 15.4	Mean diam: 19.6	Volume/ha : 231.7
	H <sub>dom</sub> : 17.0		Canopy clos. : 78.4%



■ Fig. 5 Simulatie van een 50-jarige opstand van grove den met laagduinning.  
 A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van de rijen 6-8; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van de rijen 6-8; assen: zie A.

maken. Verschillende teeltsystemen kunnen worden gesimuleerd om de effecten ervan op de groei van een opstand te ontdekken. De grafische weergave maakt dit inzicht communicabel en bruikbaar voor onderwijsdoelen. Het model verschaft de mogelijkheid om heterogeniteit binnen een opstand en de invloed hiervan op de groei van individuele bomen te simuleren. Het eventuele nut van zuiveren en het tijdstip waarop de eerste rendabele dunning kan worden verwacht is met behulp van het model goed te schatten. De heterogeniteit van de opstand kan visueel gemaakt worden met behulp van een driedimensionale figuur. De diversiteit in kroonvormen en diameters naast de gegevens over takdiameter zijn een goede indicatie voor de te verwachten sortimenten en hun kwaliteit die geproduceerd kunnen worden. Het model heeft de mogelijkheid om elke dunningsmethode te simuleren. Dat wil zeggen zowel de dunningsintensiteit, als het tijdstip van dunnen als de bomen die gekapt moeten worden, kunnen naar believen worden gekozen. Dit kan gebruikt worden bij het kiezen van een optimale dunningsmethode in afhankelijkheid van de beheersdoelstelling, zoals kostenminimalisatie, opbrengstmaximalisatie, duurzaamheid etc. (Oldeman 1991). Opstandstructuur in combinatie met gegevens over hoogte/diameter-verhouding, kroonlengte/boomhoogte-verhouding en kroonbreedte/boomhoogte-verhouding zijn goede data voor een risicoanalyse. Wanneer bijvoorbeeld zogenaamde risico bomen, dus bomen met een hoge hoogte/diameter-verhouding en lage kroonlengte/boomhoogte- en kroonbreedte/boomhoogte-verhouding, zich verspreid over de opstand bevinden dan is het risico op opbrengstverlies door

Tabel 3 Opbrengstgegevens na laagdunning en na hoogdunning

leeftijd (jaar)	laagdunning			hoogdunning		
	dunnings volume (m <sup>3</sup> )	$\bar{d}$ van dunnings- hout (cm)	variatie coefficient (%)	dunnings volume (m <sup>3</sup> )	$\bar{d}$ van dunnings- hout (cm)	variatie coefficient (%)
20	19.9	6.1	15.0	19.9	6.1	15.0
25	14.9	8.8	2.6	14.9	8.8	2.6
30	19.5	10.6	2.7	19.6	12.3	9.9
35	24.6	12.2	2.2	25.0	12.7	6.3
40	23.9	13.9	2.6	24.2	13.6	9.6
45	24.1	15.6	2.9	24.9	17.1	13.6
50	23.5	17.2	1.8	24.2	18.1	7.1
55	22.6	18.8	2.1	24.3	19.4	9.9
60	25.0	20.4	1.9	24.2	18.6	11.0
65	23.1	22.5	2.3	24.8	24.1	11.4
70	23.1	23.3	1.1	23.0	21.5	18.4
75	21.9	24.7	2.1	23.1	22.0	14.4
80	20.0	25.9	2.5	21.8	24.5	19.0
85	22.6	28.1	1.0	22.0	27.2	15.5
90	38.2	29.0	1.7	31.9	25.4	18.1
100	37.1	31.1	1.8	39.8	29.6	20.9
110	34.6	33.5	1.0	39.9	32.7	13.3
120	205.5	37.6	5.9	156.7	40.2	12.3
totaal gemiddeld	624 5.2			584 4.9		

storm veel kleiner dan wanneer deze bomen groepsgewijs voorkomen.

Het model is geschikt om de groei van bomen naast open plekken te berekenen, hetgeen in principe groeivoorspellingen van min of meer solitaire bomen mogelijk maakt. Dit in tegenstelling tot de vele modellen die uitgaan van een gesloten opstand (Faber 1983, Mohren 1987). Ook is te zien of een boom en in welke mate een boom een ontstane open plek opvult. In principe is daarmee het lichtklimaat op de open plek te voorspellen en daarmee één van de vestigingsvoorwaarden van verjonging (vgl. model van Koop 1989).

#### Beperkingen van het model

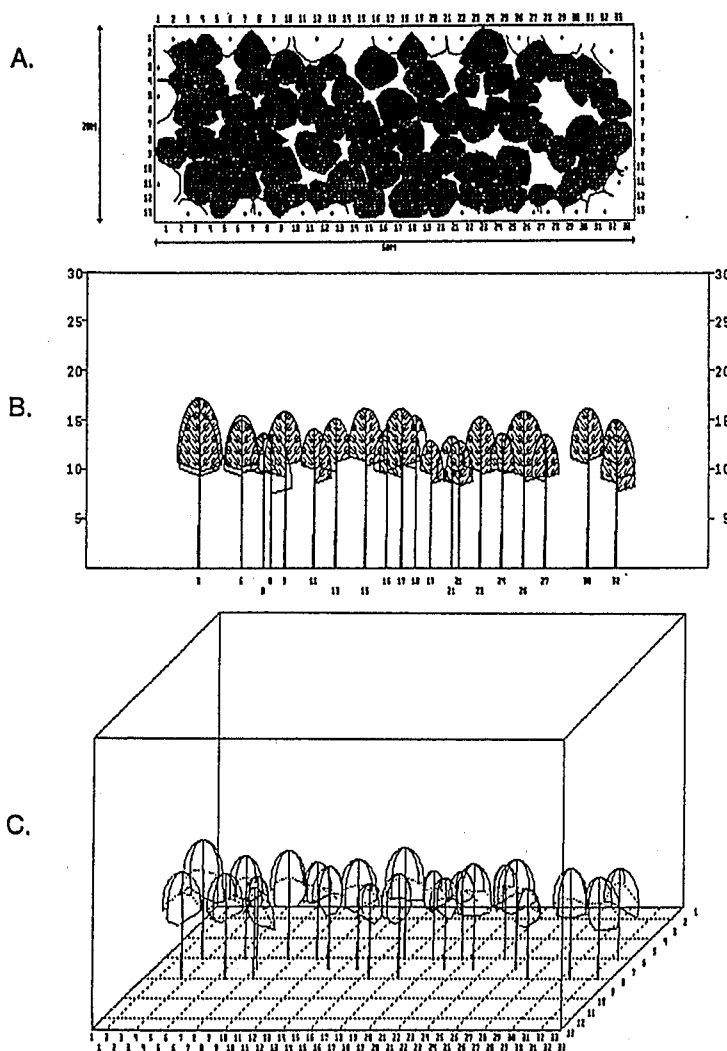
De gebruikte dataset voor het model is verzameld voor grove den groeiend op haarpodzolen op de Veluwe. Extrapolatie, door deze formules te gebruiken voor boomgroei in andere gebieden, mag niet zonder meer worden gedaan. Wel geeft het programma de mogelijkheid om de waarden van de constanten in de gebruikte formules te wijzigen. Dit heeft echter alleen zin als de nieuw in te voeren waarden zijn gebaseerd op verzamelde gegevens uit het gebied waarvoor men het model wil toepassen.

Het model heeft nog geen mogelijkheden om misvormingen van bomen uit te beelden. Ook kroonvormen zijn beperkt te simuleren. Met name bij oudere opstanden

kan dit oorzaak van grove fouten zijn. Bij oudere opstanden komt het regelmatig voor dat de top van een boom onder invloed van klimaatsfactoren als storm, sneeuw of droogte afbreekt of uitdroogt, hetgeen reïteratie tot gevolg heeft. Hierdoor ontstaan de soms zeer ondiepe, maar wel vrij brede kronen die men in het veld herhaaldelijk tegenkomt, maar niet in dit groeimodel. Daar doorheen spelen waarschijnlijk ook nog eens de gevolgen van genetische verschillen, ziekten en gebreken.

In het model wordt ervan uitgegaan dat bomen alleen van nature sterven als zij een kroonbreedte/boomhoogte-verhouding kleiner dan  $1/M$  hebben ( $M$  = mortality factor = 6). De simulatie

Data per ha				
Row distance:	1.5	S_min : 14.0	Max. dia: 25.0	Stamnummer/ha: 1060
Dist. in row:	1.5	S_max : 24.0	Min. dia: 14.2	Basal area/ha: 28.2
Age :	50	R_mean : 14.6	Mean dia: 18.4	Volume/ha : 222.7
		R_max : 17.0		Canopy clos. : 80.6%



■ Fig. 6 Simulatie van een 50-jarige opstand van grove den met hoogdunning.  
 A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van de rijen 6-8; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van de rijen 6-8; assen: zie A.

van natuurlijke sterfte is daarmee nogal simpel. Invloeden van bijvoorbeeld (micro)klimaat, ondergroei, fauna of milieuverontreiniging zijn niet rechtstreeks in het model betrokken.

Er wordt geen rekening gehouden met mogelijke groeiverschillen ten gevolge van verschillende klimaatomstandigheden in de (vier) windrichtingen.

Naarmate het programma ingewikkelder wordt nemen de eisen die gesteld worden aan de hardware software van de computer toe. Momenteel draait het programma pas redelijk wanneer men beschikt over een 286-processor plus coprocessor. De ontwikkelingen op hardware en softwaregebied gaan echter nog zo snel, dat dit probleem nog niet zo groot is.

#### **Uitbouw mogelijkheden van het model**

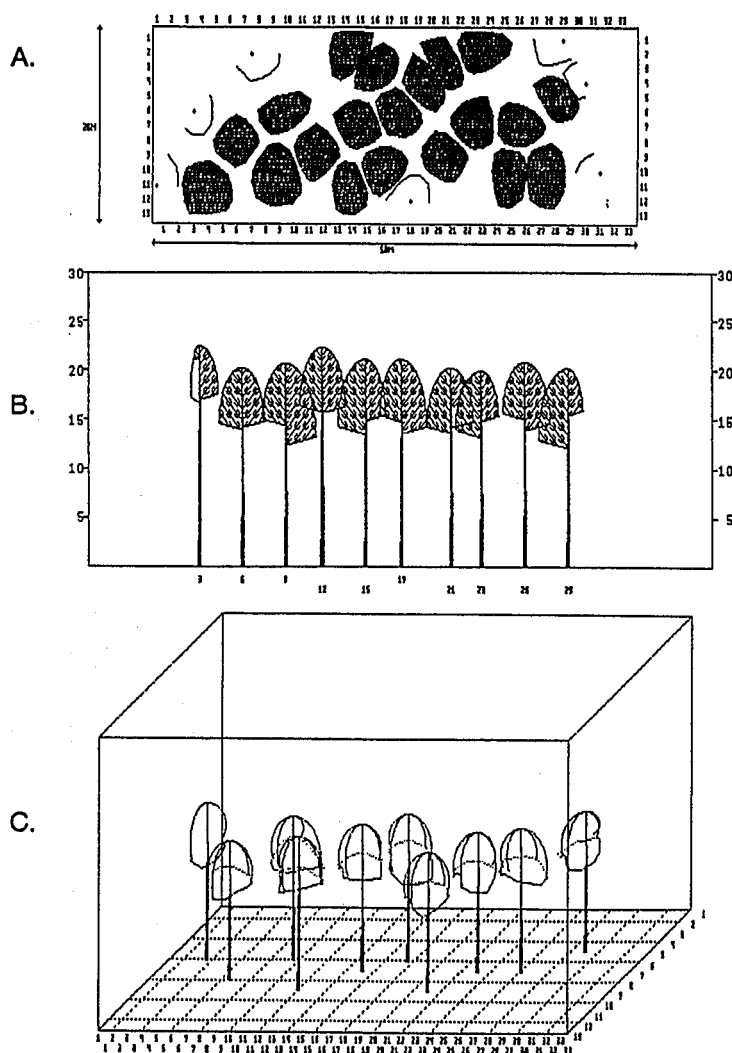
De voor het model gebruikte waarnemingsreeks is beperkt tot een deel van de Veluwe in Nederland, zodat het model in principe alleen geldig is voor dit gebied. Nieuwe waarnemingsreeksen zullen het model moeten verifiëren en mogelijk verbeteren en generaliseren.

Zodra voor andere boomsoorten eveneens groeiregels zijn te vinden zoals voor grove den zijn gevonden, dan valt mede te denken aan modellen die mengingen beschrijven. Vooral als de groei tussen de diverse soorten niet extreem verschilt is dit waarschijnlijk goed mogelijk. Wanneer wel grote verschillen in groei bestaan tussen twee boomsoorten dan wordt het van belang te weten wat het lichtklimaat ter plekke van de onderstandige bomen is alsmede de reactie van deze bomen daarop. Hetzelfde geldt bij ongelijkjarigheid. Bepaling van de standruimtevectoren is waarschijnlijk niet meer alleen afhankelijk van de hoogte,

maar ook van de leeftijd, de lichtreductie en de soortsinteractie. Het model biedt dan antwoord op tal van vragen die momenteel in de praktijk spelen. Vragen als: "Wanneer zal de jonge douglas de oude grove den zodanig beconcurreren dat een ingreep nodig is om nog enkele oude den- nen te handhaven?" en "Hoe lang kan bij gegeven plantverband en soortenmenging redelijkerwijs een menging van soorten gehandhaafd blijven?", kunnen dan veel beter beantwoord worden. Het model gaat uit van een "normaal verdeelde" range van S-waarden voor de bomen die met een kans van 0.95 loopt van een opgegeven minimum S-waarde tot een opgegeven maximum S-waarde. Daardoor valt te denken aan een groeiplaatsclassificatie die minimum en maximum S-waarde aangeeft voor diverse boomsoorten. Gezien het feit dat een groeiplaats met de tijd eveneens verandert (ontwikkeling van de bosbodem, input van externe verzurende of verrijkende stoffen via atmosfeer of mens, klimaatsveranderingen) zal ook de groeiplaatsclassificatie met een zekere regelmaat moeten veranderen. Koppeling van dit model bijvoorbeeld aan het lichtsimulatiemodel van Koop (1989) en het architectuurmodel van de Reffye et al. (1989) of Aono and Kunii (1984) lijken vrij eenvoudig. Met behulp van het lichtsimulatiemodel kan een aanzet gegeven worden voor groei van ongelijkjarige bomen en met het architectuurmodel kunnen de abstracte boomvormen een realistischer beeld krijgen, waardoor een beter inzicht kan worden gekregen in mogelijke veranderingen van boomvormen in afhankelijkheid van opstandsdichtheid, boomleeftijd en groeiplaats.

In het model hebben bomen van verschillende sociale klassen absoluut gezien wel een verschil-

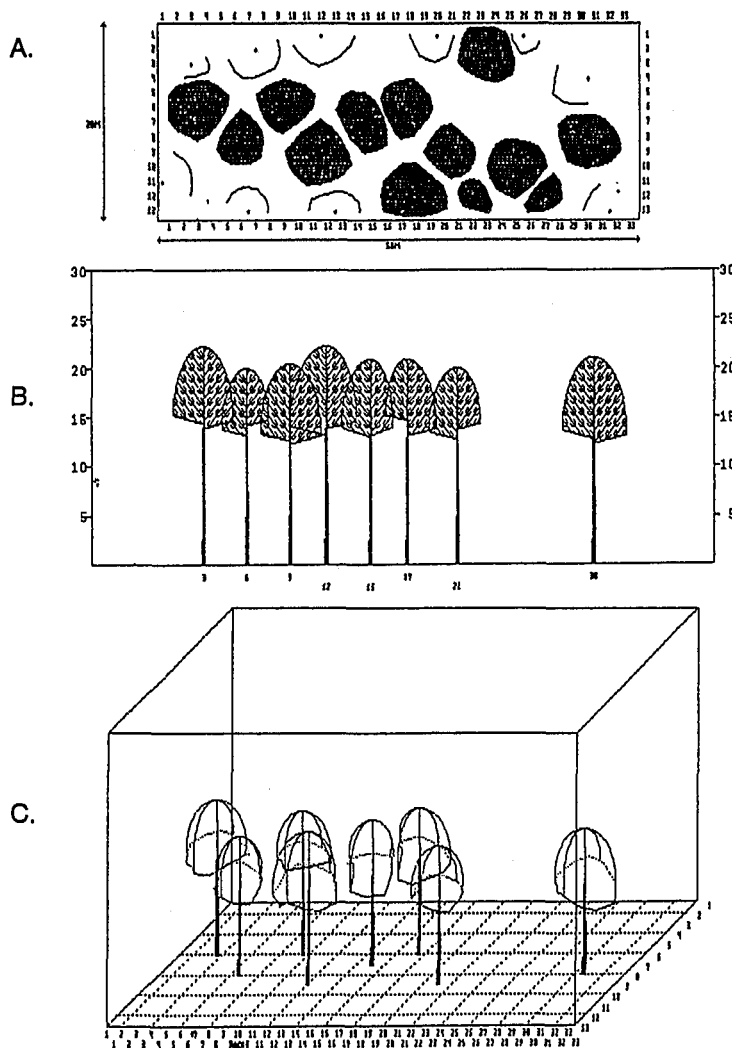
Data per ha			
Row distance: 1.5	S_min : 14.0	Max. dia: 37.8	Staanumber/ha: 270
Dist. in row: 1.5	S_max : 24.0	Min. dia: 30.4	Basal area/ha: 23.5
Age : 100	R_mean : 21.2	Mean dia: 33.3	Volume/ha : 234.5
	R_doa : 22.1		Canopy clos. : 45.1%



■ Fig. 7 Simulatie van een 100-jarige opstand van grove den met laagdunning.

A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van de rijen 5-9; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van de rijen 5-9; assen: zie A.

Data per ha							
Row distance:	1.5	S <sub>min</sub> :	14.0	Max. diam:	40.1	Stemnumber/ha:	230
Dist. in row:	1.5	S <sub>max</sub> :	24.0	Min. diam:	23.1	Basal area/ha:	20.4
Age :	100	H <sub>mean</sub> :	20.2	Mean diam:	33.6	Volume/ha :	197.9
		H <sub>dom</sub> :	21.8			Canopy clcs. :	46.6%



■ Fig. 8 Simulatie van een 100-jarige opstand van grove den met hoogduinning.  
 A. Kroon projectie; verticale as: rijnummer; horizontale as: boomnummer in rij. B. Profiel diagram van de rijen 5-9; verticale as: boomhoogte; horizontale as: boomnummer in rij. C. Driedimensionale weergave van de rijen 5-9; assen: zie A.

lende groei, maar relatief gezien niet (alle bomen groeien volgens de Chapman-Richards formule, echter met verschillende S-waarde). Wanneer beter bekend is hoe de relatie tussen lichtreductie en remming van de hoogtegroei ligt of wat de minimumwaarde is voor de standruimte, waar beneden de hoogtegroei van bomen gaat afnemen, kan dit een verbetering van het model gaan betekenen. Verder uitbreidingen aan het model PINOGRAM zijn mogelijk voor bijvoorbeeld wortelgroei en houtkwaliteit. Tenslotte is het niet onwaarschijnlijk dat een methode bedacht kan worden om een teeltsysteem vanaf een gegeven uitgangssituatie met behulp van dit programma te optimaliseren voor een bepaald doel.

**Het programma PINOGRAM is te koop bij de vakgroep van de Landbouw Universiteit in Wageningen. Kosten f45,-.**

#### Literatuur

- Aono, M., Kunii, T.L., 1984. Botanical tree image generation. IEEE Computer Graphics & Applications 4: 5. 10-34. University of Tokyo.
- Bastide, J.G.A. la, Faber, P.J., 1972. Revised yield tables for six tree species in the Netherlands. Uitvoerig verslag. Band 11: 1. 64 pp. Stichting bosbouwproefstation "De Dorschkamp", Wageningen.
- Burg, J. van den, Faber, P.J., Waenink, A.W., 1983. Groei en groeiplaats van de grove den. Nederl. Bosb. Tijdschr. 55: 7/8: 294-307.
- Bormann, F.H., Likens, G.E., 1979. Pattern and process in a forested ecosystem. 253 pp. Springer. Berlin, Heidelberg, New York.
- Carvalho Oliveira, A.M.M. de, 1980. Untersuchungen zur Wachsdynamik junger Kiefernbestände. 300 pp. München.
- De Reffye, Ph., Elguero, E., Costes, E., 1989. Growth units construction in trees: a stochastic approach. Communication to the 9th se-

- minar of the theoretical biology school. Solignac, 21-23 sept. 1989. 14 pp. Laboratoire de Modélisation, CIRAD, Montpellier.
- Faber, P.J., 1971. Stamaldichtheid en ontwikkeling van jonge Pinus-opstanden. Mededelingen 118. 14 pp. Stichting bosbouwproefstation "de Dorschkamp", Wageningen.
- Faber, P.J., 1983. Concurrentie en groei van de bomen binnen een opstand. Uitvoerig Verslag. Band 18: 1. 116 pp. Rijksinstituut voor onderzoek in de bos- en landschapsbouw 'De Dorschkamp', Wageningen.
- Faber, P.J., 1986. De ruimtekenmerken en de sociale positie bij het vrijstellen van toekomstbomen. Rapport 465. 31 pp. Rijksinstituut voor onderzoek in de bos en landschapsbouw 'De Dorschkamp', Wageningen.
- Goudriaan, J., 1982. Potential production processes. In F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (Eds): Simulation of plant growth and crop production. 98-113. Simulation Monograph. Pudoc, Wageningen.
- Grandjean, A.J., Stoffels, A., 1955. Opbrengsttabellen voor de grove den in Nederland. Nederl. Bosb. Tijdschr. 27: 9. 215-231.
- Hari, P., Kaipainen, L., Korpilahti, E., Mäkelä, A., Nilson, T., Oker-Blom, P., Ross, J., Salminen, R., 1985. Structure, radiation and photosynthetic production in coniferous stands. Research notes. Tiedonantoja 54. 233 pp. Department of Silviculture. University of Helsinki.
- Harper, J.L., 1977. Population biology of plants. Academic press. 174-189. London, New York.
- Hesselink, E., 1922. De betekenis van het zaadvraagstuk van onze grove dennenbosschen. Mededelingen van het Rijksboschbouwproefstation Deel 1. 10-102. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona.
- Oldeman, R.A.A., 1991. Bosarchitectuur en diversiteit: Wat is er gemengd in gemengde bossen? Boscosecosystemen 7.
- Prodan, M., 1968. Einzelbaum Stichprobe und Versuchsfläche. Allg. Forst- und Jagdzeitung 139: 10. 239-248.
- Schulz, B., 1968. Programm zur Berechnung des Standraumes in einschichtigen Beständen. Allg. Forst- und Jagdzeitung 139: 10. 232-234.
- Schütz, P.R., Van Tol, G., 1982. Aanleg en beheer van bos en beplantingen. 504 pp. PUDOC, Wageningen.
- Soest, J. van, 1952. Herkomstonderzoek van de grove den (Pinus sylvestris) in Nederland. Uitvoerig verslag van het bosbouwproefstation TNO. Band 1: 2. 49 pp.
- White, J., 1981. The allometric interpretation of the self-thinning rule. J. Theor. Biol. 89. 475-500.
- Wiedemann, E., 1943. Kiefer. In: Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 154 pp. Neuberarbeitet von R. Schober, 1975, Göttingen. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- Wiedemann, E., 1948. Die Kiefer. Waldbauliche und ertragskundliche Untersuchungen. 357 pp. Verlag M. & H. Schaper. Hannover.
- Wiersma, J.H., 1985. De herkomstenkwestie bij de grove den. Nederl. Bosb. Tijdschr. 57: 3. 75-82.
- Yoda, K. et al., 1963. Intraspecific competition among higher plants. Part II: Self thinning in overcrowded pure stand under cultivated and natural conditions. J. Biol. 14. 107-129.
- Het Bosschap, 1990. De financiële resultaten van de teelt van enige voor de Nederlandse bosbouw belangrijke boomsoorten. Uitgave Bosschap.
- Jack, W.H., 1967. Single tree sampling in even aged plantations for survey and experimentation. Proc. 14e IUFRO Congres München VI(25). 379-403. München
- Kellomäki, S., 1986. A model for the relationship between branch number and biomass in Scots pine crowns and the effect of crown shape and stand density on branch and stem biomass. Scandinavian Journal of Forest Ecology 1. 455-472.
- Koop, H., 1989. Forest dynamics. SILVI-Star: A comprehensive Monitoring System. Dr. thesis. 229 pp. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong.
- Kriek, W., 1983. Naar een betere genetische kwaliteit van het Nederlandse grove dennenbos. Nederl. Bosb. Tijdschr. 55: 7/8. 314-329.
- Leersnijder, R.P., 1992. Pinogram; A pine Growth Area Model. Ecological Modelling. Vol. 61. 1-152. Elsevier. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.
- Mc Fadden, G., Oliver C.D., 1988. Three dimensional forest growth model relating tree size, tree number and stand age. Relations to previous growth models and to self thinning. Forest Science 34:3. 662-676.
- Mohren, G.M.J., 1987. Simulation of forest growth, applied to douglas fir stands in the Netherlands. Dr. thesis. 183 pp. Agricultural University, Wageningen.
- Oldeman, R.A.A., 1974. L'architecture de la forêt guyanaise. Mém. ORSTOM 73. 204 pp. Paris.
- Oldeman, R.A.A., 1990. Forests: Elements of Silvology. 624 pp.