

# Modellering av etablering och tillväxt för planterad gran i Sydsverige

Fredrik Nordborg  
Institutionen för Sydsvensk Skogsvetenskap  
23053 Alnarp

## ***Inledning***

Etableringen av ett bestånd är en kostsam investering där det tar lång tid innan man får tillbaka sina investerade pengar. Därför behöver skogsägaren minimera kostnaderna vid etableringen. Eftersom det är dyrt och osäkert att hjälpplantera (Gemmel 1987) så är skogsägaren också intresserad av att använda sig av en säker förnygringsmetod. Det är ofta svårt att få både en säker och en billig förnygringsmetod och därför blir den valda metoden ofta en avvägning mellan säkerhet och kostnad.

Variationen i tillväxt är större för plantungskogar än för medelålders och äldre skogar. Det finns flera skäl till detta. Eftersom plantornas rotsystem har en liten utbredning på ståndorten får skillnaden i vatten- och näringstillgång samt vegetationskonkurrens mellan olika delar av ståndorten större genomslag på tillväxten än i slutna äldre bestånd (Burdett 1990, Nilsson & Örlander 1999, Nordborg 2001). Plantorna är också mer utsatta för olika skador såsom frost, snytbagge och viltbete än äldre träd (Bergquist 1998, Langvall 2000, Petersson 2004). Det finns flera åtgärder som minskar mängden skador på plantorna och variationen inom ståndorten såsom exempelvis insekticider, markberedning och hyggesvila (Nilsson & Örlander 1999). Det är inte bara skillnaderna i medeltillväxt för olika behandlingar som är intressanta att studera utan även variationen mellan plantorna i planteringen. Skillnaderna i tillväxt börjar tidigt om ståndorten är heterogen eller om plantorna utsätts för olika skador (Nordborg 2001). Detta kan få till följd att beståndet differentieras tidigt och risken för självgallring ökar vilket gör att skötselintensiteten under senare delar av omloppstiden kan behöva ökas (Nilsson & Allen 2003).

Rotsystemet på nyplanterade plantor som ännu inte etablerat en god kontakt med den omgivande jorden har en lägre närings- och vattenupptagande förmåga än etablerade plantor (Burdett 1990). Studier av granplantor har visat att nyplanterade plantor har en större torkkänslighet än etablerade vilket påverkar tillväxten under etableringsåret men även kan påverka tillväxten året efter. Detta eftersom knoppen som bildar nästa års tillväxt skapas under etableringsåret för granar (Grossnickle 2000).

Fältvegetationen på hyggen i södra Sverige domineras ofta av kruståtel vilket är ett smalbladigt gräs som bildar en tät grässvål på hygget (Nilsson & Örlander 1999). Dessutom har hyggesvegetationen blivit allt mer dominerad av gräs under de senaste 30 åren i södra Sverige (Rosén et al. 1992). Gräs konkurrerar svårt med plantorna om de tillgängliga resurserna på ett hygge (Davies 1985). Kruståtel konkurrerar med plantorna om vatten och näring men studier visar att kruståtel inte reducerar ljuset för granplantor i den utsträckningen att det påverkar tillväxten (Nilsson & Örlander 1999). Markberedning har visat sig vara effektivt för att minska vegetationskonkurrensen av gräs på äldre hyggen där gräsvegetationen är tät. Markberedningseffekten är störst under torra somrar (Örlander et al. 1996, Nilsson & Örlander 1999).

## **Modellbeskrivning**

Modellering av tillväxten i skogsbestånd har en lång historia i Sverige. De flesta av dessa modeller är utvecklade för medelålders och äldre skogar men även en del ungskogsmodeller är utvecklade. Trots att det har bedrivits omfattande forskning inom förnygringsområdet är det dock få försök gjorda på att modellera förnygringsfasen. En anledning är nog sannolikt att variationen i tillväxt är stor under förnygringsfasen och att tillväxten är beroende av många olika variabler att traditionell modellering inte fungerar tillfredsställande. Förutom tillväxten är man även tvungen att modellera skador och mortalitet i förnygringarna då risken för olika skador är större under förnygringsfasen än senare under omloppstiden.

De traditionella modellerna som använts för att modellera skogstillväxt är vanligtvis empiriska modeller vilket innebär att man anpassar en matematisk funktion till ett samband baserat på uppmätta data av det man vill modellera. Dessa modeller är ofta förhållandevis robusta men ger inte alltid en förklaring till underliggande processer och går heller inte att använda utanför det underliggande materialets ramar. Därför kan man inte använda sig av empiriska modeller om man vill modellera tillväxteffekter av en klimatförändring eller en skogsbruksmetod som inte ingår i grunddata. För att modellera effekter och förhållanden där inga empiriska data finns att tillgå har man använt sig av processbaserade (eller kausala) modeller där man försöker att kvantifiera de viktiga processerna som styr det man vill modellera. De skogliga modellerna är det ofta kolbalansmodeller, där man försöker modellera fotosyntes och respiration och påverkan av klimat, vatten samt näring.

Under de senaste åren har enkla och robusta processbaserade modeller utvecklats och ett par av dem används i det praktiska skogsbruket för att uppskatta tillväxteffekter av olika gödslingsregimer, klonprogram och klimatförändringar (Landsberg & Waring 1997, Johnsen et al. 2001). Kolbalansmodeller lämpar sig utmärkt om man är intresserad av att uppskatta biomassatillväxt. I praktiskt skogsbruk är man även intresserad av att uppskatta trädens höjd- och diameterutveckling. Det är oftast de processbaserade modellerna dåliga på och därför får man lösa detta med empiriskt framtagna komponenter i modellen. En annan svaghet med processbaserade modeller är att de ofta erfordrar många parametrar som ibland är dåligt underbyggda eller svåra att mäta. Genom att använda sig av både empiriska och kausala komponenter i modellen kan man skapa en hybridmodell som kombinerar den processbaserade modellens flexibilitet med den empiriska modellens deskriptiva tillförlitlighet (Landsberg 2003, Johnsen et al. 2001).

En enkel processbaserad modell med empiriska komponenter är 3-PG som har visat sig ge tillförlitliga simuleringar av tillväxten i flera olika typer av skogsbestånd på flera håll i världen (Landsberg & Waring 1997, Landsberg et al. 2001). Den har också blivit använd av skogsfolk för analyser i det praktiska skogsbruket. Modellen är baserad på fysiologiska principer och är parameteriserad med empiriska data. 3-PG är en beståndsmodell och drivs av en funktion för fotosynteshastigheten hos trädet. Den potentiella fotosynteseffektiviteten påverkas av abiotiska miljöfaktorer såsom ångtrycksdeficiten, markvatteninnehåll, näringstillgång i marken och lufttemperatur och i modellen beräknas hur stor denna påverkan är.

Eftersom 3-PG är en enkel samt redan fungerande och använd modell valde vi att använda denna som en bas för förnygringsmodellen men eftersom 3-PG är framtagen för slutna jämnåldriga äldre bestånd måste den modifieras för att kunna användas för att simulera tillväxten i plantungskogar. Den måste då göras om till en modell för enskilda träd eftersom krontäcket inte är slutet och bara delar av det infallande ljuset kan absorberas av träden.

Konkurrerande fältvegetation, effekter av olika markberedningsmetoder och effekten av att plantan måste etablera sig är också faktorer som inte är inkluderade i 3-PG och som måste utvecklas. Plantornas höjd måste också beräknas i en speciell funktion då det ej finns någon sådan i 3-PG.

## Översikt

Modellen är en hybridmodell för enskilda granplantor som beskriver tillväxten för de första fem åren efter plantering på hyggen dominerade av kruståtel. I modellen sker beräkningarna i veckovisa steg och behöver olika klimatvariabler, ståndortsfaktorer och skötselmetoder. Modellen levererar biomassan av blad/barr, rötter samt stam och kvistar. Dessutom beräknar modellen planthöjd och stambasdiameter. För att beräkna situationen för plantan sker beräkningar av markvatteninnehållet samt fältvegetationens biomassa och bladarea. Modellen är parametriserad med hjälp av data funna i litteraturen och med speciellt för modellen framtagna data.

Modellen består av åtta undermodeller:

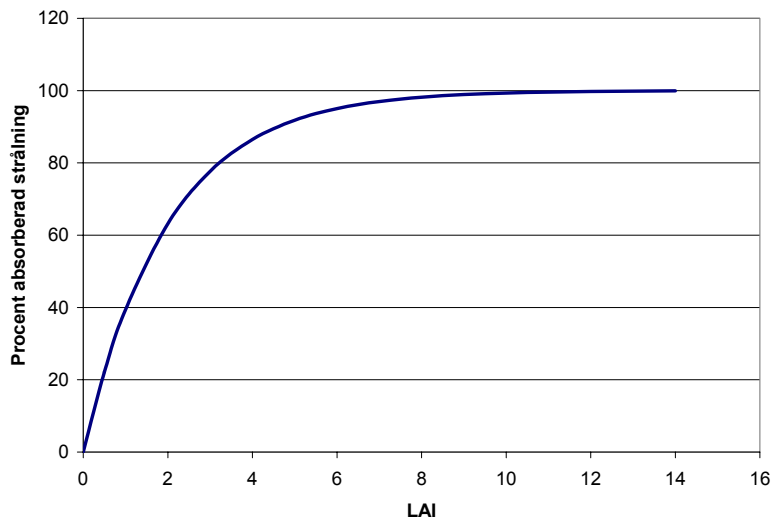
1. Absorptionen av ljuset
2. Assimilering av kolhydrater och biomassatillväxt
3. Distributionen av biomassa mellan blad, rötter och stamved.
4. Beräkning av rotvolymen
5. Beräkning av höjd och stambasdiameter.
6. Beräkning av marktemperatur.
7. Beräkning av mängden konkurrerande vegetation.
8. Beräkning av markvatteninnehållet.

## Ljusabsorption

Modellen behöver total ackumulerad globalstrålning per vecka som indata i  $\text{MJ m}^{-2}$ . Med hjälp av funktioner framtagna av Erbs et al. (1982) så fördelas ljuset i direkt och indirekt ljus. Det direkta ljusets infallsvinkel bestäms av solhöjden för perioden och vinklarna för det indirekta ljuset bestäms av proportionerna för ”standard overcast skye” (Anderson 1966). För att förenkla beräkningarna partitioneras ljuset i fem sektorer med centrumvinkeln  $9^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $63^\circ$  och  $81^\circ$ . Precis som i 3PG och i de flesta andra processbaserade modeller antas PAR (Photosynthetic Active Radiation) vara hälften av den globala strålningen (Landsberg & Waring 1997).

Plantornas kronform representeras i modellen av en ellipsoid. Mätningar i fält visar att kronans höjd för granplantor upp till fem års ålder är lika lång som plantans höjd (opublicerat material). Samma mätningar visade att kronans bredd var proportionell mot plantans höjd ( $\text{Kron diameter} = 0.6664 * \text{Planthöjd} - 4.7811$ ,  $R^2 = 0.9267$ , för 372 plantor mellan 5 och 218 cm höjd). Proportionen mellan kronbredd och planthöjd var oberoende av ståndort och markberedningsmetod för plantor i södra Sverige (opublicerat material).

Plantans barrarea antas vara jämt fördelad i kronan och plantans ljusabsorption antas vara proportionell mot bladyteindex (Leaf Area Index, LAI). LAI beräknas genom att dividera plantans barrarea med plantans projicerade area. Projicerad kronarea och LAI varierar med den vinkel ljuset faller in ifrån och detta får en stor betydelse för hur stor ljusabsorptionen blir. Det är därför det har varit så viktigt att separera ljusinfallet i direkt och indirekt ljus och partitionera ljuset i olika infallsvinklar. Ljusabsorptionen beräknas med hjälp av Lambert-Beers lag (Fig. 1). Detta är en robust och allmänt använd funktion för ljusabsorption som är använd i de flesta modeller.



Figur 1. Andelen strålning som absorberas av träden vid olika barrtätheter (LAI = Leaf Area Index, bladyteindex) beräknat genom Lambert-Beers lag.

### Assimilering av kolhydrater och biomassatillväxt

Plantornas nettoproduktion beräknas på samma sätt som i 3-PG (Landsberg & Waring 1997) med några små modifieringar. Primärproduktionen beräknas som i 3-PG genom att absorberad PAR multipliceras med en faktor för fotosynteseffektiviteten (canopy quantum efficiency). För att förenkla modelleringen och på grund av att få kvantifieringar är gjorda förutsätter vi att respirationen är en konstant procentsats, 47 % av primärproduktionen.

Fotosynteseffektiviteten påverkas i modellen av markvatteninnehållet, ångtrycksdeficiten, näringstillgången, lufttemperaturen och frost. Som komplement till dessa faktorer som ingår i 3PG, ingår även i plantmodellen marktemperatur då denna är viktig för etableringen av plantan och en modifierare som speglar plantans etablering. Denna faktor behövs eftersom studier har visat att plantans fotosyntes är reducerad efter plantering som ett resultat av dålig rot-jordkontakt och därigenom otillräckligt vatten- och näringsupptag (Grossnickle 2000, Nordborg & Welander 2001, Nordborg 2001, Nordborg et al. 2003). Funktionen för fotosynteseffektiviteten (canopy quantum efficiency,  $\alpha_c$ ) ser ut som nedan.

$$\alpha_c = \alpha_{cx} * \min\{f_{VPD}, f_{SW}\} * f_N * f_T * f_F * f_{ST} * f_{EstMod}$$

Den maximala fotosynteseffektiviteten ( $\alpha_{cx}$ ) är den fotosynteseffektivitet som kan uppmätas under ideala förhållanden. Denna kan reduceras i ovanstående funktion med sju olika modifierare ( $f_{VPD}$ ,  $f_{SW}$ ,  $f_N$ ,  $f_T$ ,  $f_F$ ,  $f_{ST}$ ,  $f_{EstMod}$ ). Precis som i 3-PG är det den lägsta av markvattenmodifieraren ( $f_{SW}$ ) och ångtrycksmodifieraren ( $f_{VPD}$ ) som modifierar fotosynteseffektiviteten. Andra modifierare i 3-PG är lufttemperaturmodifieraren ( $f_T$ ), näringsmodifieraren ( $f_N$ ) och frostmodifieraren ( $f_F$ ). Det är marktemperaturmodifieraren ( $f_{ST}$ ) och etableringsmodifieraren ( $f_{EstMod}$ ) som är nyutvecklade för plantmodellen. Modifierarna antar värden mellan 1 och 0. De modifierare som kommer från 3-PG ( $f_{VPD}$ ,  $f_{SW}$ ,  $f_N$ ,  $f_T$  och  $f_F$ ) beräknas på precis samma sätt som i den modellen (Landsberg & Waring 1997).

Fotosyntesen hos nyplanterade plantor i boreala och tempererade områden har visat sig ligga mellan 20 och 40 % jämfört med etablerade plantor (Örlander & Due 1986 och Grossnickle 2000). Skälet till detta är att vatten- och näringsupptagningsförmågan är reducerad som ett resultat av skador på rotsystemet i samband med omplanteringen och för att rot-jordkontakten är bruten. Det tar mellan fyra veckor och upp till mer än ett år att uppnå full vatten- och

näringsupptagningsförmåga och därmed få full fotosyntes (Örlander & Due 1986, Grossnickle 2000 and Nordborg et al. 2003). Vatten- och näringsupptaget ökar genom rottillväxt, både som ett resultat av att en ökad jordvolym kan exploateras och genom att rot-jordkontakten ökar (Burdett 1990, Nordborg et al. 2003). Funktionen för etableringsmodifieraren ser ut som nedan;

$$f_{\text{EstMod}}(t) = f_{\text{EstMod}}(0) + ((1 - f_{\text{EstMod}}(0)) * ((\text{RE}(t) / \text{RE}_{\text{EstMod}}))$$

If  $f_{\text{EstMod}}(t) > 1$  Then  $f_{\text{EstMod}}(t) = 1$

Där  $f_{\text{EstMod}}(t)$  är värdet på etableringsmodifieraren vid tiden  $t$  och  $f_{\text{EstMod}}(0)$  är värdet på etableringsmodifieraren vid plantering. Detta värde sätts av användaren.  $\text{RE}(t)$  är rotlängden vid tiden  $t$  och  $\text{RE}_{\text{EstMod}}$  är längden på rötterna när plantan är fullt etablerad. Eftersom plantorna har tillräcklig vatten- och näringsupptagningsförmåga vid goda förhållanden trots att de inte är fullt etablerade (Grossnickle 2000) har en korrektion lagts in för att korrigera detta.

Marktemperaturmodifieraren ( $f_{\text{ST}}$ ) beräknas utifrån resultat av DeLucia (1986) som visar att fotosynteshastigheten reduceras vid låga marktemperaturer. DeLucias (1986) resultat kommer från *Picea engelmanni* och då liknande data ej fanns att tillgå för vanlig gran användes dessa i modellen. Följande beräkning användes för att beräkna marktemperaturmodifieraren (ST är marktemperaturen i grader Celsius):

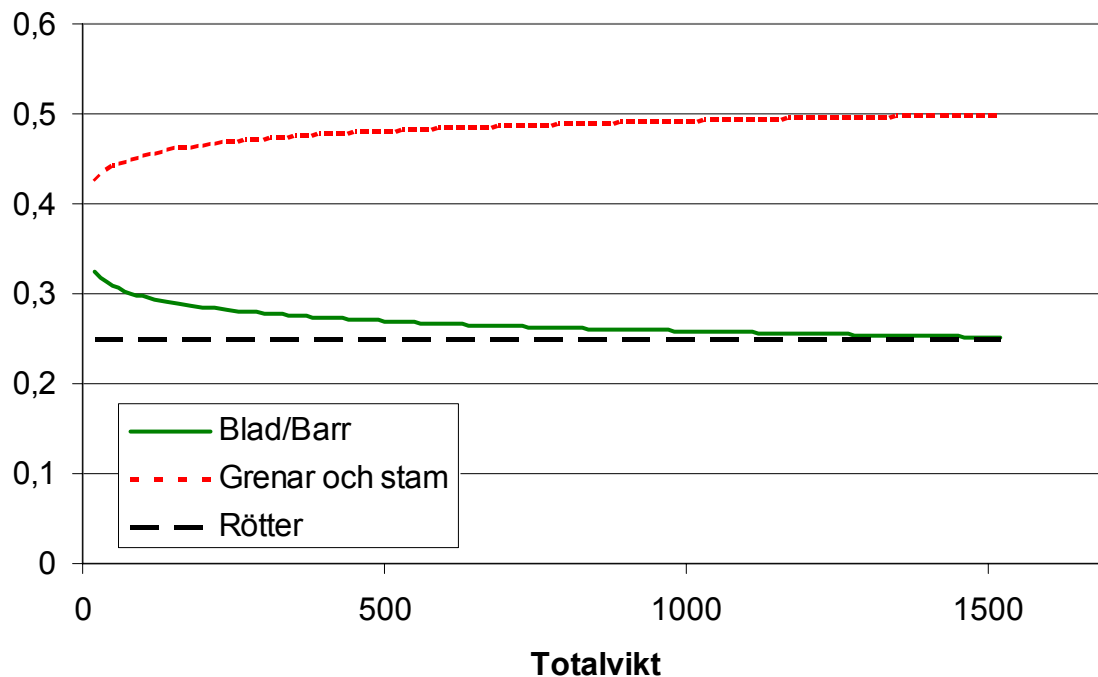
If  $\text{ST} \leq 0$  Then  $f_{\text{ST}} = 0$   
 If  $\text{ST} > 0$  And  $\text{ST} < 2$  Then  $f_{\text{ST}} = 0.2745 * \text{ST}$   
 If  $\text{ST} \geq 2$  And  $\text{ST} < 10$  Then  $f_{\text{ST}} = 0.0564 * \text{ST} + 0.4363$   
 If  $\text{ST} \geq 10$  Then  $f_{\text{ST}} = 1$

### **Fördelningen av tillväxten mellan barr, skott och rötter**

I modellen fördelas biomassaökningen på barr, skott och rötter. Fördelningen sker på liknande sätt som i 3-PG förutom att allokeringskoefficienterna i plantmodellen baserar sig på biomassa istället för diameter som i 3-PG. Skälet till detta är att plantmodellen primärt modellerar biomassa och därefter översätter till diameter och därför blir modelleringen av allokeringskoefficienterna baserad på biomassa mer korrekt. Det har tidigare varit svårt att få tag på allokeringskoefficienter för plantor baserade på biomassa men de senaste åren har ett flertal studier med destruktiv provtagning givit ett bra empiriskt underlag (Nordborg et al. 2003, Nordborg & Nilsson 2004, Nordborg et al. In Press). När allokeringskoefficienterna beräknades utifrån det tillgängliga materialet för granplantor i södra Sverige var koefficienterna inte beroende av ståndort eller behandling. Detta var dock mycket förvånande då litteraturen visar på flera studier där allokeringen förändras med olika behandlingar och ståndorter (Grossnickle 2000). Skälet till detta kan vara att de behandlingar och ståndorter som fanns med i det empiriska materialet vi beräknade allokeringskoefficienterna på inte hade den variationen som experimentstudierna som Grossnickle (2000) refererade till.

För granplantor upp till fem års ålder allokeras 25 % av biomassan till rötterna. För barr och stamdelar används samma funktioner som i 3-PG ( $W_i = a_i W^{m_i}$ ). Allokeringskoefficienterna för granplantor visas i Fig. 2.

## Allokeringskoefficienter



Figur 2. Allokeringen av producerad biomassa till olika plantfraktioner vid olika plantstorlekar för granplantor i södra Sverige. Ju större plantorna blir desto större andel allokeras till stam och grenar och tvärtom när det gäller barr. I modellen är allokeringen till rötterna fixerad till 25%.

### Förnafall och finrotomsättning

I modellen är finrotomsättningen en konstant procentsats av rotbiomassan. För att beräkna barrförnafallet anger man hur många levande barrårgångar plantan har och då modellen räknar ut hur mycket barr som produceras varje år tar helt eller delvis bort de äldre barrårgångarna ur barrbiomassapoolen. På plantor i södra Sverige fann jag att granplantor har mellan tre och fyra levande barrårgångar (opublicerat material).

Beräkning av rotningsvolymen.

Beräkning av rotningsvolymen används för att beräkna plantans individuella vattentillgång. Denna markvattentillgång styr sedan markvattenmodifieraren och rottillväxten och därmed den framtida rotningsvolymen. Rotningsvolymen beräknas genom att först beräkna rotsystemets areal och sedan multiplicera med det angivna rotningsdjupet. Rottillväxten är lägre vid torra, försumpning, låg marktemperatur, låg näringstillgång och vid stort markmotstånd (Grossnickle 2000, Nordborg & Welander 2001, Nordborg and Nilsson 2003). Rottillväxten sjunker också när skottens tillväxt är hög som ett resultat av hög intern konkurrens om kolhydraterna i plantan. Tillväxten av rotsystemets utbredning beräknas genom att man modifiera den maximala rottillväxthastigheten (MDRER) med en markvattenmodifierare ( $RE_{fSW}$ ), en marktemperaturmodifierare ( $RE_{fST}$ ), en markluckringsmodifierare ( $RE_{fPR}$ ) samt en modifierare för den interna konkurrensen om kolhydrater ( $RE_{fSG}$ ).

$$RE = 7 * MDRER * RE_{fSG} * RE_{fPR} * \text{Minimum}(RE_{fSW}, RE_{fST})$$

Litteraturen kan inte visa om effekterna av marktemperaturen och markvatteninnehållet är additiva eller om det finns några interaktioner så vi har bestämt att använda den lägsta av de två modifierarna.  $RE_{fsw}$  och  $RE_{fst}$  beräknas genom att man bestämmer ett undre gränsvärde där rottillväxten avstannar och sedan ett övre gränsvärde där rottillväxten är maximal. Självklart borde rottillväxten minska om det blir för varmt eller om det blir för blött men då jag har begränsat mig till att modellera friska ståndorter i tempererade eller boreala skogar inträffar där dessa tillstånd inträffar så sällan att jag uteslutit dem ur modellen. Mellan det undre gränsvärdet som får värdet 0 och det övre som får gränsvärdet 1 antar vi en linjär ökning eftersom litteraturen inte kan visa på att någon annan funktion skulle vara bättre. Om det inte är någon pågående skotttillväxt är  $RE_{fsg}$  lika med 1 annars antar den ett värde mellan 0 och 1 som användaren sätter. Om marken är luckrad antar  $RE_{fpr}$  värdet 1 och om den inte luckrad minskar värdet till ett värde mellan 0 och 1. Om rötterna växer utanför en luckrad markberedning går värdet från 1 till det angivna värdet för icke luckrad jord. Den årliga rotsystemradien adderas med ökad tillväxt och rotsystemvolymen ökas.

## Höjdtillväxt

Höjdtillväxten för granplantor är inte korrelerad till biomassaökningen (opublicerade data). Därför går inte den beräknade biomassaökningen att använda för att modellera plantornas höjd. Bladareans densitet i kronan varierar kraftigt och är inte konstant över tiden så att denna går inte heller att använda för att beräkna plantans höjd. Därför beslutade vi att utveckla en fristående höjdtillväxtfunktion.

Principen för höjdtillväxtmodellen är att man beräknar en maximal relativ tillväxt som är beroende av plantans höjd. För granplantor i södra Sverige ser funktionen ut så här:

$$\text{MaxRGR}(t+1) = 7.6409 * \text{Height}(t)^{-0.3104}$$

Detta är en empirisk modell framtagen genom att välja ut de plantor som har den högsta relativa tillväxten ur ett flertal försök i södra Sverige och anta att dessa snabbväxande plantor har i det närmaste perfekta förhållanden. Denna ideala tillväxt är sedan modifierad med ett antal abiotiska faktorer såsom markvatteninnehåll och näringstillgång. För höjdtillväxten använder vi för enkelhetens skull samma modifierare som för biomassaökningen. Då vatten- och näringsupptagningsförmågan är reducerad direkt efter plantering används etableringsmodifieraren även här. Granplantornas höjdtillväxt är också påverkad av föregående års förhållanden eftersom knoppen och antalet celler i det blivande skottet anläggs då. Eftersom fri tillväxt för planterade granar i södra Sverige är sällsynt så måste den förutbestämda tillväxten för granar beaktas och infogas i modellen.

Första steget är att räkna ut den potentiella relativa tillväxten,  $\text{MaxRGR}(t+1)$ , sedan bestämmer man den potentiella årliga tillväxten genom följande funktion;

$$\text{PotYSG}(t+1) = \text{Height}(t) * \text{MaxRGR}(t+1) - \text{Height}(t)$$

Efter detta bestämmer man tidpunkten för knoppsprickning och slutet för skottsträckningen. Knoppsprickningen styrs av temperatursumman (Hannerz 1999) och skottet slutar att sträcka när daglängden minskat till en kritisk nivå (Dormling et al. 1968). Eftersom modellen jobbar med veckovisa steg dividerar vi den potentiella årstillväxten med antalet veckor som skottet sträcker och får då en potentiell veckonivå för skottets sträckning.

För att beräkna fjolårets påverkan på höjdtillväxten går modellen ett år tillbaka och tittar på förhållandena under knoppbildningen. Mängden celler i knoppen är beroende av temperatur,

vattentillgång och näringstillgång (Grossnickle 2000). Knoppen börjar bildas ca 4 veckor efter det att skottet börjar sträcka och pågår ungefär i sex veckor (opublicerade data, REFS). Under dessa sex veckor beräknas en modifierare för skotttillväxten enligt följande;

$$\text{MitoticCorr} = f_{\text{EstMod}} * f_{\text{SW}} * f_{\text{N}} * f_{\text{T}}$$

Medelvärdet för dessa sex veckor bildar sedan modifieraren för knoppbildningen (LastYearCorr). Värdet på LastYearCorr är 1 under första året då förhållandena under vistelsen i plantskolan är väldigt goda. Sista steget är att beräkna höjdtillväxten för varje vecka enligt följande modell;

$$\text{Height}(t+1) = \text{Height}(t) + (\text{PotWSG} * \text{LastYearCorr} * f_{\text{EstMod}} * f_{\text{SW}})$$

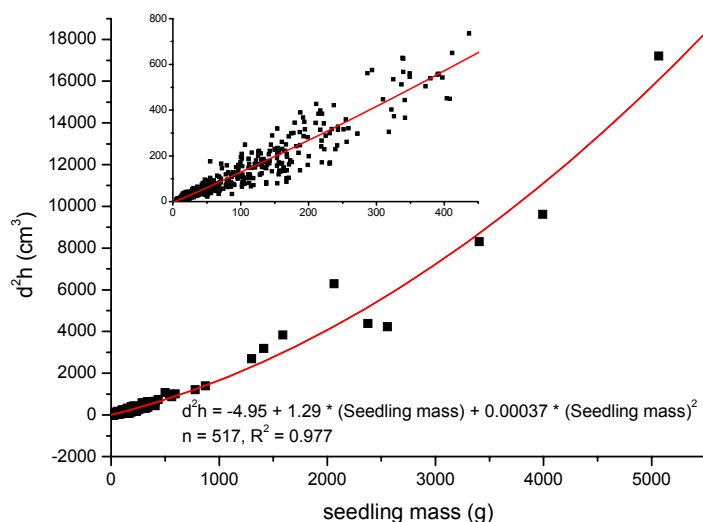
När väl knoppen är bildad är vattentillgången den viktigaste faktorn och därför har effekten av näring och temperatur tagits bort i detta sista steg (Grossnickle 2000).

#### Beräkning av diameter

Det finns en stark korrelation mellan plantans biomassa (Mass) och plantans diameter i kvadrat ( $D^2$ ) multiplicerat med höjden (H) (Fig. 3). Eftersom både biomassa och höjd vid det här laget är känt så utnyttjar vi ovannämnda samband och kan räkna ut diametern genom följande funktion;

$$D = ((-4.952 + \text{Mass} * 1.293 + 0.000371 * (\text{Mass})^2) / H)^{0.5}$$

Diametern är inte tillåten att minska i modellen så om biomassan sjunker mellan två veckor som ett resultat av t.ex. förnafall under vintern behålls den större diametern.



Figur 3. Sambandet mellan  $d^2h$  (diametern i kvadrat gånger höjden) och granplantornas/trädens totala biomassa. Den lilla figuren visar en förstoring av intervallet 0 till 400 g.



## Beräkning av marktemperaturen

Markens temperatur påverkar plantans etablering, rottillväxt och fotosyntes, speciellt i de boreala och tempererade zonerna. I modellen kan man ange uppmätta marktemperaturer men om man inte har tillgång till dessa beräknas de automatiskt enligt Monteith & Unsworth (1990).

## Beräkning av markvatteninnehållet

Markvatteninnehållet beräknades med hjälp av en vattenbudget innehållande nederbörd, markevaporation, transpiration och interception från träd och fältvegetation enligt (Landsberg & Waring 1997, Watts et al. 2003). Modellen beräknade vatteninnehållet i en 20 cm djup profil. Om modellen gav ett överskott av vatten under den modellerade veckan fylldes vatten på i profilen, och tvärtom. Om den maximala vattenhållande förmågan överskreds dränerades överskottet bort. Penman-Monteiths ekvation användes för beräkningen av transpiration och evaporation. Drivande variabler för transpiration och interception var ångtrycksdeficiten och bladarean. Trädens bladarea beräknas i modellen och fältvegetationens bladarea gavs av data från de fältförsök som modellen validerades mot eller beräknades av en empirisk submodell för bladareautvecklingen av kruståtel på hyggen i södra Sverige. Modellen baserades på data från hyggesåldersförsöket (Nilsson & Örlander 1999). Det tillgängliga vattnet beräknades individuellt för plantorna och beräknades utifrån rotsystemets utbredning och vattenbalansen i det området.

## Validering av modellen

### Material

Data för valideringen av modellen har tagits från ”hyggesåldersförsöket” som är en försöksserie etablerad mellan 1989 och 1993. Försöket anlades för att studera hyggesålderns inverkan på mängden fältvegetation och dess inverkan på plantans tillväxt (Nilsson & Örlander 1999). I försöket studerades effekten av olika markberedningsmetoder och planttyper från plantering och fem år framöver. Studien gjordes på fyra lokaler i södra Sverige och två av dessa (Bråtarna (57°08'N, 14°47'E) och Strömma (56°20'N, 13°10'E)) har valts ut för att validera modellen. I valideringsmaterialet ingår data för barrotsplanter planterade på färska och två år gamla hyggen år 1991 och 1992.

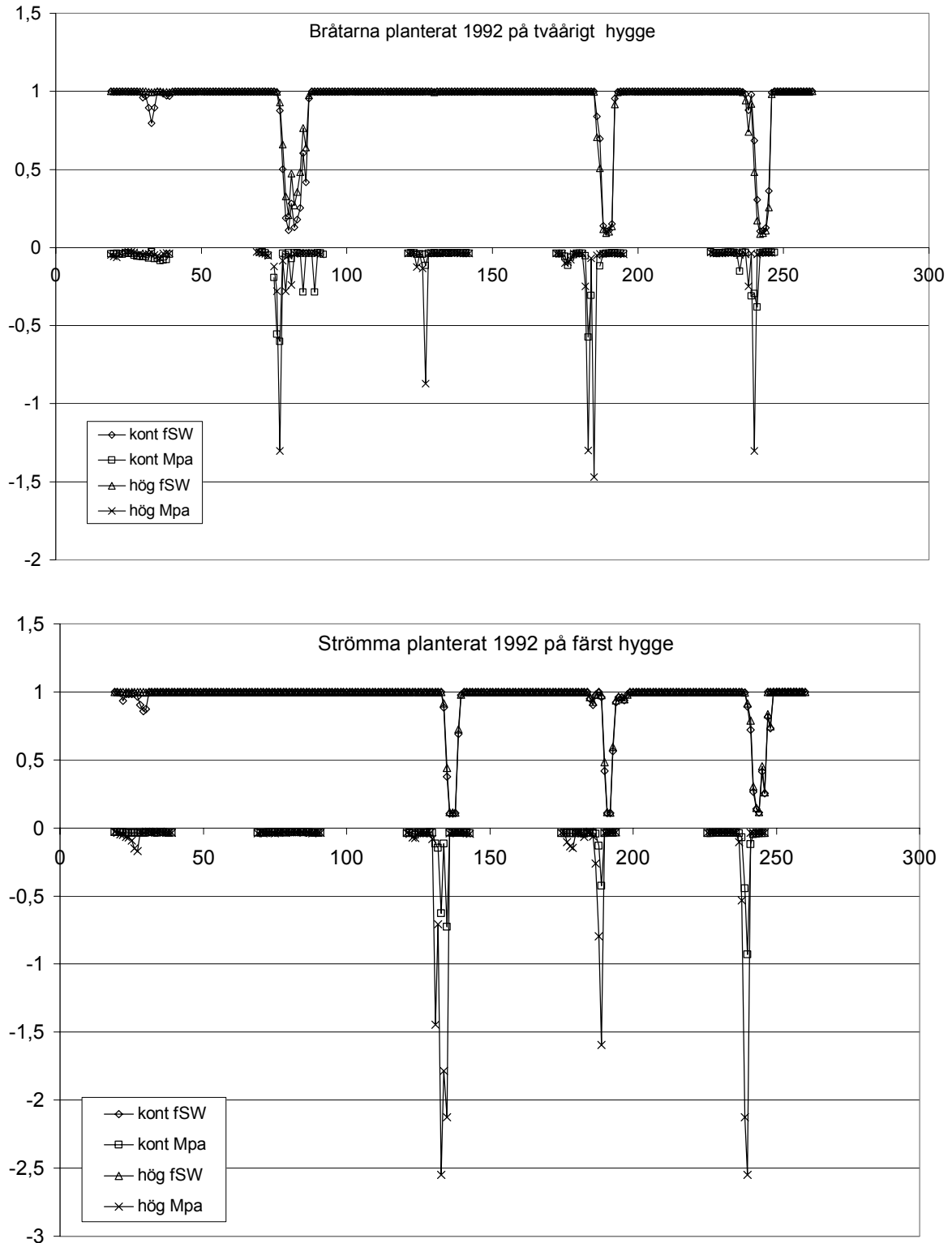
Bråtarna är en frisk ståndort på sandig siltig morän 245 m.ö.h. i Småland, och Strömma är en torr ståndort på siltig sand 85 m.ö.h. i Halland. Båda ståndorternas hyggen koloniserades av kruståtel (*Deschampsia flexuosa*), och mängden var obefintlig på färska hyggen medan det var ca 3000 kg torrsvikt /ha efter två år.

Mark- och lufttemperatur, markvattenpotentialer, nederbörd, globalstrålning, och mängden fältvegetation mättes i experimentet. Där data saknats har värden beräknats utifrån närliggande väderleksstationer. Dessa funktioner har haft en mycket stark korrelation. Plantornas diameter och höjd mättes årligen. I valideringen användes bara oskadade plantor eftersom skadornas påverkan på tillväxten inte ingår i modellen.

## Resultat

### Vattenbalans

Det fanns samband mellan markvattenpotentialen uppmätta i försöket och markvattenmodifieraren ( $f_{SW}$ ) i merparten av de modellerade scenariona, både när det gäller styrka, varaktighet och tidpunkt. Nedan visas två exempel (Fig. 4).

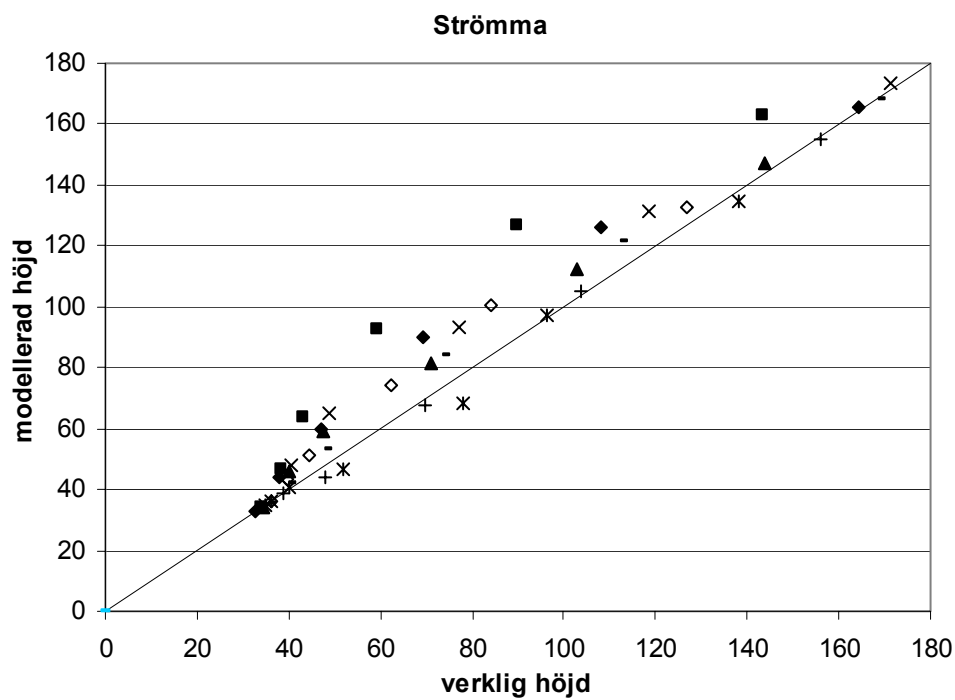
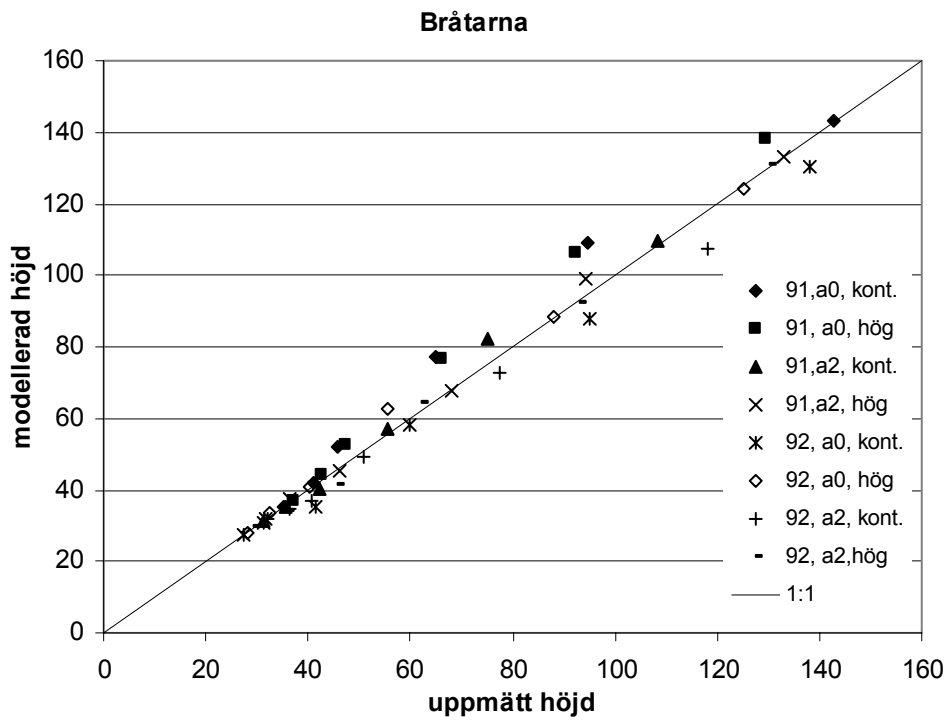


Figur 4. Två jämförelser mellan den modellerade  $f_{SW}$  (som antar värden mellan 0 och 1) och den uppmätta markvattenpotentialen i MPa. Vissningspunkten ligger på -1,5 MPa.

Även om samstämmigheten mellan  $f_{SW}$  och markvattenpotentialen är god visar analyser att  $fVPD$  styr tillväxten under en större del av tillväxtsäsongen än  $f_{SW}$ , som endast styr under starka torkperioder. Transpirationen från fältvegetationen är den största källan till vattenförlusten på ståndorten, medan interceptionen och markeavaporationen är betydligt lägre.

## Höjdtillväxt

Höjdtillväxten modellerades med en separat undermodell. Modellen stämde bra för plantor planterade 1992 för båda lokalerna. Modellen hade också bättre samstämmighet på Bråtarna än på Strömma (Fig. 5). Modellen överskattar den tidiga tillväxten främst på 1991 års plantor på färska hyggen.



Figur 5. De modellerade höjderna jämförda med verkliga värden. 91 och 92 är planteringsåren, a0 = färskt hygge och a2 = tvåårigt hygge, kont. = omärkerrett och hög = högläggning.

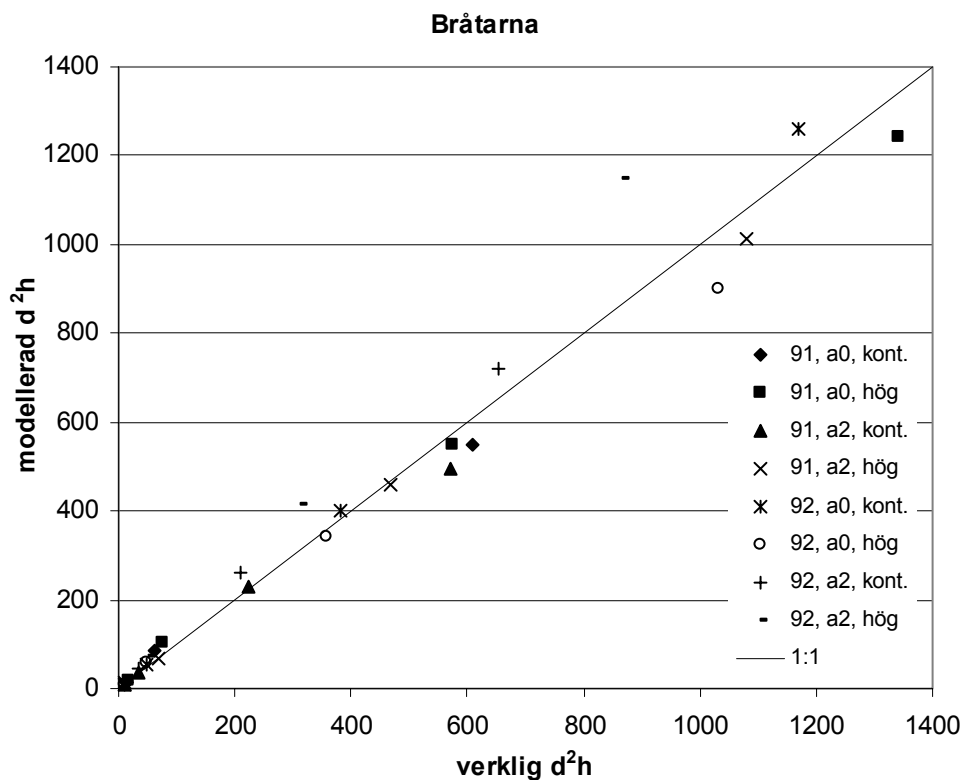
## Biomassatillväxt

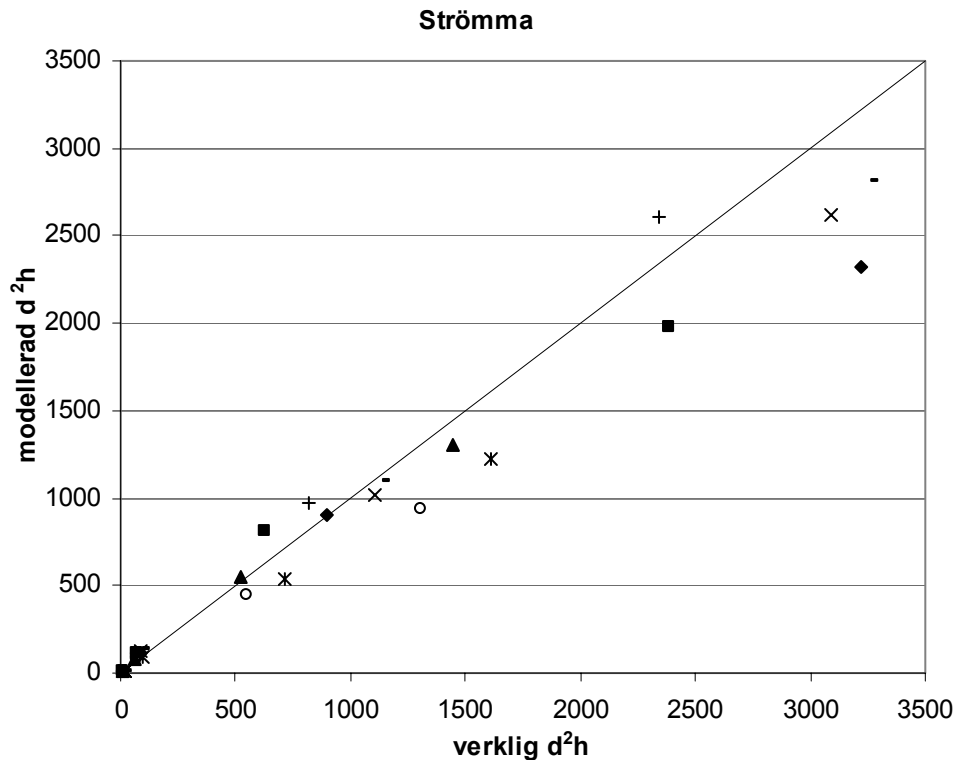
Inga biomassavärden fanns att tillgå för hyggesåldersmaterialet men då  $D^2H$  är starkt korrelerat med biomassan för granplantor validerades biomassatillväxten genom  $D^2H$  i hyggesåldersdata med det modellerade materialet i stället. Vid parametreringen av modellen anpassades näringsmodifieraren så att höjd och  $D^2H$  för de modellerade plantorna skulle samstämma så bra som möjligt med de uppmätta värden efter fem år. Näringsmodifieraren hamnade då på värden mellan 0,65 och 0,9 (Tab. 1).

Tabell 1. Näringsmodifierarens värden för de olika scenariona som validerades.

Hyggesålder	behandling	Bråtarna		Strömna	
		1991	1992	1991	1992
		fN	fN	fN	fN
0	Kontroll	0,75	0,90	0,70	0,70
0	Höglägg.	0,70	0,75	0,65	0,65
2	Kontroll	0,70	0,80	0,65	0,90
2	Höglägg.	0,80	0,80	0,75	0,80

För att studera om modellen beräknar biomass ökningen korrekt använde vi oss av  $D^2H$ . De modellerade värdena på  $D^2H$  på Bråtarna var väl korrelerad med hyggesåldersdata men på Strömna var korrelationen sämre (Fig. 6).

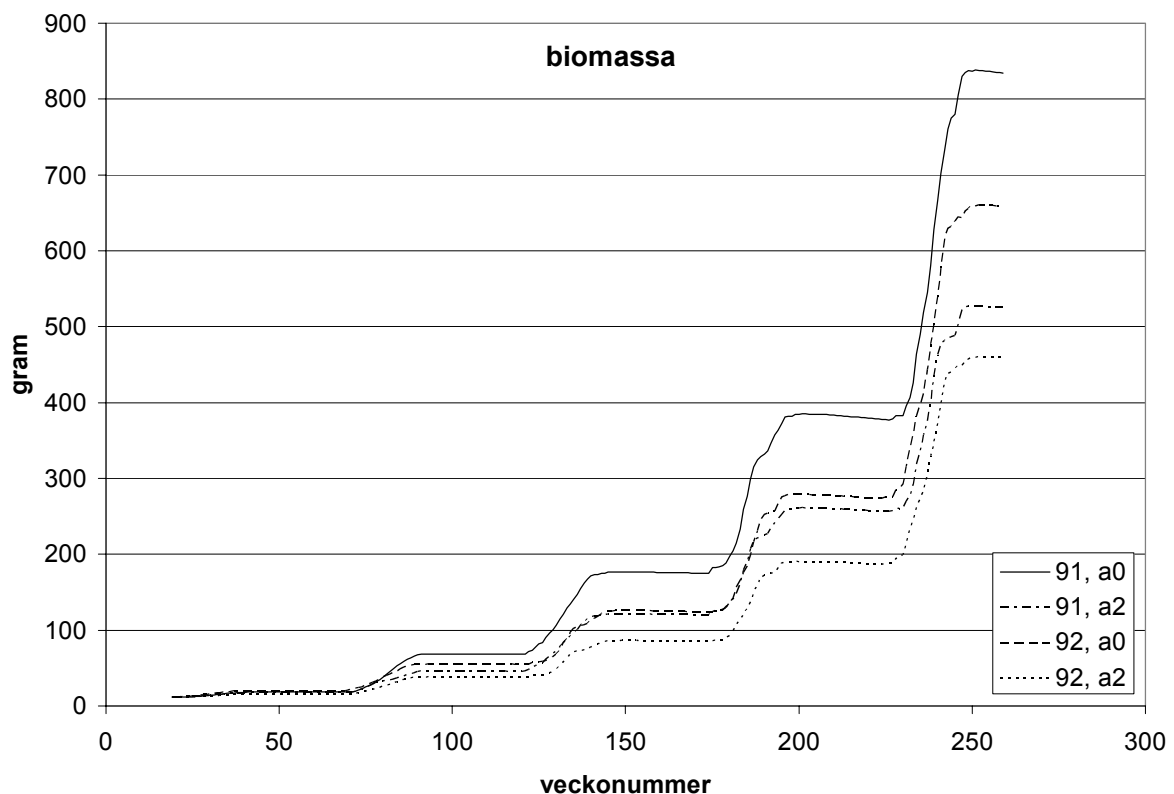
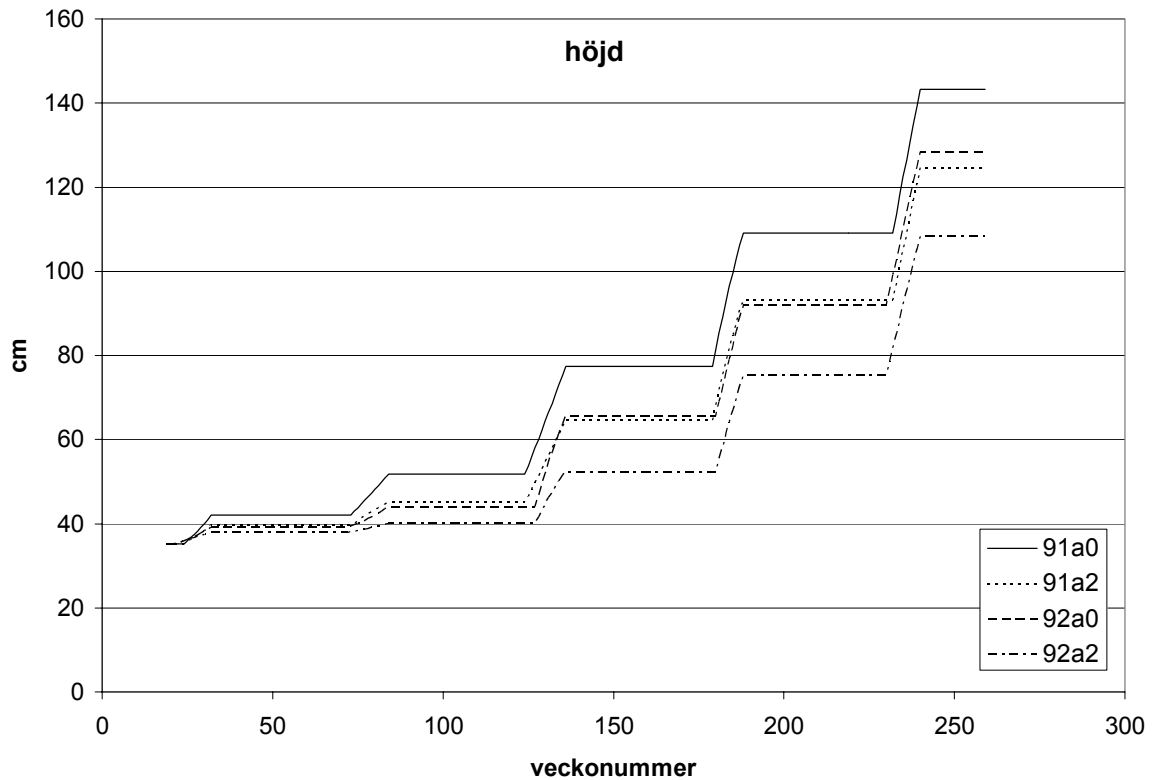




Figur 6. De modellerade värdena på  $D^2H$  jämförda med verkliga värden. 91 och 92 är planteringsåren, a0 = färskt hygge och a2 = tvåårigt hygge, kont. = omarkberett och hög = högläggning.

### **Diskussion**

Anledningen till att vi använt oss av en processbaserad modell istället för en empirisk var att fånga den stora variationen mellan olika behandlingar, hyggesåldrar och årsmåner. Nedan visas två simuleringar (Fig. 7) med samma utgångsläge och med samma värde på näringsmodifieraren (0,75). Man ser tydligt effekten av olika hyggesåldrar och olika årsmåner. Plantorna planterade 1991 får tidigt ett försprång mot plantorna planterade under torkåret 1992. Effekten av hyggesåldern och därmed mängden konkurrerande fältvegetation syns också tydligt. Att fånga den variationen med en empirisk modell hade varit svår.



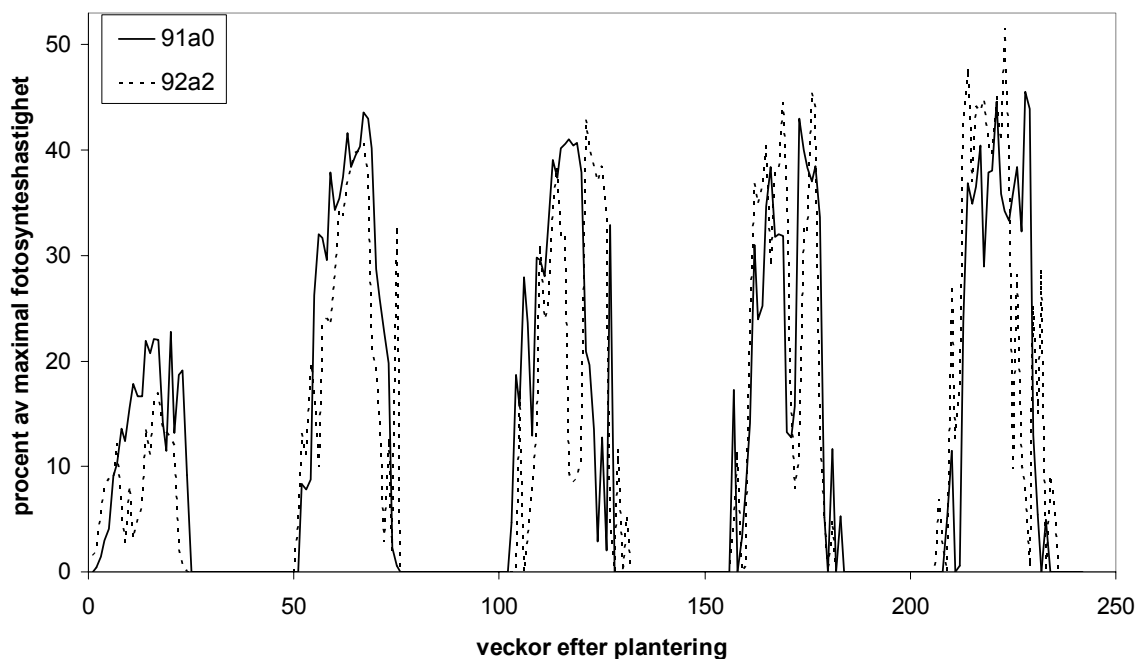
Figur 7. Simulering av olika etableringsår (1991 och 1992) och hyggesåldrar (a0=färskt hygge och a2=två-årigt hygge). 1992 och 1994 var torkår.

I hyggesåldersförsöket växte plantorna i högläggningen på färska hyggen sämre än plantorna i den obehandlade kontrollen men på de två-åriga hyggerna var det tvärtom. Denna effekt gick

ej att simulera utan att sänka näringsmodifieraren för plantorna i högläggningen. Det är förmodligen inte överrensstämmande med verkligheten då försök visar att näringstillgången i högarna är större än i obehandlad mark (Nilsson & Örlander 1999). Plantorna i högläggningen kan istället ha varit utsatta för torka under etableringen då nackdelen med högläggning är just att högen torkar ut lätt på sommaren på friska och torra ståndorter (Örlander 1984, Nilsson & Örlander 1999). Denna torkeffekt syntes också vid valideringen av vattenhalten i marken. Effekten av högläggning på markuttorkningen finns ej i modellen och detta är nog orsaken till problemet.

Modellen överskattade höjdtutvecklingen de första åren då tillgången på vatten och näring är goda. Troligtvis är funktionen för den potentiella relativa höjdtillväxten för stark vid små plantstorlekar, men då den fungerar på äldre hyggen kan det vara svårt att modifiera den utan att få negativa följeffekter på äldre hyggen. Modelleringen visar dock att det, genom att förändra näringsmodifieraren går att prediktera höjd-, diameter- och biomassatillväxten med tillfredställande precision. Vill man förbättra höjdfunktionen måste man noggrannare kvantifiera effekterna av temperatur, vatten och näring på skottbildning och skottskjutning. Det är svårt med hjälp av existerande litteratur att kvantifiera effekterna av ovanstående faktorer på höjdtillväxten med bättre precision.

De parametrar som användes vid modelleringen var antingen hämtade ur litteraturen eller ur material från egna experiment. Det enda som använts för att direkt styra tillväxten vid valideringen har varit värdet på näringsmodifieraren. Om man studerar hur stor fotosynteshastigheten var i förhållande till den maximala (Fig. 8) ser man att den endast kom upp i knappt hälften av den maximala. Detta förefaller vara ett lågt värde men det återstår att studera hur stor del av den potentiella fotosyntesen man kan komma upp igenom att ge plantorna all den näring och vatten som de kan utnyttja. Sådana försök är på väg att läggas ut.



Figur 8. Den modellerade fotosynteshastigheten i förhållande till den maximala i procent för bråtarna på plantor planterade på färskt hygge 1991 och plantor planterade på tvåårigt hygge 1992 som var ett torkår.

Ett skäl att näringsmodifieraren har ett så förhållandevis lågt värde som ca 0,75 är att ljusabsorptionen kan ha överskattats. Skälet till denna överskattning kan bero på att modellen

räknar med att barren är jämt fördelade i kronan. Detta är dock inte fallet i verkligheten utan barren sitter koncentrerade på skotten, vilket medför att mycket ljus passerar genom kronan utan att träffa barren medan barrtätheten runt skotten i stället blir mycket tät vilket medför att de skuggar varandra och därmed minskar den potentiella ljusupptagningen. Försök på radiatatall har visat att denna ihopklumpning av barren medför ansevärliga förluster i ljusabsorption jämfört med jämt fördelade barr (Whitehead et al. 1990). Preliminära resultat visar att det endast finns barr i mellan 5 och 10% av volymen i den tänkta ellipsoiden, vilket tyder på en kraftig ihopklumpning av barren för unga granplantor (Fig. 9). För att förbättra denna och andra kolbalansmodeller drivna av fotosyntesen behöver effekten av ihopklumpningen av barren kvantifieras för enskilda träd och plantor. Sådana kvantifieringar finns redan för bestånd (Stenberg et al. 1996) och motsvarande metoder kan nog användas även för enskilda träd/plantor.



Figur 9. En verklig granplanta och ytterkonturen av den tänkta ellipsoiden som används vid modelleringen. Det syns tydligt att barren inte är jämnt fördelade i den modellerade kronans volym.

Vattenbalansen som styr markvattenmodifieraren stämde inte exakt men mönstret och storleksordningen var ofta densamma. Detta tyder på att markvattenmodifieraren går att skatta med en enkel vattenbudgetmodell baserad på veckovisa data. Litteraturen visar också att det ofta går att skatta vattenhalten i marken tillfredställande med ganska enkla modeller (Watts et al. 2003).

I valideringsarbetet med modellen har vi endast använt oss av krustätelhyggen och på dessa anses inte ljuset begränsa tillväxten även vid stora mängder gräs på hygget. Detta beror nog på att den största delen av dess bladarea finns nära marken och att endast blomstänglarna som är förhållandevis tunna och glesa ej reducerar ljusstillgängligheten tillräckligt för att sänka tillväxten på plantorna. Det återstår fortfarande att utveckla en ljuskonkurrensmodell eller att mäta upp ljus på olika ståndorter för att kunna modellera bördigare ståndorter, hyggen med konkurrerande björkar och bestånd med skärmar.



Går då en modell som kräver många parametrar och veckovisa klimatdata att använda som en hjälp i det praktiska skogsbruket? Javisst! Om man tar fram underliggande klimatdata och döljer det som inte behöver ändras av användaren kan man få fram ett enkelt interface utan att tappa nyttan med modellen. Eftersom man inte kan förutsäga vädret så är det svårt att använda modellen som ett prognostiseringsverktyg, men om man laddar modellen med ett antal exempelår kan man göra känslighetsanalyser och jämföra goda och dåliga år med varandra. Man kan då jämföra vilka markbehandlingar som skulle behövas använda om man vill ha en bra tillväxt även om det börjar med ett torrår etc.

## **Referenser**

- Anderson, M.C. 1966. Stand structure and light penetration. II. A theoretical analysis. *Journal of Applied Ecology* 1:41-54
- Bergquist, J. 1998. Influence by ungulates on early plant succession and forest regeneration in south Swedish spruce forests. Doctor's dissertation. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria* 55.
- Burdett, A. N. 1990. Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Can. J. For. Res.* 20: 415–427.
- Davies, R.J. 1985. The importance of weed control and the use of tree shelters for establishing broadleaved trees on grass-dominated sites in England. *Forestry* 58: 167-180.
- DeLucia, E. H. 1986. Effect of low root temperature on net photosynthesis, stomatal conductance and carbohydrate concentration in Engelmann spruce (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm.) seedlings. *Tree Physiol.* 2: 143-154.
- Dormling I, Gustafsson Å, von Wettstein D (1968) The experimental control of the life cycle in *Picea abies* (L.) Karst. *Silvae. Genet.* 17: 44-64.
- Erbs, D.G., Klein, S.A. and Duffie, . 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy* 28(4):293-302.
- Gemmel, P. 1987. Development of beeted seedlings in stands of *Picea abies* (L.) Karst. In southern Sweden. Doctors's dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture.
- Grossnickle, S.C. 2000. Ecophysiology of northern spruce species: the performance of planted seedlings. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada.
- Fahlvik, N. 2005. Aspects of precommercial thinning in heterogeneous forests in southern Sweden. Doctor's dissertation. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Doctoral thesis No. 2005:68*, Faculty of Forest Science.
- Hannerz, M. 1999. Evaluation of temperature models for predicting bud burst in Norway spruce. *Can. J For. Res.* 29:9-19.
- Johnsen, K., Samuelson, L., Teskey, R., McNulty, S. and Fox, T. 2001. Process Models as Tools in Forestry Research and Management. *For. Sci.* 47(1): 2-8.
- Landsberg, J.J. & Waring, R.H. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95: 209-228.
- Landsberg, J.J., Johnson, K.H., Albaugh, T.J., Allen, H.L. & McKeand, S.E. 2001. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. *Forest Science. For. Sci.* 47(1): 43-51.
- Landsberg, J.J. 2003. Modelling forest ecosystems: state of the art, challenges and future directions. *Can. J. For. Res.* 33: 385-397.
- Langvall, O. 2000. Interaction between near-ground temperature and radiation, silvicultural treatments and frost damage to Norway spruce seedlings. Doctor's dissertation. *Silvestria* 140. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae.*

- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. 1990. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London.
- Nilsson, U. & Allen, H. L. 2003. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. For. Ecol. Manage. 175: 367-377.
- Nilsson, U. & Örlander, G. 1995. Effects of regeneration methods on drought damage to newly planted Norway spruce seedlings. Can. J. For. Res. 25: 790-802.
- Nilsson, U. & Örlander, Ö. 1999. Vegetation management on grass-dominated clearcuts planted with Norway spruce in southern Sweden. Can. J. For. Res. 29: 1015-1026.
- Nordborg, F. 2001. Effects of site preparation on soil properties and on growth, damage and nitrogen uptake in planted seedlings. Doctor's dissertation. Acta Universitatis Agriculturae Suecia. Silvestria 195.
- Nordborg, F. and Nilsson, U. 2003. Growth, damage and net nitrogen uptake in *Picea abies* (L.) Karst. seedlings, effects of site preparation and fertilisation. Annals of Forest Science 60: 657-666.
- Nordborg, F., Nilsson, U., and Örlander, G. 2003. Effects of different soil treatments on growth and net nitrogen uptake of newly planted *Picea abies* (L.) Karst. seedlings For. Ecol. Manage. 180: 571-582
- Nordborg, F. and Welander, T. 2001. Growth responses of rooted cuttings from five clones of *Picea abies* (L.) Karst. after a short drought period. Scandinavian Journal of Forest Research: 16(4): 324-330.
- Nordborg, F., Nilsson, U., Gemmel, P. and Örlander, G. In Press. Carbon and nitrogen stocks in soil, trees and field vegetation in conifer plantations ten years after deep soil cultivation and patch scarification. Scandinavian Journal of Forest Research
- Petersson, M. 2004. Regeneration methods to reduce Pine weevil damage to conifer seedlings. Doctor's dissertation. Acta Universitatis Agriculturae Suecia. Silvestria 330.
- Rosén, K., Gunderson, P., Tegnhamar, L., Johansson, M. & Frogner, T. 1992. Nitrogen enrichment of Nordic forest ecosystems: the concept of critical load. Ambio 21: 364-368.
- Stenberg, P. 1996. Simulations of the effect of shoot structure and orientation on vertical gradients in intercepted light by coniferous canopies. Tree Physiology 16: 99-108.
- Watts, M. S., Whitehead, D., Richardson, B., Mason, E.G., & Leckie, A. C. 2003. Modelling the influence of weed competition on the growth of young *Pinus radiata* at a dry land site. For. Ecol. Manage. 171: 271-286.
- Whitehead, D., Grace, J.C. & Godfrey, M.J.S. 1990. Architectural distribution of foliage in individual *Pinus radiata* D. Don crowns and the effect of clumping on radiation interception. Tree Physiology 7: 135-155.
- Örlander, G. 1984. Some aspects of water relations in planted seedlings of *Pinus silvestris* L. Doctors's dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture.
- Örlander, G. & Due, K. 1986. Location of hydraulic resistance in the soil plant pathway of *Pinus Sylvestris* L. grown in peat. Can. J. For. Res. 16: 115-123.
- Örlander, G., Egnell, G. and Albrektsson, A. 1996. Long-term effects of site preparation on growth in Scots pine. For. Ecol. Manage. 86: 27-37.