



Effekter av ett förändrat klimat på skogen och implikationer för skogsbruket

Av doc. Johan Bergh, doc. Kristina Blennow,
dr. Mikael Andersson, dr. Erika Olofsson,
prof. Urban Nilsson, prof. Ola Sallnäs
och dr. Matts Karlsson

Arbetsrapport nr 34
Institutionen för sydsvensk skogsvetenskap
Sveriges lantbruksuniversitet
Alnarp 2007

Innehållsförteckning

Innehållsförteckning	2
Inledning	3
Potentiella produktionseffekter vid ett förändrat klimat	4
Tillväxtutvecklingen i skogen med transienta B2- och A2-scenarier	6
Produktionpotential för biobränsle i ett framtida klimat	12
Framtidsanalys för produktionen	14
Effekter av förändrat klimat på produktionsekonomin vid granproduktion	15
Risken för vindfällning under ett förändrat klimat	19
Det framtida klimatet	20
Den framtida skogen	20
Modellstudier	21
Material och metoder	21
Resultat	24
Diskussion	32
Slutsatser	34
Klimatförändringar kommer att påverka skogsbrukets ekonomi	35
Forskningsbehov	40
Tack	42
Referenser	43
Regionala klimatscenarier	45
Appendix 2	46
Beskrivning av den process-baserade produktionsmodellen BIOMASS	46
Appendix 3	48
Simulering av framtida skogstillstånd	48
Appendix 4	49
Beräkning av sannolikheten för vindfällning	49

Inledning

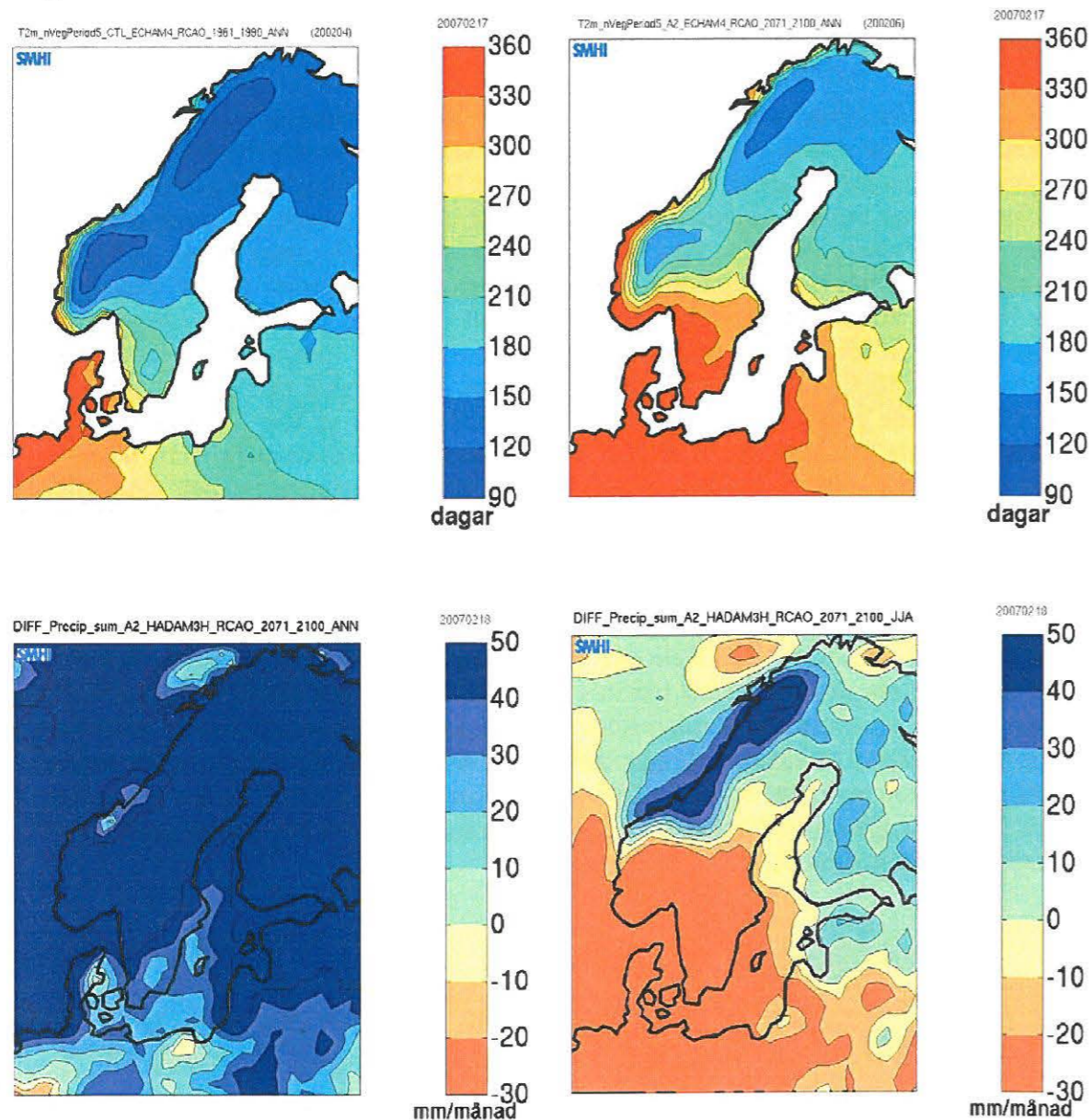
Att klimatet kan komma att förändras påverkar svenskt skogsbruk. Skogen har i sig en direkt inverkan på klimatet samtidigt som skogsbruket kan behöva anpassas till de nya förhållandena. Ett osäkert klimat sätter brukandet av skogen i ett nytt läge som vi inte har någon tidigare erfarenhet av. Scenarier för framtida klimatutveckling är behäftade med stor osäkerhet och de förväntade effekterna på skogen blir således ännu mer osäkra. Trots detta kan man ändå förutsäga några sannolika huvuddrag i effekterna på den svenska skogen vid ett framtida ändrat klimat. En ökad potential för biomassaproduktion kan förväntas, liksom ökade möjligheter att använda nya arter i skogsbruket. Samtidigt ökar sannolikt risken för vissa typer av skador.

Att väga eventuella fördelar i form av ökad produktion och ökade möjligheter i trädslagsval mot ökade risker för skador är viktigt för att ge samhället ett helhetsperspektiv och för att en större grupp ska ha möjlighet att ta till sig frågan. Det är också viktigt att i största möjliga mån kvantifiera eller ge ramarna i ekonomiska termer för hur det förändrade klimatet kan tänkas påverka skogsbruket. Vidare kan det vara styrande för prioritering av fortsatta forskningsarbeten och riskbedömning och för att prioritera åtgärder. Därför har vi försökt utifrån befintlig kunskap idag, konstruera en Tabell över den ekonomiska betydelsen och forskningsbarheten för olika risk/ämnesområden (se Tabell 17 sidan 39). De kanske största effekterna av ett förändrat klimat på ekonomin inom skogsbruket skulle vara om vi lyckas utnyttja den ökade produktionspotentialen. Det förutsätter att vi kan bemästra de negativa effekterna i första hand av en ökad risk för vindfällning, skadeangrepp från insekter och svampar. Mot bakgrund av skogsbrukets stora betydelse som naturresurs och industriell bas, så finner vi att det är viktigt att vi står rustade inför en framtid med såväl ökade hot som nya möjligheter.

I denna skrift försöker vi beskriva och analysera tänkbara effekter av ett förändrat klimat på skogen och bedömt deras implikationer för produktionsskogsbruket. Andra aspekter än produktionsaspekter på skogsbruket har inte behandlats. Analysen sker i fyra steg. Vi inleder med att, så långt nuvarande kunskapsläge tillåter, kvantifiera effekterna på den skogliga primärproduktionen – tillväxten i skogen. I ett andra steg omsätts dessa effekter till effekter på produktionsekonomin i ett bestånd. Därefter analyseras tänkbara effekter på risken för stormfällning i skogen. I ett sista steg breddas diskussionen till en något mera spekulativ bild av tänkbara effekter på skogsbrukets ekonomi,

Potentiella produktionseffekter vid ett förändrat klimat

Ett förändrat klimat innebär att produktionsförutsättningarna ändras för våra trädslag. I vårt kärva vinterklimat skulle en ökad temperatur och koldioxidhalt sannolikt öka produktionen för de flesta trädslag i Sverige. Detta förutsatt att nederbörden inte minskar drastiskt. En ökad temperatur vår och höst leder till en förlängd växtsäsong (övre Figur 1) och att mer av solljuset kan utnyttjas till fotosyntes- och biomassaproduktion (Bergh et al., 2003). Detta leder högst sannolikt till en ökad biomass- och stamvedsproduktion för samtliga av våra trädslag i Sverige.



Figur 1. Vegetationsperiodens längd i dagar i dagens klimat (vänstra övre Figuren) och enligt A2-scenariet (högra övre Figuren). Nederbördsförändring i mm/månad för hela året i A2-scenariet (vänstra nedre Figuren) jämfört med dagens klimat och nederbördsförändring under juni-augusti i A2-scenariet (högra nedre Figuren). Figurenerna är från SMHI's regionala scenarier (SMHI, 2006, se även appendix 1 på sidan 45).

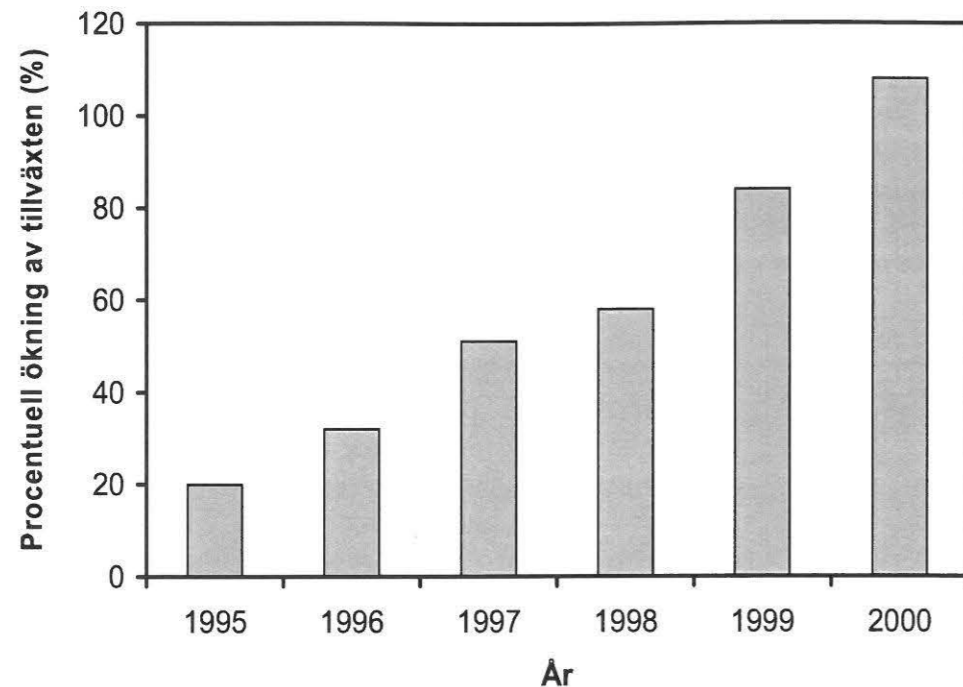
En utbredd missuppfattning är att "genetiken" reglerar fotosyntesens start på våren och dess upphörande på hösten. Detta är istället i mycket hög utsträckning reglerat av temperaturklimatet. På våren startar oftast fotosyntesen hos barrträd då

dygnsmedeltemperaturen varaktigt stiger över 0 °C. Återhämtningen av fotosyntesen sker allt snabbare ju högre temperaturen är och då tjälén har gått ur marken. I norra Sverige startar fotosyntesen 1-2 månader innan skottskjutningen sker och i södra Sverige sannolikt ännu längre innan. På hösten pågår fotosyntesen långt efter den ovanjordiska tillväxten har upphört och trädet har invintrat. Full fotosyntes kan ske med fullt invintrade plantor och kan alltså ske året runt ifall klimatbetingelserna är gynnsamma. Även om man använder sig av genetiskt anpassat material så kommer det sannolikt att ha en begränsad inverkan på fotosyntesproduktionen hos gran och tall, eftersom den även i framtiden kommer regleras av temperaturen.

Däremot har genetiken en betydligt större inverkan på knoppsprickning och skottskjutning på våren hos barr- och lövträd, eftersom den påverkas av både dagslängden och av lufttemperaturen. Hos barrträden är skottskjutningstidpunkt ofta korrelerad till en temperatursumma, medan lövsprickningen hos vissa av våra lövträd är en kombination av temperatursumma och dagslängd. Tall och gran behåller sin barr på vintern medan lövträden bygger upp sin bladmassa varje år. Detta innebär att tidigare skottskjutning och lövsprickning på våren har en större betydelse för produktionen hos lövträden jämfört med barrträden, eftersom hela lövbiomassan omsätts varje år.

Idag är vattentillgången god i mellersta och norra Sverige och vatten begränsar normalt inte tillväxten på marker med sandig-moig morän och finare marktstruktur. Däremot kan vatten vara begränsande på sandmarker. En kraftigt ökad nederbörd i norra Sverige skulle eventuellt kunna leda till försumpning av vissa ståndorter och produktionsminskning. Enligt scenarierna verkar dock inte risken för försumpning så stor. Minskad nederbörd och ökad temperatur skulle kunna minska produktion på framför allt marker med grövre marktstruktur. Minskad nederbörd i södra Sverige skulle med stor sannolikhet leda till produktionsminskningar och i extrema fall försämrad vitalitet och död. Trädslag med stort vattenbehov som de flesta lövträd och gran skulle sannolikt missgynnas i större utsträckning än tall och ek. Ökad nederbörd i södra Sverige skulle på de flesta ståndorter leda till ökad produktion. SMHI's scenarier (se Appendix) predikerar en svagt ökad nederbörd sett över hela året (nedre Figur 1 till vänster) men en minskad nederbörd under sommaren i stora delar av landet men framför allt i södra Sverige (nedre Figur 1 till höger). En ökad temperatur innebär dessutom en ökad avdunstning, vilket innebär att vattentillgången minskar markant under sommaren i södra Sverige.

En höjd lufttemperatur leder också till en höjning av markens temperatur, vilket påskyndar nedbrytningen av organiska material. En högre nedbrytningshastighet gör att mer växtnäring frigörs i marken i större utsträckning. Eftersom växtnäring begränsar i stor utsträckning tillväxten i våra svenska skogar, skulle en ökad växtnäringstillgång öka produktionen. Effekten är sannolikt betydligt större i norra jämfört med södra Sverige, dels på grund av att näringsutbudet idag är generellt betydligt lägre i norra Sverige jämfört med södra och dels den stora gradienten beträffande kvävenedfallet över Sverige. I ett markuppvärmningsförsök i Västerbotten, där man har värmt upp marken med 5 °C över den naturgivna marktemperaturen på försökslokalen, har man ökat stamvolymtillväxten med nästan 100% (Figur 2). Detta visar hur viktigt det är att ta hänsyn till näringsdynamiken i marken när man försöker förutsäga hur produktionen kommer att påverkas i ett förändrat klimat. Huruvida effekten är bestående över längre tidsperioder är svårt att förutsäga och man bör därför fortsätta att studera effekterna av markuppvärmningen. Markuppvärmningsförsöket i Flakaliden kommer att revideras under våren 2007. Hur andra trädslag reagerar på förändrad näringsstatus i marken till följd av ökad marktemperatur vet vi inte i dagsläget och effekterna från markuppvärmningsförsöket är sannolikt inte generaliserbara. Vi vet i viss mån från gödslingsförsök att många lövträdsarter inte reagerar lika kraftigt ur produktionshänseende på gödsling som exempelvis gran.



Figur 2. Ökning av stamvolymtillväxten hos gran i Västerbotten som en effekt av ökad marktemperatur med 5 °C (Strömngren & Linder, 2002).

I kortvariga laboratorie- och fältförsök leder en ökning av koldioxidhalten till kraftigt ökad fotosynteshastighet (100% ökning). Efter en tid verkar dock träden anpassa sig till den nya koldioxidhalten och fotosynteshastigheten går ner till nästan samma nivå (ökning 10-15%) som vid normal koldioxidhalt (360 ppm). En ökad koldioxidhalt har i många fall effekt på barren/bladens klyvöppningar och trädens vattenhushållning. Effekten av koldioxid på produktionen förväntas därför bli större i områden där vattentillgången är begränsande. En produktionsökning, orsakad förhöjd temperatur, förlängd växtsäsong, tidigare knoppsprickning och ökad koldioxid mm, måste dock matchas av en ökad tillgång på växtnäring i marken.

Extrema vädersituationer (torka, temperatur, vind, mm) har nästan alltid en negativ inverkan på produktionen och kan sätta ner trädets vitalitet och göra det mer mottagligt för exempelvis svampsjukdomar och insektsangrepp. Invintring och dess upphörande på våren är processer som delvis styrs av temperaturen. Dessa processer kan störas och försämma trädens motståndskraft och vitalitet. Insektsangrepp, svampangrepp, stormfällningar och extrema vädersituationer kan på både kort och lång sikt få en betydande inverkan på produktionen.

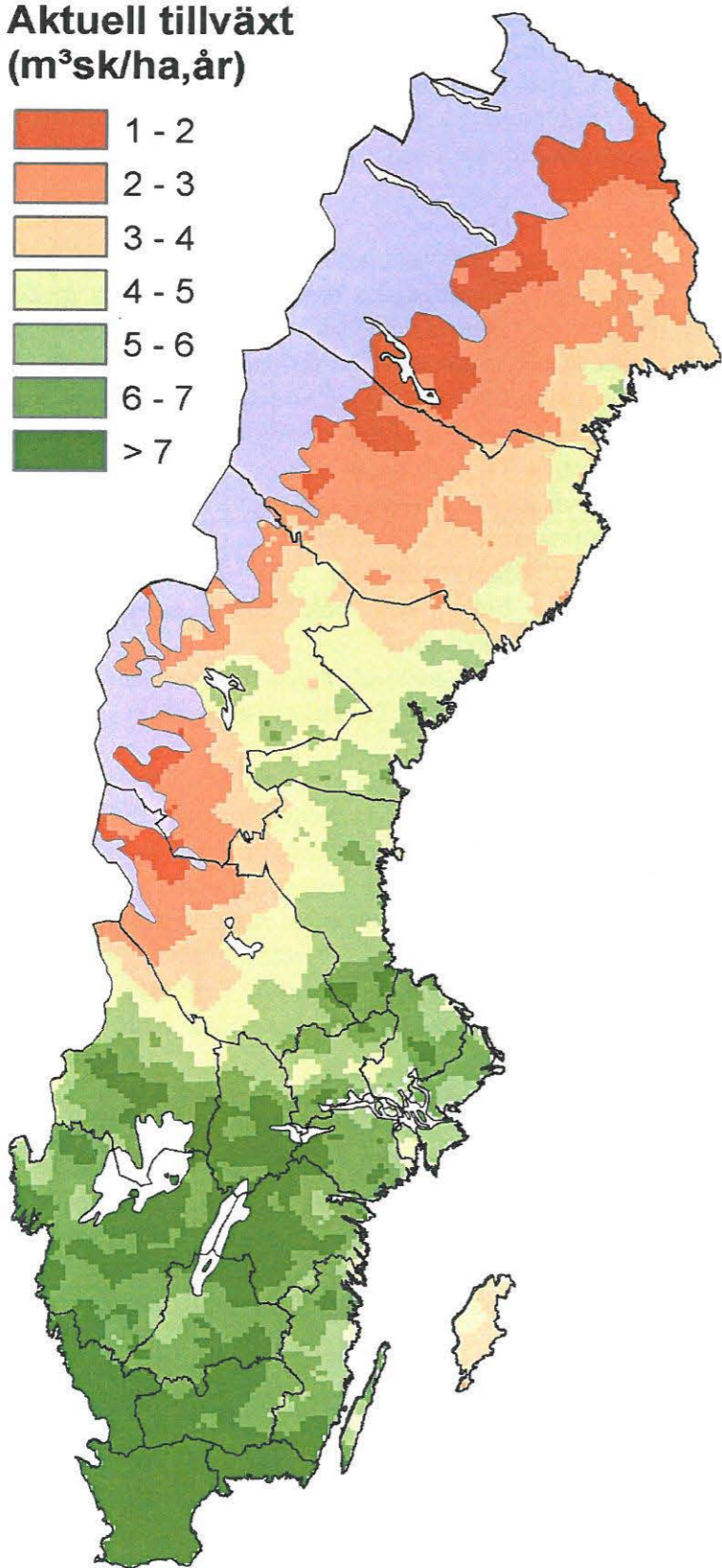
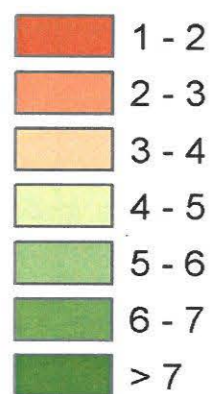
Tillväxtutvecklingen i skogen med transienta B2- och A2-scenarier

Transienta körningar för perioden 1961-2100 simulerades med den process-baserade modellen BIOMASS för fem olika trädslag, gran, tall, björk, sitkagran och bok. Parameteriseringen av modellen har skett med hjälp av ECOCRAFT's databas samt ett tidigare samnordiskt modelleringsprojekt (se Bergh et al., 2003). Eftersom barr/bladarea (LAI) styr fotosyntesproduktionen i hög utsträckning är det viktigt att få en så bra uppskattning som möjligt på LAI. Dessutom skiljer LAI sig mycket mellan södra och norra Sverige, vilket kan ge upphov till stora under- och överskattning av både den absoluta och relativa produktionsförändringen. Därför användes den aktuella stamved produktionen för Sverige och Marklunds biomassafraktioner för att uppskatta LAI och olika

biomassafraktioner (barr/blad, grenar, stam, rötter) för Sveriges olika landsändar. De uppskattade värdena har sedan använts som ett medelvärde på LAI för en hel omloppstid och vi har därför använt oss av en konstant parameterisering för hela simuleringsperioden. Modellsimuleringarna är utförda med de senaste transienta B2- och A2-scenarierna med dygnsupplösning för att fånga årsväxningen hos fotosyntesen på ett realistiskt sätt. Utdata från modellsimuleringarna summerades i fyra olika tidsperioder 1961-1991 (referens), 2011-2040, 2041-2070 och 2071-2100.

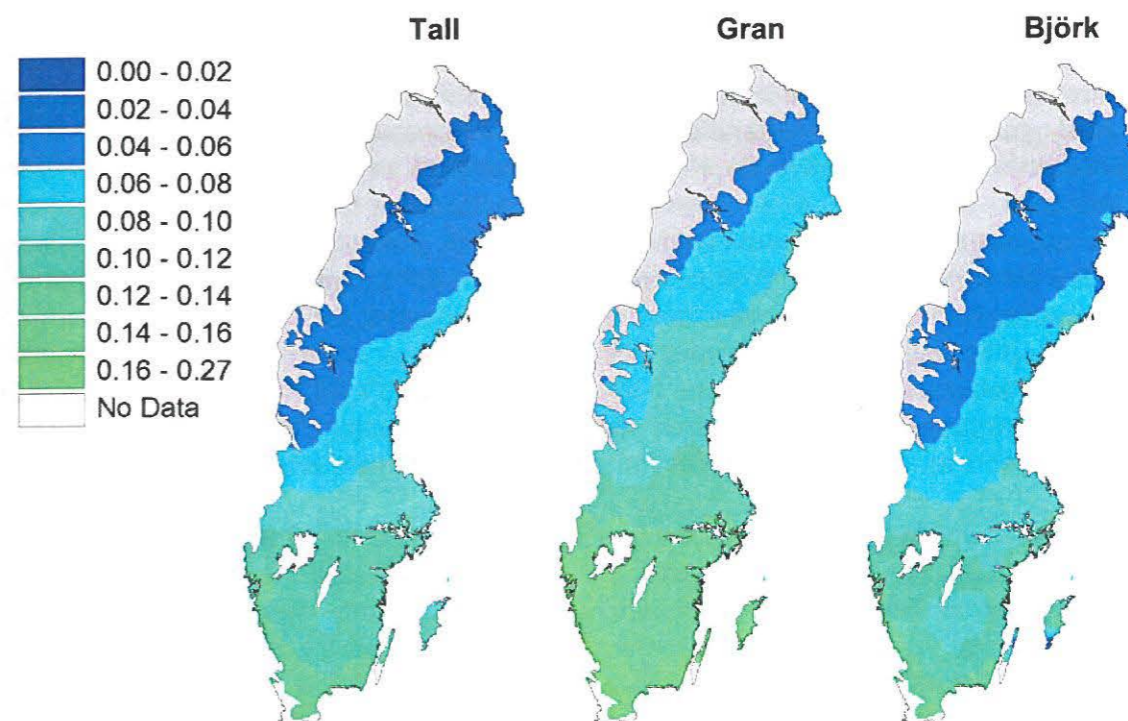
Referensperioden 1961-1990 speglar hur produktionsförhållandena/nivån (Figur 4) ser ut idag och ger en indikation ifall modellen ger realistiska resultat. Utdata från modellen är bland annat NPP (Netto Primär Produktion) som är ett mått på skogens biomassaproduktion. I nedanstående Figur 3 är det dock endast stamvedsproduktionen som avses för jämförelse med den aktuella stamvedsproduktion (Figur 4) i Sverige. Kartorna stämmer väl överens med den aktuella produktionen i Sverige, samt med tidigare uppskattning (Bergh et al., 2006) och MODIS-projektioner på produktionen. Den absoluta tillväxten av stamved är störst i södra Sverige (0.10-0.25) och avtar gradvis mot norr (0.02-0.08) och fjällkedjan. Gran (Figur 4) och sitkagran (ej i Figur) har den största absoluta tillväxten i dagsläget av de trädslag som har använts i simuleringsövningen, vilket stämmer väl överens med bland annat rikskogstaxeringens material. Tall, björk och bok ligger samtliga på en likartad produktionsnivå men ca 20-40% lägre än granens.

**Aktuell tillväxt
(m³sk/ha,år)**



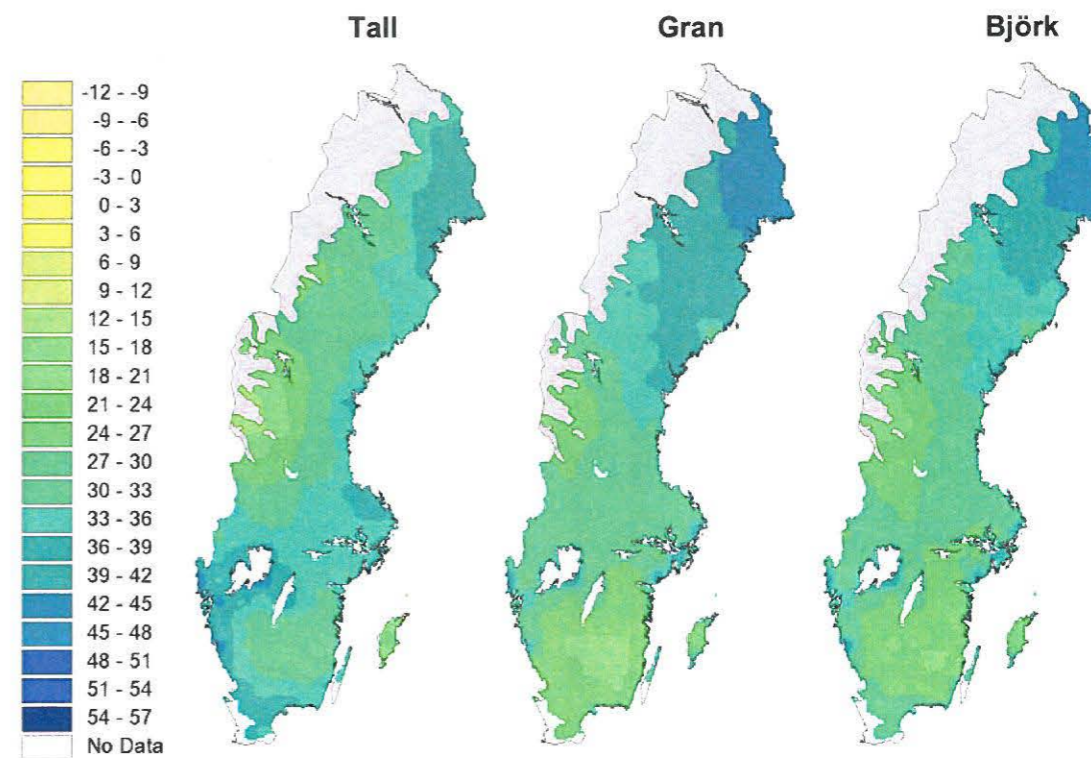
Figur 3. Den aktuella produktionen av stamved i Sverige. Värdena avser medelproduktion (m³sk ha⁻¹ a⁻¹) för en hel omloppstid (MAI).

Årlig tillväxt för perioden 1961-1990 i absoluta termer (kg C m⁻² a⁻¹)



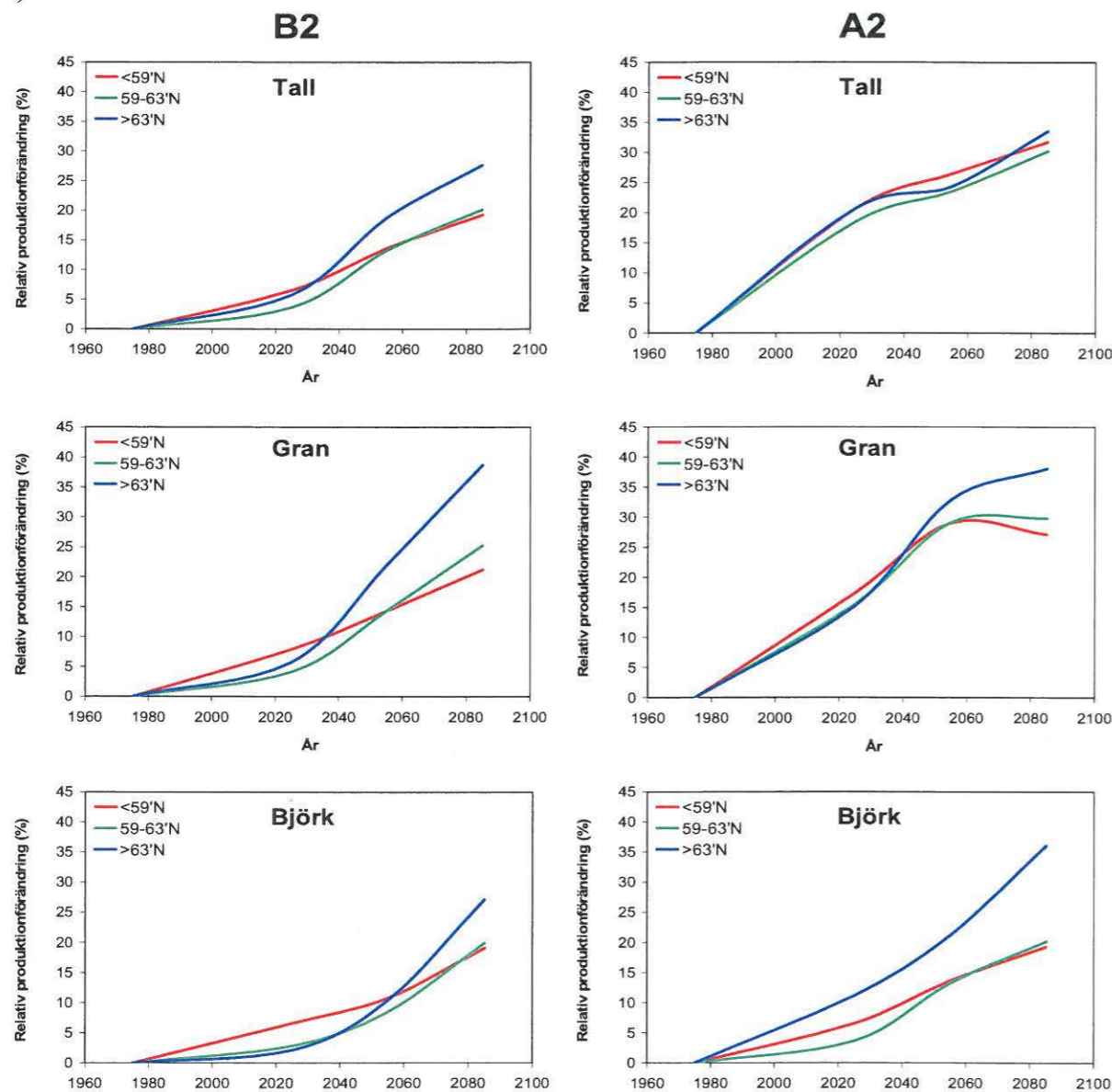
Figur 4. Tillväxten av stamved i termer av kg C (kol) m⁻², a⁻¹ för tall, gran och björk, baserat på simuleringar med dagens klimat.

Produktionsförändring 2071-2100 med A2-scenariet (%)



Figur 5 Relativa produktionsförändringarna i A2-scenariet hos tall, gran och björk för perioden 2071-2100 jämfört med referensperioden 1961-1990 (dagens klimat).

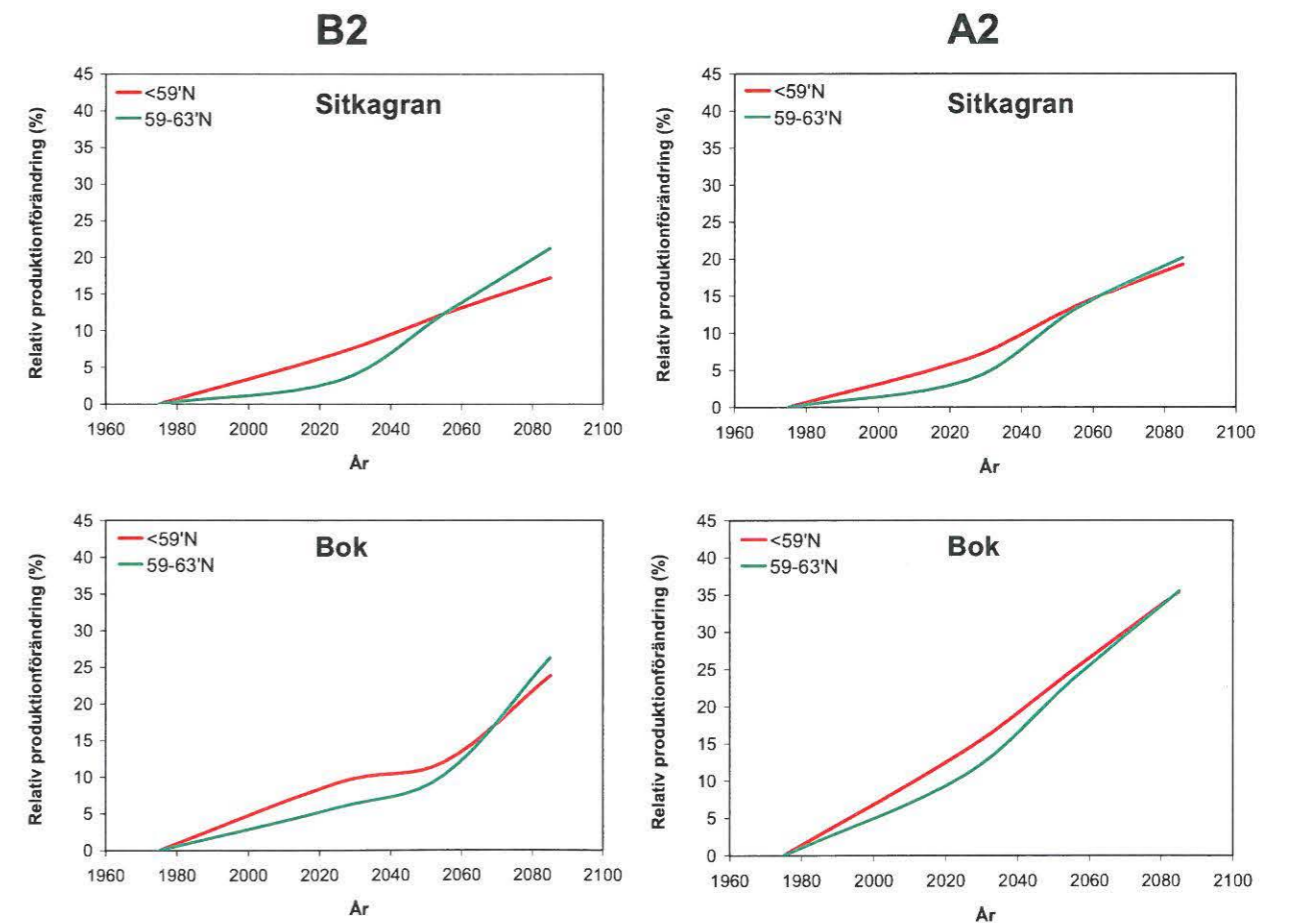
I modellsimuleringarna, baserade på klimatdata från A2-scenariet, är den relativa produktionsförändringen större för gran och björk jämfört med för gran i norra Sverige (Figur 5) för perioden 2071-2100 i jämförelse med referensperioden 1961-1990. Däremot är den relativa ökningen störst för tall i södra Sverige, vilket sannolikt är en effekt av att tallen har ett lägre vattenbehov och nederbördsminskningen under sommaren påverkar tallen mindre jämfört med gran och björk. Regionala klimatscenarier baserade på Hadley har en större nederbördsminskning och skulle påverka produktionen mer negativt än för de regionala klimatscenarier vi har använt oss av i denna analys. Skillnaderna mellan tall, gran och björk kan också vara en effekt av att respirationen ökar mer för gran och björk pga av en större barr/bladarea jämfört med tallen. Produktionsförändringen för sitkagran har samma mönster som för gran men är ca 5% lägre, medan boken är närmast identisk med tallen i södra Sverige. För att få en uppfattning hur produktionsutvecklingen ser ut över tiden för olika breddgrader, delade vi upp datamaterialet i en södra (<59°N), mellersta (59-63°N) och norra (>63°N) Sverige. Simuleringarna för tall visar på en svag produktionsökning i början av B2-scenariet och ökar snabbare i mitten av århundradet för mellersta och framför allt norra Sverige (Figur 6).



Figur 6. Den transienta relativa produktionsökningen för tall, gran och björk för B2- (vänster) och A2-scenariet (höger) i jämförelse med simuleringar med referensklimatet 1961-1990.

A2-scenariet har en betydligt snabbare uppgång i början som sedan mattas av i slutet av simuleringens period. Den snabbare uppgången av tillväxten är högst sannolikt en effekt av högre koldioxidhalt i A2-scenariet medan själva temperaturökningen i B2- och A2-scenariet är inledningsvis ganska likartad. Däremot blir skillnaden större mellan scenarierna i slutet av 2000-talet och ger troligtvis upphov till att granens tillväxt stagnerar i slutet av århundradet i södra Sverige (Figur 6). Detta är antagligen en effekt av att respiration ökar mest för gran. Granen har en liknande trend som tall i B2-scenariet men ökningen i norra Sverige är betydligt större för gran i slutet av århundradet. Granens produktionsökning är i stort sett linjär i A2-scenariet men stagnerar och till och med sjunker i slutet (2060-2100) för framför allt södra Sverige. Detta beror troligtvis på både den absoluta temperaturökning och temperaturnivån gör att respirationen, som ökar exponentiellt med respirationen (underhållsrespiration), ökar mer än fotosyntesen. För björk är trenden i B2-scenariet som för gran men ökar inte lika mycket i norra Sverige (Figur 6). I A2-scenariet ser man däremot ingen stagnation i produktionsökningen för björk som man gör för gran.

Produktionsökningen för sitkagran är i B2-scenariet ca 5% lägre jämfört med gran i södra och mellersta Sverige, som i övrigt har en identisk trend som gran (Figur 7). I A2-scenariet är skillnaden ca 10% lägre jämfört med gran. Skillnaderna mellan sitkagran och gran kan bero på parameteriseringen, där fotosyntesparametrarna för sitkagran inte ger lika hög fotosyntesnivå som för gran och har en annan temperaturresponskurva (temperaturens inverkan på fotosynteshastigheten).

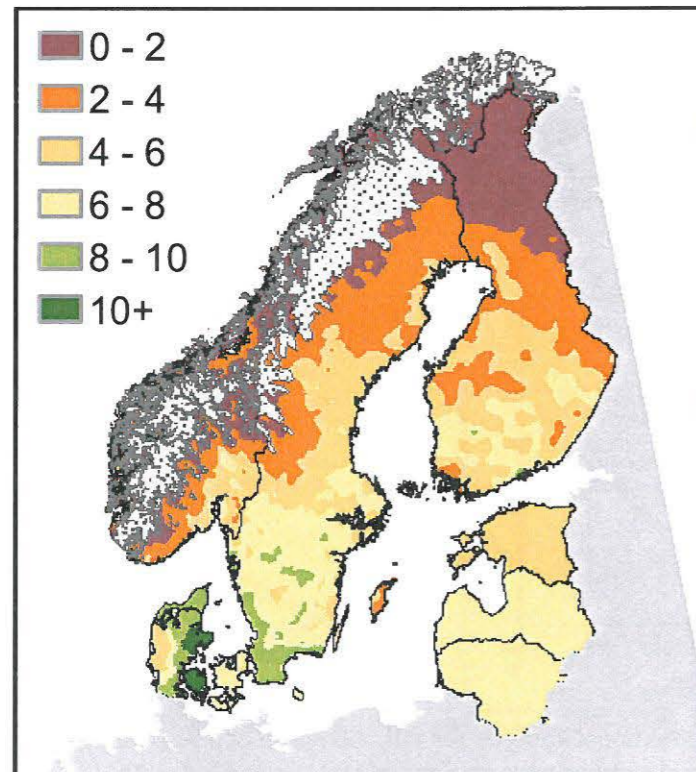


Figur 7. Den transienta relativa produktionsökningen för tall, sitkagran och bok för B2- (vänster) och A2-scenariet (höger) i jämförelse med simuleringar med referensklimatet 1961-1990.

Eftersom det är osannolikt att utbredningsområdet för sitkagran och bok sträcker sig över 63:e breddgraden, även i ett framtida klimat, redovisar vi inga data ovanför den breddgraden. Boken har ungefär samma produktionsökning som björken i södra och mellersta Sverige i B2-scenariet (Figur 7), dock med en svag svacka i mitten av seklet. Någon trolig förklaring har vi inte till svackan men kan ha uppkommit av att klimatet har påverkat boken på ett sätt som skiljer sig från de andra trädslagen, vilket i sin tur kan bero på parameteriseringen av bok. I A2-scenariet ökar boken kraftigt med en linjär trend (Figur 7) och är det trädslag som ökar mest i södra och mellersta Sverige. Produktionsskillnaden mellan B2- och A2-scenariet är ca 10% högre för tall och bok i A2-scenariet sett över hela simuleringsperioden. Detta gäller även för gran och björk i norra Sverige, medan den i södra och mellersta Sverige är mindre än 5%. I simuleringarna har vi använt oss av de transienta simuleringarna och några betydande produktionsnedsättningar vid extrema torrår har inte inträffat. Om extrema torrår inträffar efter varandra skulle det sannolikt ha en stor negativ effekt på produktionen. Vidare är parameteriseringen för frisk markvegetationstyp och minskad nederbörd under vegetationsperioden (främst i södra Sverige) skulle antagligen ha större negativ effekt på produktionen på exempelvis torra sandmarker. Dock är det vanligast att tall växer på dessa marker vilka är mindre känsliga för torka jämfört med gran och lövträdsdrag. På fuktiga (och blöta) marker är sannolikt den negativa effekten på produktionen av minskat nederbörds-klimat mindre jämfört med friska marker.

Produktionpotential för biobränsle i ett framtida klimat

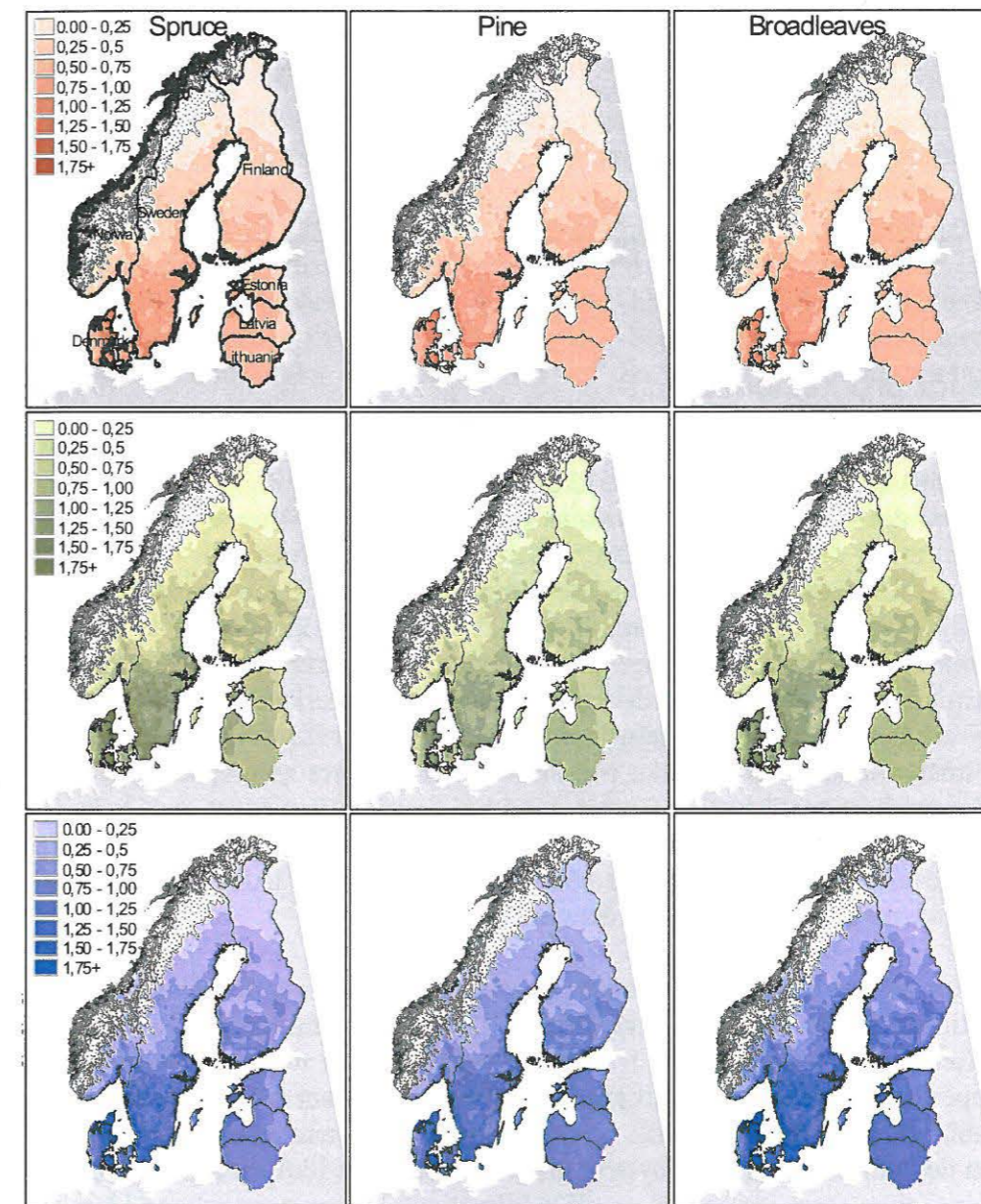
Sveriges skogsmarksareal är ca 27 miljoner hektar har en stående volym på sammanlagt 2600 miljoner m^3 och med en årlig tillväxt på drygt 100 miljoner m^3 . Sverige har med andra ord redan idag en mycket stor potential att producera och ta ut biobränsle ur skogen. Möjligheterna kommer troligtvis att öka i framtiden, då tillväxten ökar som en effekt av klimatförändringarna. Den aktuella tillväxten är störst i södra Sverige på 7-10 $m^3 ha^{-1} a^{-1}$ och minskar gradvis norrut till 2-4 $m^3 ha^{-1} a^{-1}$ i Väster- och Norrbotten (Figur 8).



Figur 8. Aktuella tillväxten (m^3 per ha och år) i Sverige, Danmark, Estland, Finland, Lettland, Litauen och Norge.

Detta går att räkna om till torrsubstans genom att använda sig av olika omräkningsfaktorer (Näslunds volymfunktioner och Marklunds biomassa-funktioner), som bland annat används för att skatta nationella förändringar av Sveriges kolinlagring. Torrsubstanshalten för stam och GROT-andelen i dagsläget för våra tre dominerande trädslag gran, tall och björk är omräknat i Figur 9 (de tre översta Figureerna). Torrsubstansproduktionen är ca 3-5 $Mg ha^{-1} a^{-1}$ i södra Sverige och 1-3 $Mg ha^{-1} a^{-1}$ i Sveriges mellersta delar (de tre översta i Figur 9).

I ett förändrat klimat, enligt SMHI's B2-scenarie, ökar biomassa-produktion med ca 15-30% (störst relativ ökning i norr) jämfört med dagens produktion. Använder vi oss av simuleringarna, baserade på de transienta körningarna med B2-scenariet, kan vi skatta hur torrsubstansproduktionen för stam, GROT och rötter förändras. Ökningen i absoluta tal är ca 0.5-0.9 $Mg ha^{-1} a^{-1}$ i norra Sverige och 0.4-1 $Mg ha^{-1} a^{-1}$ i södra Sverige.



Figur 9. Skillnad i torrsubstansproduktion ($Mg ha^{-1} a^{-1}$) i B2-scenariet om 100 år jämfört med dagens klimat av stam (övre Figureer), stam + GROT (Figureer i mitten) och stam + GROT + rötter (nedre Figureer) för gran (vänster), tall (mitten) och björk (höger).

Om vi leker med tanken att all merproduktion av stam och GROT kan användas för energiändamål skulle det innebära ca 19.5 Pg per år (Tabell 1) för hela Sverige, vilket motsvarar en energimängd på ca 120 TWh per år. Om vi ser till den sammanlagda merproduktion för våra nordeuropeiska grannländer i ett förändrat klimat är det lika mycket tillsammans som för Sverige, dvs ytterligare 20 Pg per år (Tabell 1).

Tabell 1. Data för olika länder i norra Europa med avseende på land- och skogsmarksareal, stående volym för barr- och lövträd, samt merproduktion av stamved och GROT (Pg a^{-1}) i ett förändrat klimat enligt B2-scenariet.

Land	Landarea	Areal skog	Stående volym ¹	Stående volym ¹	Stående volym ¹	Merproduktion	
	1000 ha	1 000 ha	Barrskogar	Lövskogar	Totalt	Stam (Pg a^{-1})	Stam + GROT (Pg a^{-1})
Danmark	4 243	455	31	23	54	0.41	0.57
Estland	4 227	2 060	194	113	307	1.12	1.58
Finland	30 459	21 935	1529	338	1867	7.35	9.89
Island	10 025	31	0.2	0.2	0.4	0	0
Lettland	6 205	2 923	242	167	409	1.81	2.42
Litauen	6 258	1 994	186	128	314	1.31	1.74
Norge	30 683	8 868	534	137	671	2.19	3
Sverige	41 162	27 134	2189	378	2567	14.18	19.45
Totalt	133 262	65 400	4 906	1 284	6 190	28	39

Framtidsanalys för produktionen

Det är högst sannolikt att produktionspotentialen kommer att öka de närmaste 100 åren i stora delar av Sverige, förutsatt att klimatet i stora drag utvecklar sig i enlighet med Rossby Centre's scenarier. Om det växer 100 miljoner m^3sk per år idag så kan den årliga tillväxten öka till över 120 m^3sk per år om 100 år om vi lyckas utnyttja den ökade produktionspotentialen. Den transienta produktionsökningen är antagligen störst fram till 2070 för att sedan avta. Skulle temperaturförändring bli större än i A2-scenariet är det inte säkert att produktionen skulle öka ytterligare, då skillnaden i produktionsökning är relativt liten mellan B2- och A2-scenariet. Nederbörds-klimatet har en stor inverkan på produktionen i framförallt södra Sverige. Därför är det viktigt med tillförlitligheten i SMHI's scenarier när det gäller denna klimatvariabel. Extrem torka och återkommande torra somrar kan sannolikt leda till betydande produktionsförluster. Torrår i södra Sverige har visat sig leda till tillväxtnedsättningar hos framför allt medelålders och äldre bestånd och gran i sydöstra Sverige. Långliggande torkförsök i framför allt södra Sverige, där man leder bort en del av nederbörden vore intressant att starta upp för olika trädslag.

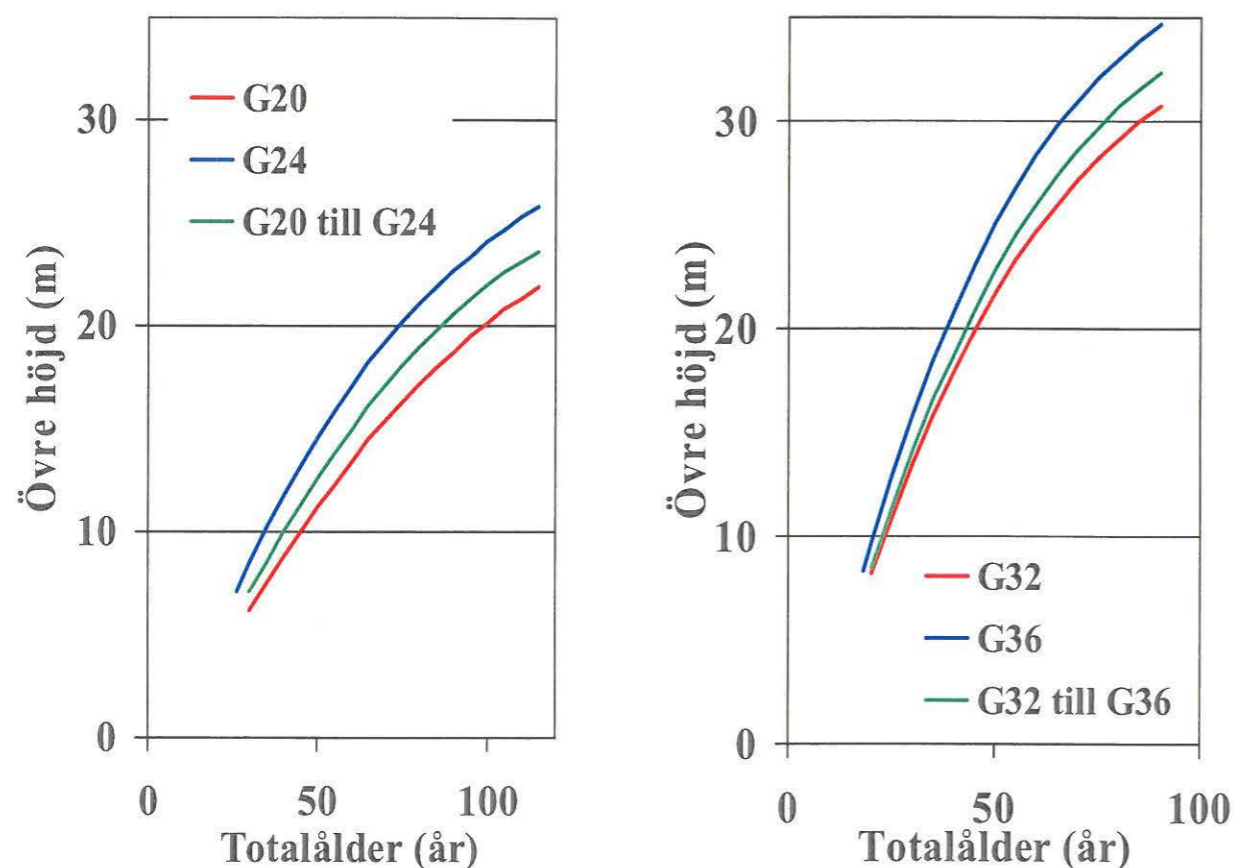
När det gäller effekten av hur marken och utbudet av växtnäring kommer att påverkas av ett förhöjt temperaturklimat är det svårt att kvantifiera. Troligtvis kommer det leda till en betydande produktionsökning i framför allt i Sveriges mellersta och norra delar. En effekt som ett förhöjt temperaturklimat kan ha är att granen blir vanligare i norra Sverige, där själva trädslagsbytet innebär en produktionshöjning. I södra Sverige kan man säkert köra gran en omloppstid till men det kan bli aktuellt att byta ut granen i framtiden ifall medeltemperaturen ökar med 2-3 grader. Tallen förekommer i flera olika klimat och kommer antagligen klara sig bäst i södra Sverige av alla våra inhemska trädslag om det blir avsevärt torrare. Skogsskötseln kommer sannolikt att förändras på lång sikt i Sverige, med kortare omloppstider och anpassningar för att minimera olika skadeverkningar (storm, insekts-, svampangrepp). Sveriges och Finlands roll som skogsländer och producenter av skogsråvara inom EU

kommer sannolikt att förstärkas om SMHI's scenarier blir sannspådda, då klimatförhållandena för skogsproduktionen kommer att försämrats för stora delar av Europa.

Det är högst sannolikt att produktionspotentialen kommer att öka de närmaste 100 åren i stora delar av Sverige, förutsatt att klimatet i stora drag utvecklar sig i enlighet med Rossby Centre's scenarier. Om det växer 100 miljoner m^3sk per år idag så kan den årliga tillväxten öka till över 120 m^3sk per år om 100 år om vi lyckas utnyttja den ökade produktionspotentialen.

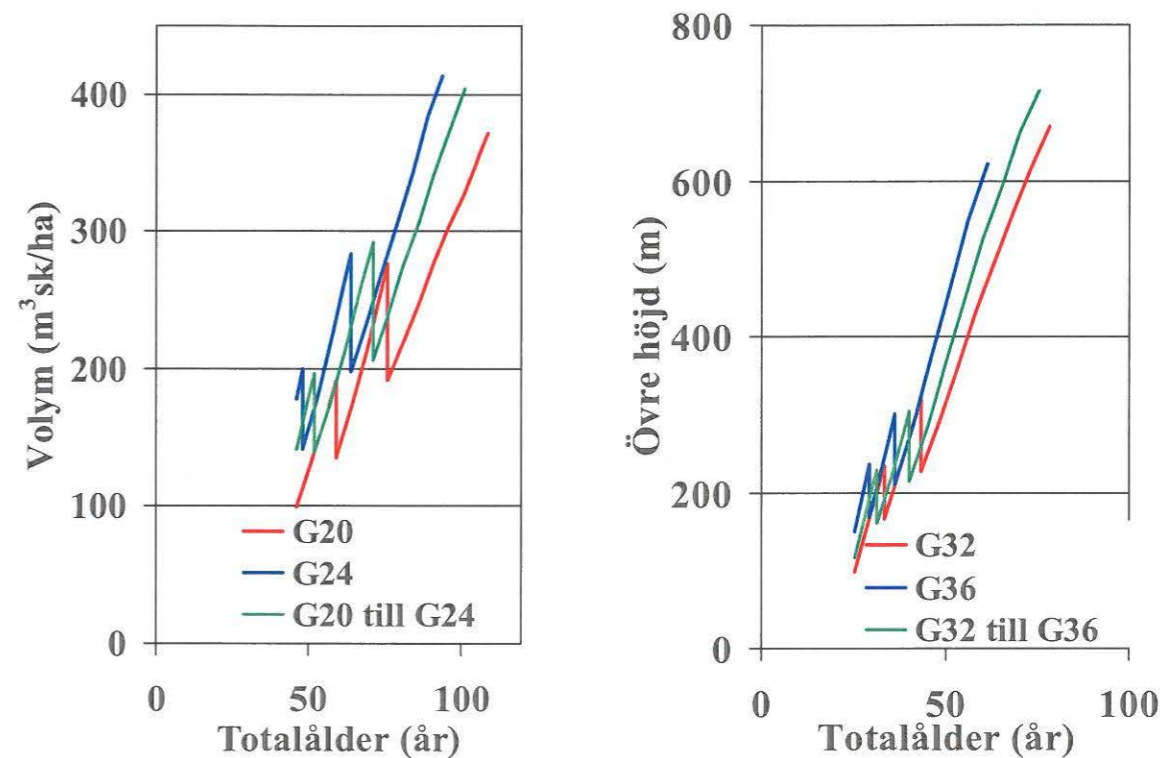
Effekter av förändrat klimat på produktionsekonomin vid granproduktion

I föreliggande kalkylexempel räknar vi med två olika produktionsscenarier, 23% (gran södra Sverige) respektive 35% (gran norra Sverige) produktionshöjning efter 100 år. Markens bördighet brukar mätas med hjälp av ståndortsindex vilket är den höjd som de högsta träden i beståndet når på 100 år. En relativt bördig granmark, vilken är vanlig i södra Sverige, kan ha ståndortsindex G30 vilket innebär att de högsta träden blir 30 m höga vid 100 års ålder. För en mindre bördig granmark med ståndortsindex G22 blir de högsta träden 22 m efter 100 år. Ståndortsindex kan sedan räknas om till bonitet eller produktionsnivå vilket anger medelproduktion under omloppstiden i $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. Genom att beräkna den höjning i ståndortsindex en viss produktionsökning p.g.a. förändrat klimat kan sedan produktionsmodeller användas för att beräkna framtida intäkter och kostnader. Vi har antagit att ökningen av SI sker linjärt under 100-årsperioden (Figur 10). Vid en transient produktionshöjning för gran med 35% i norra Sverige om 100 år innebär att en G20 blir en G24 om 100 år (vänster i Figuren). Produktionshöjning på 23% för gran i södra Sverige om 100 år innebär att en G32 blir en G36 (höger i Figuren). Även om produktionen stagnerar i slutet av århundradet för gran i A2-scenariet blir ändå ökningen 23% och har en liten betydelse för framskrivningen av tillväxten i denna analys. För varje 5-års period beräknas en tillväxt med aktuellt SI som läggs till den tillväxt som ackumulerats sedan tidigare. På så sätt fås en gradvis ökning av ståndortsindex och tillväxten.



Figur 10. Klimatkorrigerat ståndortsindex vid produktionshöjning om 100 år på grund av klimatförändring på 23% respektive 35%.

I Figur 11 redovisas effekten av ovanstående klimatkorrigering av SI på gallringars och volymens utveckling för alternativet med en ökning av tillväxten om 100 år med 23 respektive 35%. Medelproduktionen för det klimatkorrigerade alternativet med 23% tillväxtökning om 100 år för gran i södra Sverige blir ca 9% högre än för det icke klimatkorrigerade alternativet. I norra Sverige blir medelproduktionen ca 15% högre för gran i norra Sverige om tillväxtökningen antas bli 35% om 100 år (Tabell 2). Anledningen till att den relativa tillväxtökningen för beståndet blir lägre än vad tillväxtökningen om 100 år anger är naturligtvis att ökningen av tillväxten sker gradvis under 100-årsperioden. Under de första femårsperioderna har man nästan ingen tillväxtökning alls medan bestånden växer betydligt bättre i mitten och under slutet av omloppstiden. Det hade varit lätt att anta att tillväxtökningen skulle bli hälften av den antagna tillväxtökningen men granens tillväxtkurva gör att så inte blir fallet. Dels så är granens omloppstid kortare än 100 år så de bestånd som vi planterar idag får aldrig uppleva den antagna produktionsökningen om 100 år. Dels så varierar granens tillväxt under perioden på grund av att bestånd i olika utvecklingsfas har olika tillväxt och är som högst vid 30-40 års ålder, det vill säga när effekten av klimatet på tillväxten endast är 30-40% av vad den kommer att bli om 100 år.



Figur 11. Volymens utveckling och gallringar för G20, G24, G32 och G36 och för de klimatkorrigerade alternativen med 23% respektive 35% ökning av produktionen om 100 år.

Ekonomi påverkades positivt särskilt för det norra alternativet (Västerbotten), där nuvärdet ökade med 79% och kassaöverskottet med 17% jämfört med den ursprungliga produktionsnivån. I det södra alternativet (Småland) var ökade nuvärdet och kassaöverskottet med 16 respektive 10%. Anledningen till att ekonomin påverkades relativt sett mer än produktionen var att tillväxtökningen sker sent i beståndets liv och att det då producerades grövre träd. I och med att slutavverkningsbeståndet innehåller grövre träd blir inkomsten per kubikmeter högre eftersom grövre träd betalas bättre. Dessutom är det billigare att avverka grova träd än något klenare.

Tabell 2. Medelproduktion, nuvärde och kassaöverskott för G20, G24, G32 och G36 och för de klimatkorrigerade alternativen med 23% respektive 35% ökning av produktionen om 100 år. För kassaöverskott, nuvärden och medelproduktion anges den relativa skillnaden till kontrollalternativet i kursiv stil.

Västerbotten

	G20	G24	G20 till G24
Medelproduktion (m ³ /ha år)	4.7	6.1 (1.29)	5.4 (1.15)
Nuvärde (kr/ha)	6 300	15 300 (2.43)	11 200 (1.79)
Kassaöverskott (kr/ha)	1 320	1 690 (1.27)	1 550 (1.17)

Småland

	G32	G36	G32 till G36
Medelproduktion (m ³ /ha år)	10.7	13.0 (1.22)	11.6(1.09)
Nuvärde (kr/ha)	39 965	51 600 (1.29)	46 200 (1.16)
Kassaöverskott (kr/ha)	2 827	3 200 (1.13)	3 110 (1.10)

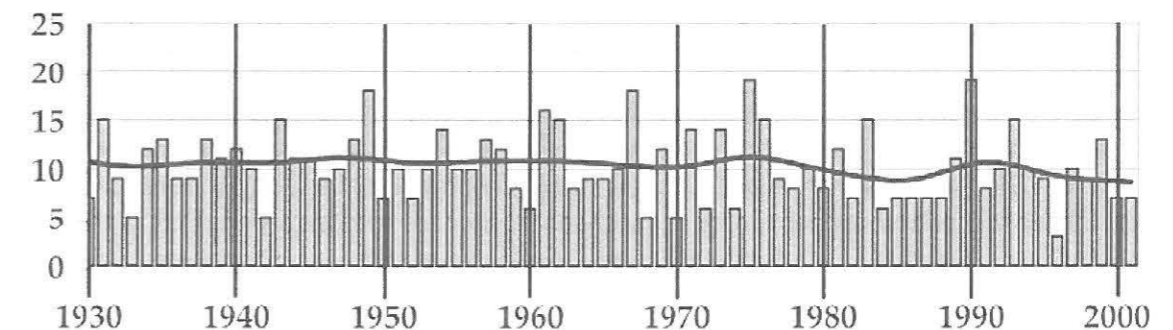
Sammanfattningsvis så visar ovanstående simuleringsstudie att produktionen i granskog som planteras idag blir klart högre än dagens produktion om klimatförändringen medför en kommande produktionsökning på 23 respektive 35%. Ekonomin påverkas ännu mer av en klimatförändring än produktionen beroende på att ökningen av tillväxten i beståndets slutfas medför grövre skog som ger högre intäkter och är billigare att avverka. Effekten på nuvärdet ökar särskilt mycket i norra Sverige, vilket på lång sikt bör medföra kraftiga prisökningar på skogsmark.

Potentiellt påverkas ekonomin ännu mer av en klimatförändring än produktionen beroende på att ökningen av tillväxten i beståndets slutfas medför grövre skog som ger högre intäkter och är billigare att avverka. Den potentiella effekten på nuvärdet ökar särskilt mycket i norra Sverige, vilket på lång sikt skulle kunna medföra kraftiga prisökningar på skogsmark.

Risken för vindfällning under ett förändrat klimat

Under senare år har omfattande vindskador rapporterats för Europeiska skogar, med exempelvis 200 milj. m³ skog skadad under 1999 (UNECE/FAO, 2000). Under 2005 skadades 100 milj. m³ skog (Anon., 2005) varav ca 75 milj. m³ i Sverige (Skogsstyrelsen, 2006). Skadorna i Sverige uppkom i södra Sverige efter en storm natten mellan 8 och 9 januari 2005 och uppgick till nästan en hel svensk årsavverkning. Så omfattande skador på skogen har aldrig tidigare orsakats modernt svenskt skogsbruk av en enda storm (Holmberg, 2005). Dessutom uppkom skador på kulturminnen, byggnader, elförsörjningen, telefonnäten och väg- och järnvägstrafiken. Tio dödsfall från uppröjningsarbetet efter stormen och drygt 140 arbetsolyckor har rapporterats (Skogsstyrelsen, 2006).

Vind är den störningsfaktor som orsakar störst skador inom europeiskt skogsbruk (Schelhaas med flera, 2003). Skadornas omfattning varierar mellan år och situationer men omfattande skador har blivit allt vanligare under 1900-talet. Klimatdata från senare tids milda och blöta år (1991–2005) i Sverige har jämförts med data från perioden 1961–1990 (Alexandersson & Edquist, 2006). Man kunde då konstatera att temperaturen ökat med närmare en grad och att nederbörden ökat i så gott som hela landet, om än inte statistiskt säkerställt för landet som helhet. En jämförelse mellan perioden 1991–2002 och perioden 1901–1990 visade att i synnerhet nederbörden hade ökat (+11 %) men också att temperaturen hade ökat, om än mindre påtagligt (+0.7 °C) (Lindström & Alexandersson, 2004). Vad gäller vindklimatet har detta varierat i förhållandevis liten omfattning (Alexandersson & Vedin, 2002; Barring & von Storch, 2004). Av Figur 12 framgår att det mellan 1930 och 2002 inte blivit vanligare med storm i södra Sverige (Alexandersson & Vedin, 2002).



Figur 12. Antalet dygn med beräknade vindhastigheter överskridande 25 m/s för södra Sverige, 1930–2002. Beräkningarna är baserade på lufttrycksmätningar gjorda i Göteborg, Falsterbo och Visby. Kurvan visar 10-års medelvärden. Modifierad från Alexandersson & Vedin, 2002.

Att klimatet blivit mildare och blötare minskar skogens stabilitet men kan sannolikt inte ensamt förklara varför det blivit vanligare med vindskador sedan början av perioden. Under den aktuella perioden har skogsbruket och därmed skogen förändrats på flera sätt som sannolikt bidrar till att förklara den ökade frekvensen omfattande skadetillfällen (Blennow & Olofsson, 2004; Blennow & Eriksson, 2006). En bidragande orsak torde vara att den stående volymen skog ökat. Det fanns alltså under perioden en ökande volym skog som kunde blåsa ner. Trakthyggesbruket introducerades på bred front under 1950-talet och utgör nu den dominerande skogsbruksformen i Sverige. I och med detta skapas hyggeskanter som kan exponeras för hög vindhastighet och som skapar turbulens (Saville, 1983; Morse med flera, 2002; Gardiner med flera, 2005). Andelen gran i landskapet har dessutom ökat. Gran är förhållandevis känslig för vind (Persson 1975; Peltola med flera, 2000; Nielsen, 2003; Valinger med flera, 2006). Det är därför sannolikt att skogsbrukets utveckling tillsammans

med att klimatet blivit mildare (mindre tjäle) och blötare har medfört att skogen blivit mera känslig för vind även om det kanske inte blivit vanligare med storm (Blennow & Olofsson, 2004). Att brukandet av skogen har gjort den mera vindkänslig innebär att vi kan påverka risken för vindfällning.

Klimatförändringarna kan förväntas påverka risken för vindfällning både direkt genom ett förändrat klimat, t.ex. genom ett ändrat vindklimat och ändrade tjälförhållanden och indirekt genom förändrade tillväxtbetingelser. Hur pass vindkänslig den framtida skogen kommer att vara påverkas av hur vi sköter skogen och vilka trädslag vi väljer.

Det framtida klimatet

Tillgängliga regionala klimatförändringsscenarioer för norra Europa baseras på globala scenarier som ligger centralt inom spännvidden mellan olika klimatmodeller avseende global uppvärmning på tidsskalan 100 år (Rummukainen et al., 2004). Klimatet kan alltså tänkas förändras både mer och mindre än vad tillgängliga regionala scenarierna indikerar. Enligt dessa är det framtida vindklimatet för Sverige osäkert (Räsänen et al., 2004), men det kan inte uteslutas att klimatet blir blåsigare. Ett blåsigare klimat skulle öka sannolikheten för vindfällning om inte skogens känslighet för vindverkan minskas. Dessutom leder ett mildare och blötare vinterklimat till minskad stabilitet genom försämrade förankring av träden i marken, exempelvis genom minskad eller utebliven tjäle. Enligt Lindström med flera (2002) registrerades tjäle på ett djup av 5 cm eller mer under 10 av 16 år i skogsmark på Svartberget (64°14'N/19°46'Ö), Västerbotten, under perioden 1981–1996 medan frekvensen av år med tjäle, tjälperiodens längd och mäktigheten av tjäle var större för mark utan skog. Enligt en modell baserad på mätdata från Svartberget och använd för att simulera utvecklingen av tjäl förekomst under ett förändrat klimat förväntas frekvensen av år med tjäle, tjälperiodens längd och mäktighet minska under den närmsta hundraårsperioden (G. Lindström, muntlig information 2007). Andra simuleringsstudier indikerar att tjälperiodens längd minskar för hela Finland under innevarande århundrade men att minskningen av snötäcket i södra Finland ökar sannolikheten för tjäle mitt i vintern jämfört med idag (Venäläinen med flera, 2001). I centrala och norra Finland indikeras det framtida snötäcket bli tillräckligt stort för att tjälens maximala årliga mäktighet ska minska. Beroende på hur stor temperaturökningen blir skulle alltså tjälens mäktighet kunna öka under ett förändrat klimat om snötäckets tjocklek avtar. Dessutom spelar skogens grad av slutenhet roll för förekomsten av tjäle där stigande slutenhet medför minskad mängd snö på marken och därmed mera tjäle (Mellander med flera, 2006).

Den framtida skogen

Man kan påverka skogens känslighet för vindverkan genom hur man sköter skogen och genom vilka trädslag man väljer. Den ovan beskrivna förväntade ökningen av potentialen för biomassaproduktion skulle kunna medföra att träden blev vindkänsliga vid en lägre ålder. Detta skulle kunna medföra ökad risk för vindfällning genom en förlängd period under vilken träden befinner sig i vindkänslig fas så länge omloppstiden inte förkortas. Ökningen i potentiell biomassaproduktion förväntades bli störst i Norrland och skulle kunna leda till större användning av gran i Norrland. I så fall förväntas detta leda till ökad sannolikhet för vindfällning om inte skötseln anpassas. Förutom genom omloppstidens längd och genom trädslagsval kan sannolikheten för vindfällning påverkas genom rumslig planering, och genom skötselåtgärder, t.ex. gallringsingrepp, vilka kan påverka trädens höjd och form, antal stammar per ytenhet, och rotningsförhållanden. Exempelvis har förkortning av omloppstiden tillämpats i stor skala i Storbritannien för att därigenom minska risken för vindskador.

Modellstudier

För att skatta inverkan på sannolikheten för vindfällning av ett förändrat klimat för två geografiskt skilda fallstudieområden har ett antal modellstudier genomförts. Utifrån resultaten har diskussionsmässigt ett försök till extrapolering till andra delar av Sverige gjorts.

Material och metoder

Vi har använt oss av en serie datormodeller och regionala klimatscenedata framtagna av Rossby Centre vid SMHI, för att beräkna sannolikheten för vindfällning under perioden 2011–2040 och 2071–2100 för två fallstudieområden, ett i norra (Brattåker) och ett i södra Sverige (Asa). Dessutom har vi utifrån resultaten från dessa studier sökt dra paralleller till andra delar av Sverige.

Fallstudieområden

Beräkningar har gjorts för två fallstudieområden; Asa försökspark i Småland samt Brattåker i Västerbotten (Figur 13, Tabell 3). Dessutom bedömdes framtida riskbild för andra delar av landet.



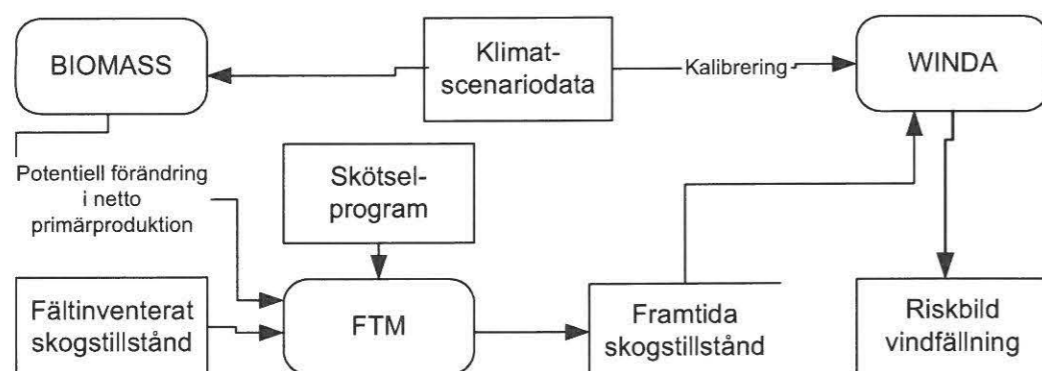
Figur 13. Lokalisering av två fallstudieområden i Sverige.

Tabell 3. Geografiska data för två fallstudieområden.

Fallstudie-område	Latitud/longitud	Antal bestånd	Storlek (ha)
Asa försökspark	57°06N/14°30'Ö	305	670
Brattåker	64°12'N/19°30'Ö	301	2248

Modeller

Både skogliga produktionsprognoser och underlag för beslut om skötselåtgärder baseras idag vanligen på empiriska tillväxtmodeller. Eftersom vi saknar erfarenhet av klimatförändringarna behöver modellerna modifieras eller bytas ut för att inte tappa precision under ett förändrat klimat. Datormodellen The Forest Time Machine (FTM) (Andersson med flera, 2005) (se Appendix 3) utvecklades för att stödja utvärdering av olika skogsskötselstrategier på landskapsnivå. FTM simulerar yttäckande skogens utveckling i femårssteg med skogsbeståndet som minsta geografiska enhet. I beräkningarna tas hänsyn till potentiell förändring av biomassaproduktionen som beräknats med modellen BIOMASS, vilken beskrivs i appendix 2. FTM har modifierats så att ståndortsindex (SI) gradvis förändras i enlighet med resultaten från BIOMASS-körningarna allteftersom klimatet förändras. På så vis omsattes den potentiella förändringen i biomassaproduktion på grund av klimatförändringarna till potentiell förändring i tillväxt. Beräkningarna som gjorts i denna studie innefattade simulering av framtida skogstillstånd under olika klimatscenarier med hjälp av modellen. De simulerade framtida skogstillstånden utvärderades med avseende på sannolikheten för vindfällning med hjälp av modellen WINDA (Blennow & Sallnäs, 2004) (se Appendix 4) (Figur 14). WINDA har anpassats för att kunna användas tillsammans med klimatscenariodata (Blennow & Olofsson, revision inskickad).



Figur 14. Flödesschema för de simuleringar och beräkningar av sannolikhet för vindfällning (riskbild) som gjorts för fallstudieområdena Asa och Brattåker.

De regionala klimatscenarierna har tagits fram vid Rosby Centre, SMHI, med hjälp av deras regionala klimatmodell RCA3 som drivits med data från den globala klimatmodellen ECHAM4/OPYC3 och med återanalyserade och distribuerade observationsdata, ERA40 (Kjellstöm med flera, 2005). Klimatscenarier för två olika utsläppsscenarioer, B2 och A2 (Nacicenovic och Swart, 2000) har använts. Klimatscenariodata framtagna av Rosby Centre vid SMHI med modellsystemet RCA3-ECHAM4/OPYC3 för pixeln över de centrala delarna av respektive fallstudieområde användes i beräkningarna (se Appendix 4). För vardera trädslagen gran, tall och björk togs faktorer för förändring i potentiell biomassaproduktion fram för två olika utsläppsscenarioer, B2 och A2.

Simuleringar

Skogstillstånd baserade på fältinventeringsdata användes som initialt skogstillstånd för respektive fallstudieområde för simuleringar under 140 år med år 1961 som startår för simuleringarna såväl som för olika klimatscenarier. Genom att specificera skötselprogram beståndsvis och med hjälp av uppdaterade SI i FTM kunde framtida möjliga skogstillstånd genereras för respektive fallstudieområde.

För varje skötselprogram specificerades föryngringsmetod, röjningsingrepp, gallringar, och föryngringsavverkning för att efterlikna svensk jägmästartradition. Gallringstidpunkter specificerades utifrån gallringsmallar (Anonym, 1985) och vid varje gallringstillfälle gallrades 25–35% av beståndets grundyta bort. Beståndet slutavverkades när årsmedeltillväxten i den föregående femårsperioden understeg 2.0 % av den stående volymen. Gallringsuttaget i första gallring var något lägre för Brattåker. Skötselprogrammen specificerades för att uppnå trädslagsrena bestånd av tall, gran och björk inför föryngringsavverkning. Målträdslag valdes utifrån trädslaget med störst andel stammar initialt i respektive bestånd. Skötselåtgärderna i respektive simulering begränsades inte av rumsliga överväganden. Inga förändringar i markfuktighetsklassstillhörighet eller markvegetationsklassstillhörighet antogs under simuleringens period. Detta innebär att skötseln i simuleringarna genomfördes enligt samma principer som i dagens situation. De förändringar i skötseln som kunde noteras berodde på de förändrade försöksåttningar, t.ex. vad gäller SI som skapades i simuleringarna. Inga aktiva förändringar av skötselprinciperna t.ex. i syfte att påverka risken för stormfällning genomfördes.

Beräkningar beståndsvis av sannolikheten för vindfällning genomfördes med hjälp av den modifierade versionen av WINDA och olika vindklimatscenarier (Tabell 4). Under simuleringarna förekom ingen återkoppling mellan WINDA-utfall och skogstillståndet. Alla jämförelser mellan olika klimatscenarier gjordes för samma period, d.v.s. 2011–2040 eller 2071–2100. För Brattåker antogs att tjäle i marken under starkvindssäsongen under klimatförhållanden motsvarande perioden 1961–1990 medförde förbättrad förankring i marken varför sannolikhetsberäkningarna baserades på beräknade värden för stambrott. För beräkningar under förändrat klimat och för alla klimatscenarier för Asa baserades beräknade värden på det högsta av sannolikheterna för stambrott respektive rotvälta.

Tabell 4. Genomförda simuleringar för vardera fallstudieområdet.

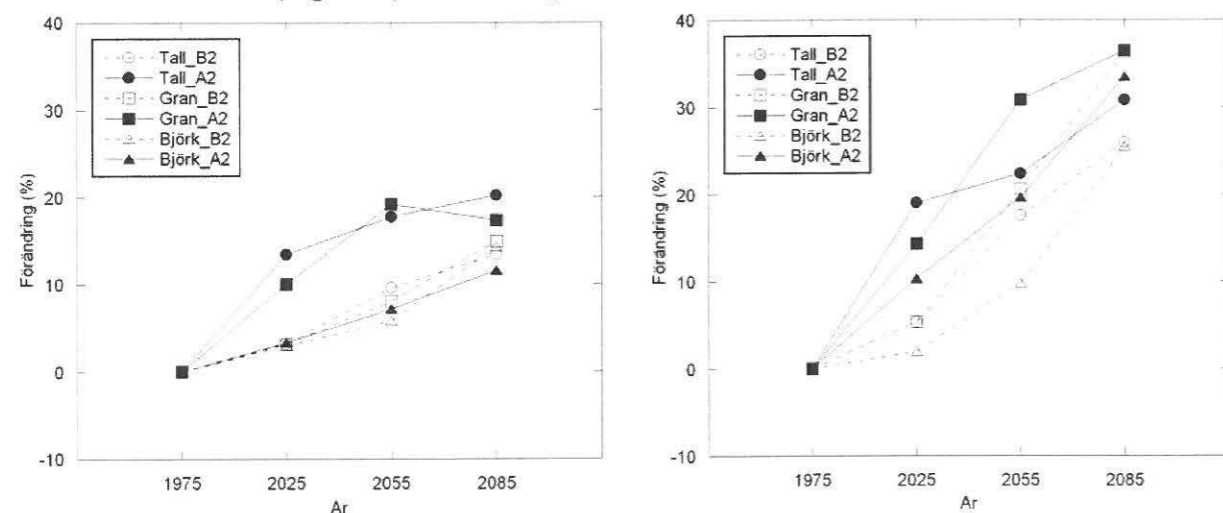
Klimat	Förändrad tillväxt	Förändrat vindklimat	Utvärderingsperiod
1961-1990			2011–2040 och 2071–2100
A2	X		2011–2040 och 2071–2100
A2	X	X	2011–2040 och 2071–2100
B2	X	X	2071–2100

Sannolikheten för vindfällning beräknades sex gånger (vart femte år) för respektive period 2011–2040 och 2071–2100. Under antagandet att samma sannolikhet för vindfällning för ett visst bestånd gäller under varje år under en given femårsperiod, viktades sannolikheten för vindfällning samman över 30-årsperioden genom faltning. Icke-parametriska statistiska metoder användes för att testa för skillnader på femprocentnivån mellan fördelningarna av beståndsvis beräknade sannolikheter för vindfällning för respektive undersökningsområde mellan olika skogstillstånd och mellan olika klimatscenarier. Endast utvalda kombinationer av skogstillstånd och klimatscenarier jämfördes. Ej redovisade kombinationer är ej testade för signifikanta skillnader. Skillnader mellan olika skogstillstånd med avseende på trädhöjd etc. testades med hjälp av t-test på 5 procentnivån.

Resultat

Fallstudier

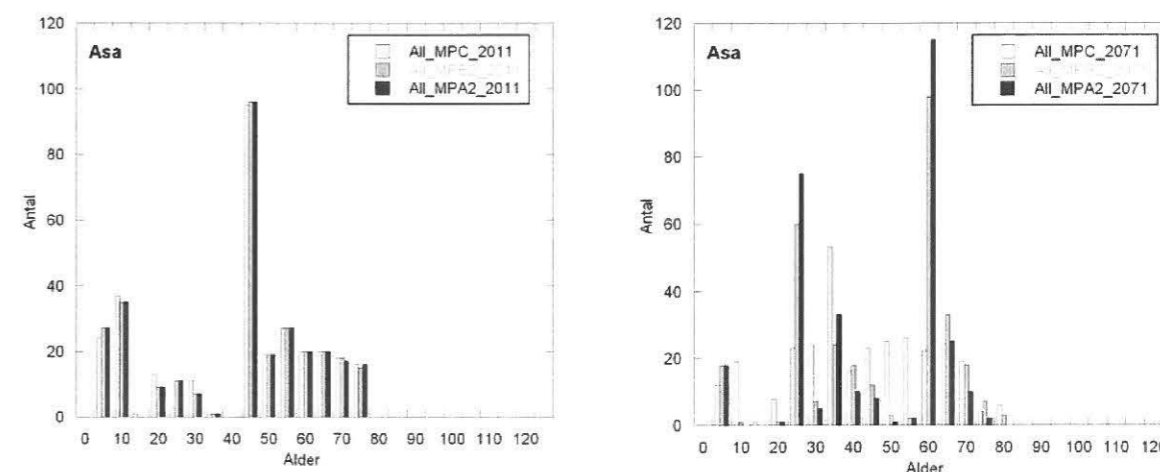
Den potentiella förändringen av biomassaproduktionen beräknades bli större för A2-scenariet än för B2-scenariet (Figur 15). Förändringen beräknades bli större för Brattåker än för Asa.



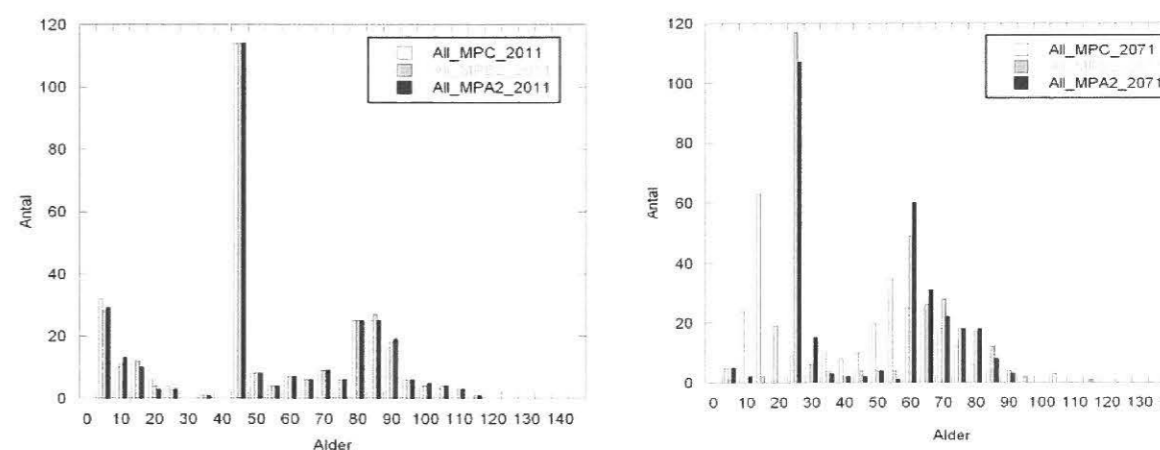
Figur 15. Trädslagsvis förändring i potentiell biomassaproduktion över tiden för Asa t.v. och Brattåker t.h. beräknad med hjälp av modellen BIOMASS och klimatscenarier för två olika utsläppsscenarier (B2 och A2) under perioden 1975 till 2085 framtagna av Rossby Centre, SMHI, med hjälp av modellen RCA3-ECHAM4/OPYC3 (Kjellström med flera, 2005).

Det initiala skogstillståndet hade genererats av den historiska skötseln. Appliceringen av skötselprogram i simuleringarna gav upphov till skeva åldersklassfördelningar genom att ett större antal bestånd slutavverkades i början av simuleringens period (Figur 16). Åldersklassfördelningarna för respektive undersökningsområde hade förändrats endast i mindre omfattning i simuleringarna med klimatförändringar vid början av den första utvärderingsperioden (år 2011). Kombinationen av använt förnygringsavverkningskriterium under simuleringarna och förändrad tillväxt till följd av klimatförändringarna medförde att ett flertal bestånd slutavverkades under kort tid vilket framgår som en andra topp åldersklassfördelningarna för år 2071 i Figur 16.

a.

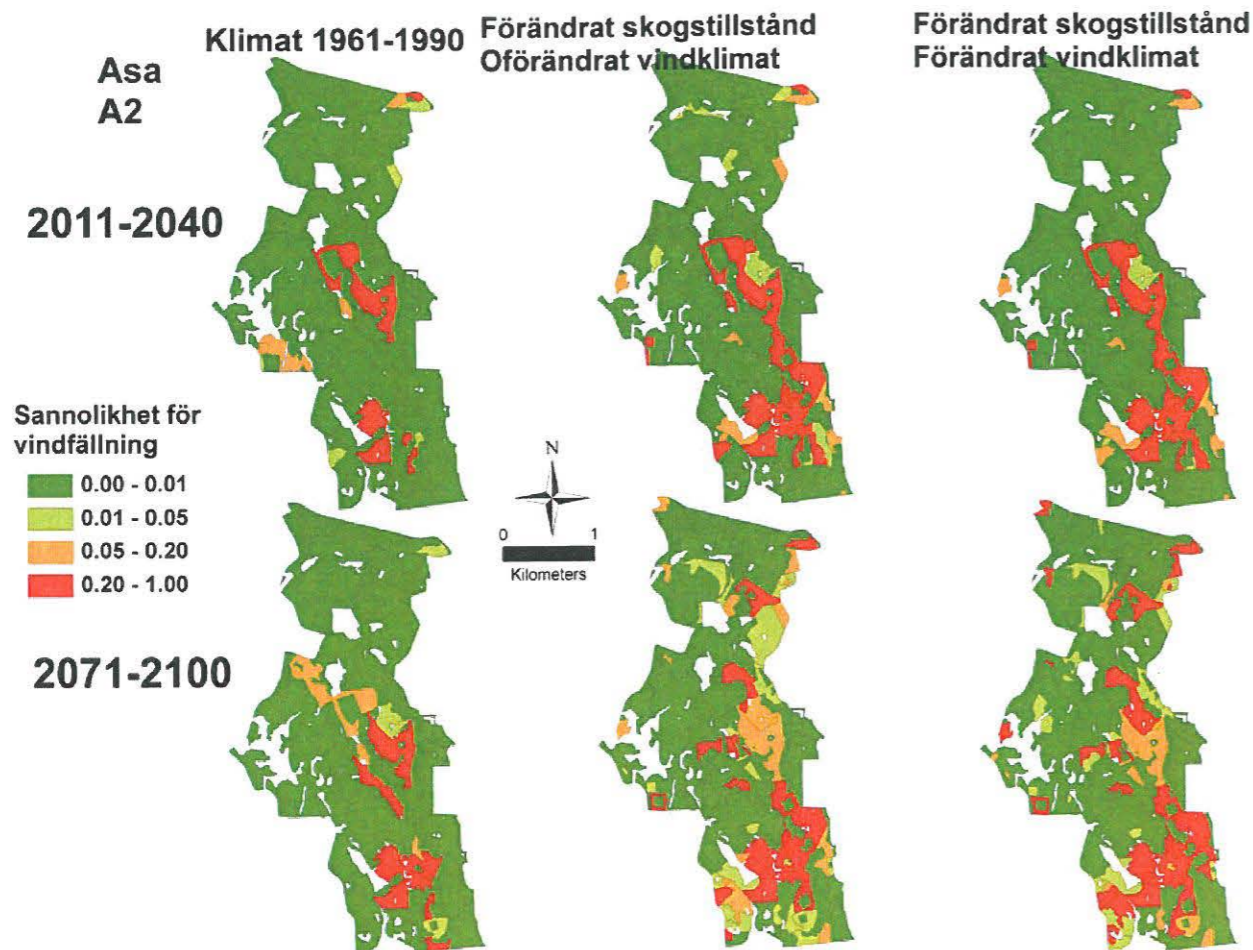


b.



Figur 16. Åldersklassfördelningarna vid inledningen av respektive utvärderingsperiod (2011 och 2071) för a. Asa och b. Brattåker.

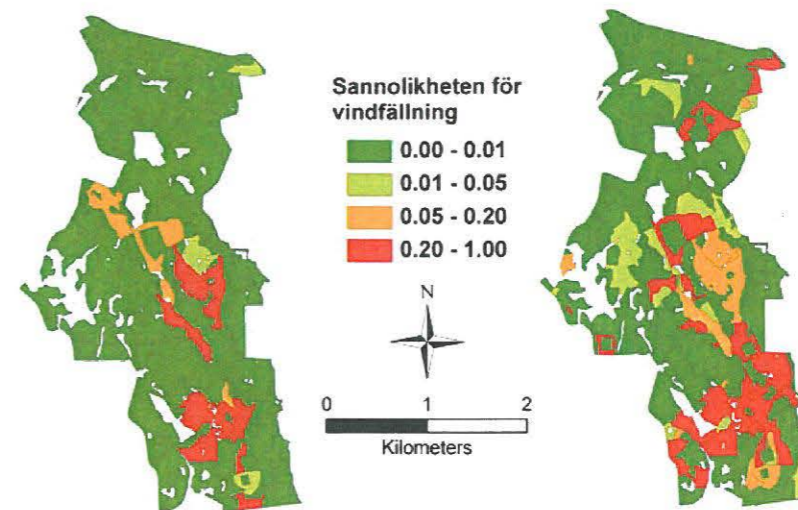
Då vindklimatet hölls oförändrat från perioden 1961-1990 erhöles signifikanta öknings av sannolikheten för vindfällning till följd av klimatförändringarna för de två utvärderingsperioderna 2011-2040 och 2071-2100 och för båda undersökningsområdena (Figurerna 17-20, Tabell 5).



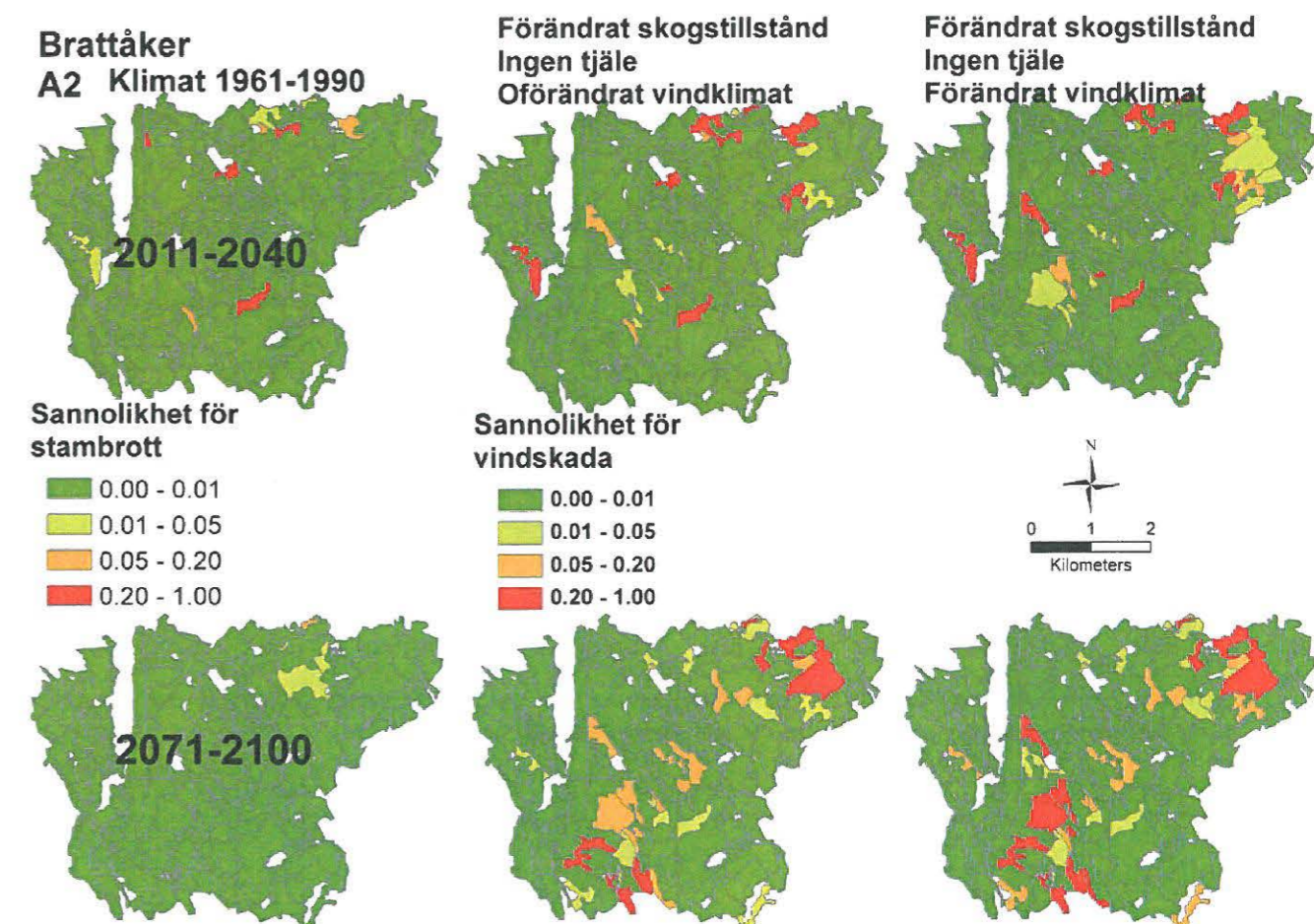
Figur 17. Beståndsvis sannolikhet för vindfällning för Asa aggregerad över 30 år för perioderna 2011–2040 och 2071–2100 under klimatet för perioden 1961–1990, under inverkan av A2-scenariot på skogens tillstånd men under vindklimat för perioden 1961–1990, samt under inverkan av A2-scenariot, inklusive vindklimatet, på skogens tillstånd.

Tabell 5. Signifikanta förändringar av sannolikheten för vindfällning vid oförändrat vindklimat samt inverkan av A2-scenariot på skogens tillväxt jämfört med ingen inverkan av klimatförändringarna på tillväxt.

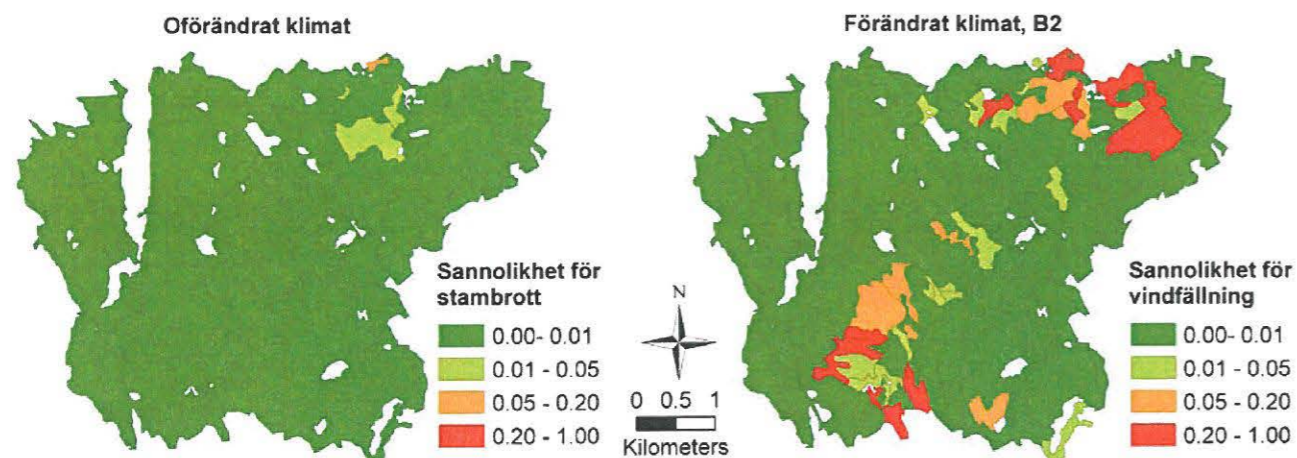
Period	2011–2040	2071–2100
Asa	ökning	ökning
Brattåker	ökning	ökning



Figur 18. Beståndsvis sannolikhet för vindfällning för Asa aggregerad över 30 år för perioden 2071–2100 under klimatet för perioden 1961–1990 (t.v.) och under inverkan av B2-scenariot, inklusive vindklimatet, på skogens tillstånd (t.h.).



Figur 19. Beståndsvis sannolikhet för vindfällning för Brattåker aggregerad över 30 år för perioderna 2011–2040 och 2071–2100 under klimatet för perioden 1961–1990, under inverkan av A2-scenariot på skogens tillstånd men under vindklimat för perioden 1961–1990, samt under inverkan av A2-scenariot, inklusive vindklimatet, på skogens tillstånd.



Figur 20. Beståndsvis sannolikhet för vindfällning för Brattåker aggregerad över 30 år för perioden 2071–2100 under klimatet för perioden 1961–1990 (t.v.) och under inverkan av B2-scenariot, inklusive vindklimatet, på skogens tillstånd (t.h.).

Då vindklimatet dessutom förändrades erhöles signifikanta ökningarna av sannolikheten för vindfällning till följd av klimatförändringarna och det applicerade skötselprogrammets inverkan på skogstillståndet (Tabell 6, Figurerna 17–20). Då beräkningarna baserades på den högsta beräknade sannolikheten för stambrott eller rotvälta för Brattåker också under oförändrat klimat, vilket gjordes för alla scenarier i Asa, blev effekterna av klimatförändringarna mindre.

Tabell 6. Förändringar av sannolikheten för vindfällning vid inverkan av förändrat klimat, inklusive vindklimatet, på skogens tillväxt och skötsel jämfört med ingen inverkan av klimatförändringarna på tillväxt och skötsel. (* = signifikant förändring, =ej testad)

Scenario	B2	A2	B2	A2
Period	2011–2040	2011–2040	2071–2100	2071–2100
Asa	-	ökning(*)	ökning(*)	ökning(*)
Brattåker	-	ökning(*)	ökning(*)	ökning(*)

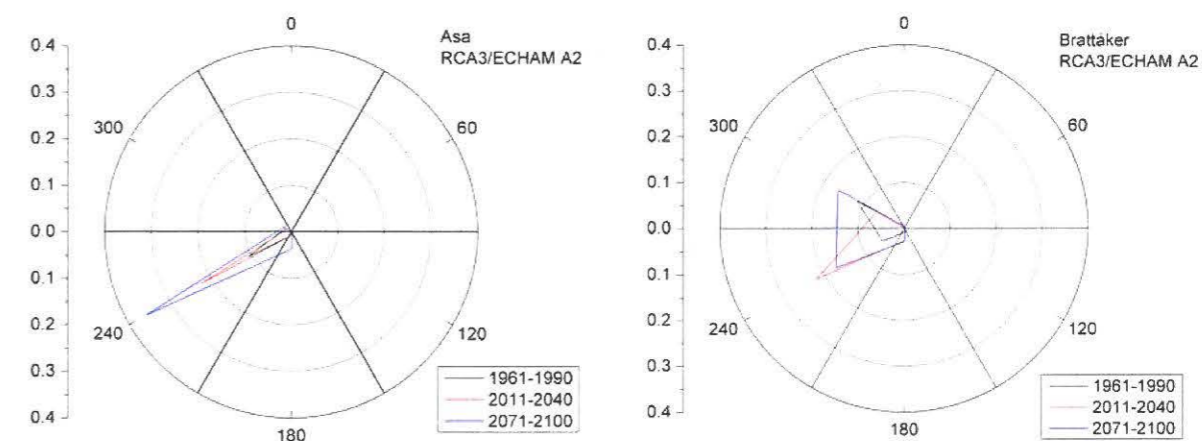
För Brattåker där både tall och gran förekom i stor omfattning erhöles signifikanta ökningarna av sannolikheten för vindfällning för båda trädslagen gran och tall under A2-scenariot och perioden 2071–2100 (Tabell 7).

Tabell 7. Signifikant förändring av sannolikheten för vindfällning (skogstillstånd och vindklimat förändrade) jämfört med ingen inverkan av klimatförändringarna.

Scenario	Period	A2
Brattåker, gran	2071–2100	ökning
Brattåker, tall	2071–2100	ökning

För samtliga undersökta simuleringar har klimatförändringens effekt på skogens tillväxt och på vindklimatet medfört signifikant ökad risk för vindfällning.

För både Asa och Brattåker kan de signifikanta ökningarna av sannolikheten för vindfällning under A2-scenariot delvis förklaras av ökande sannolikhet för starka vindar under simuleringssperioden (Figur 21) och delvis av förändrade skogstillstånd till följd av inverkan av klimatet och den tillämpade skötseln.



Figur 21. Sannolikheten för stark vind under A2-scenariot för sex olika vindriktningssektorer för tre olika avsnitt av simuleringssperioden och för respektive fallstudieområde. Som tröskelvärde för stark vind har använts en vindstyrka av 30 m/s på 850 hPa-nivån. Simulerade vindriktningar för 10 m över marken har använts.

Även om principerna för skötseln varit konstanta under simuleringssperioden har förändringarna i skogens tillstånd och dynamik medfört att t.ex. tidpunkt för olika åtgärder förändrats (Tabellerna 8–11, Figur 22). Detta är alltså effekter av att skötseln anpassats till den höjning av ståndortsindex som sker i simuleringarna.

Tabell 8. Förändringar i föryngringsavverkningsålder jämfört med under oförändrat klimat. – avser icke signifikant förändring.

Scenario	B2	A2	B2	A2
Period	2011–2040	2011–2040	2071–2100	2071–2100
Asa gran	–	–	–	-2.8 år
Brattåker gran	–	–	–	-2.0 år
Brattåker tall	–	–	–	–

Tabell 9. Förändringar i höjd vid föryngringsavverkning jämfört med under oförändrat klimat. – avser icke signifikant förändring.

Scenario	B2	A2	B2	A2
Period	2011–2040	2011–2040	2071–2100	2071–2100
Asa gran	–	–	+0.9 m	+1.9 m
Brattåker gran	–	–	+1.2 m	+1.7 m
Brattåker tall	–	–	+2.0 m	+2.8 m

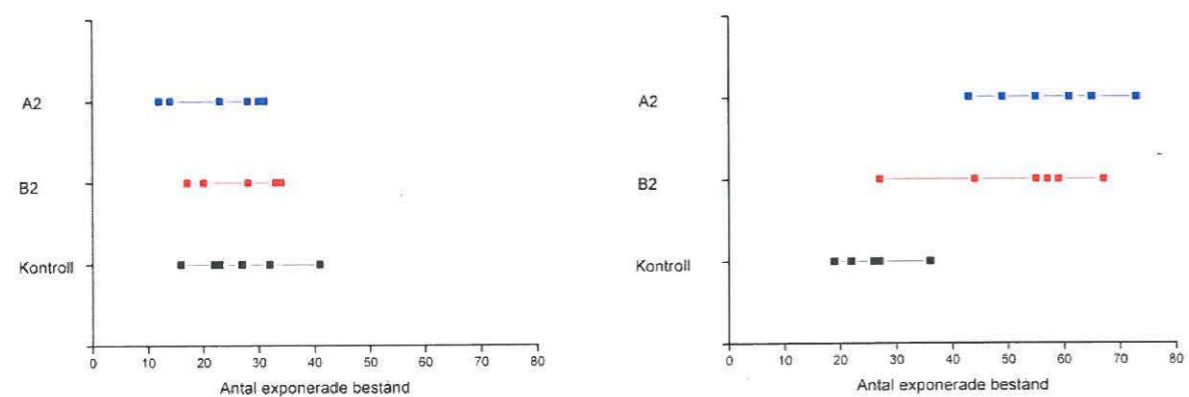
Tabell 10. Förändringar i brösthöjdsdiameter vid föryngringsavverkning jämfört med under oförändrat klimat. – avser icke signifikant förändring.

Scenario	B2	A2	B2	A2
Period	2011–2040	2011–2040	2071–2100	2071–2100
Asa gran	–	–	–	-0.7 cm
Brattåker gran	–	–	–	–
Brattåker tall	–	–	+1.4 cm	+2.6 cm

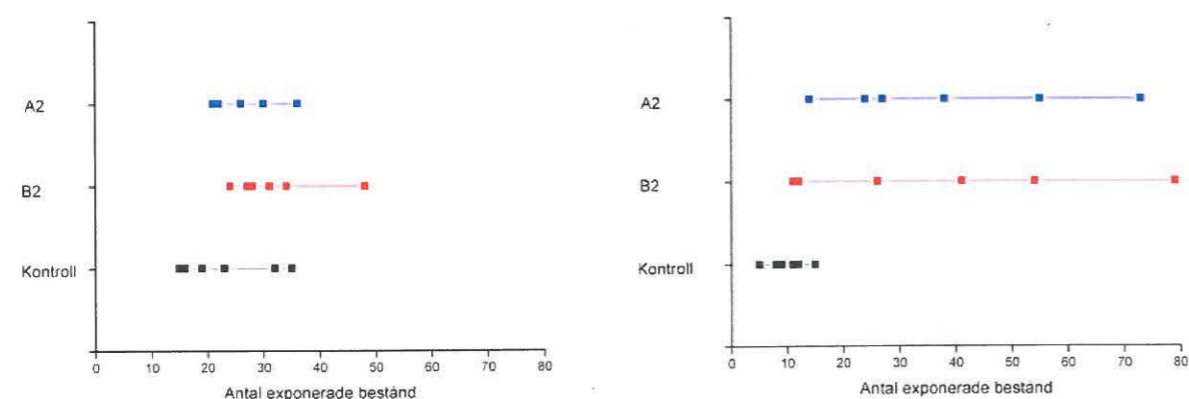
Tabell 11. Signifikanta förändringar i antal stammar/ha vid föryngringsavverkning jämfört med under oförändrat klimat.

Scenario	A2
Period	2071–2100
Asa gran	+10%
Brattåker gran	+26%
Brattåker tall	-10%

a.



b.



Figur 22. Antal exponerade bestånd under de analyserade perioderna 2011–2040 t.v. och 2071–2100 t.h. för de olika klimatscenerierna. a. Asa b. Brattåker.

Klimattrender

Ett antal samspelande faktorer inverkar på förekomsten av tjäle och gör denna svårbedömd (Tabell 12).

Tabell 12. Trender för klimatvariabler som inverkar på förekomsten av tjäle enligt klimatscenerierna baserade på RCA3-ECHAM4/OPYC3.

Klimatvariabel	Trend	Inverkan på tjäle
Vintertemperatur	Stigande i hela landet	Kortare tjälperiod
Vattentillgång vintertid (nederbörd minus avdunstning)	Ökande i hela landet	Mindre mäktighet av tjäle
Maximalt snödjup	Minskande i hela landet	Beroende på temperaturökningens storlek kan tjälens mäktighet öka om snötäcket tjocklek avtar.
Tunt snötäcke (0-10 cm)	Minskande antal dagar i Götaland och Svealand, ökande i Norrland	Förekomst av tunt snötäcke som indikator för tjälbildande förhållanden.

Vindklimat baserat på RCA3-ECHAM4/OPYC3 leder i riktning ökad sannolikhet för vindfällning (Tabell 13). En tidigare studie av vinddata modellerade med RCAO-modellen visade på skillnader beroende på vilken drivare som använts (Blennow & Olofsson, revision inskickad). För närvarande kan man inte säga vilka globala drivdata som ger de mest trovärdiga klimatscenerierna. Generellt var tendensen till ökande vindhastigheter större då resultat från ECHAM4/OPYC3-modellen använts som drivare jämfört med om resultat från HadAM3h-modellen använts. Förutom två olika drivare användes dessutom två utsläppsscenerier (B2 och A2) vilket gav totalt fyra scenarier för perioden 2071–2100 och två referensscenerier för perioden 1961–1990. Resultaten av analyserna visade att ett mönster med högre sannolikhet för höga vindstyrkor i södra Sverige jämfört med norra Sverige kvarstod. För sydligaste Sverige ökade sannolikheten för starka vindar i alla scenarier utom ett. För övriga undersökta platser spridda över Sverige antingen ökar sannolikheten för starka vindar eller snarare minskar den något beroende på vilka globala drivdata som använts. Men sannolikheten för vindfällning beror inte bara på vindens styrka, också vindriktningen är av betydelse. För de flesta undersökta platserna var sannolikheten för stark vind från västliga till sydvästliga riktningar fortsatt förhållandevis hög i scenarierna och sannolikheten för starka vindar från sydliga riktningar var på många håll högre än under dagens klimat. För sydligaste Sverige var sannolikheten för starka vindar från nordväst till sydöst högre i alla framtidsscenerier utom ett. Information om framtida vindriktningar kan användas för anpassningen av skogsbruket genom rumslig planering av avverkning och beaktande av topografins inflytande på vindexponeringen.

Tabell 13. Trender med avseende på framtida vindklimat.

Klimatvariabel	Trend
Sannolikhet för stark vind	Beroende på global drivare. Ökande sannolikhet kan inte uteslutas.
Byvind	RCA3-ECHAM4/OPYC3 indikerar viss ökning av byvindstyrka samt viss ökning av antalet dygn med byvindar överstigande 21 m/s i Götaland och Norrland.

Extrema nederbördsmängder indikeras öka i hela landet vilket skulle öka vindkänsligheten hos skogen (Tabell 14).

Tabell 14. Trend med avseende på extrem nederbörd.

Klimatvariabel	Trend
Max 7-dygns nederbörd	RCA3-ECHAM4/OPYC3 indikerar ökning i hela landet

Diskussion

Resultaten av beräkningarna för fallstudieområdena visar på en trend av ökande sannolikhet för vindfällning ((Figurerna 17–20, Tabellerna 5–11) som beror på utvecklingen av vindklimatet och på inverkan av klimatförändringarna på skogens tillstånd i kombination med skogsskötseln.

Tjälförhållanden

Observationer av förekomst och mäktighet av tjäle i svensk skogsmark tycks vara begränsad vilket bidrar till osäkerhet vad gäller antaganden rörande stabiliteten hos skogsbestånden. Osäkerheten är större för fallstudieområdet Brattåker än för Asa vilket gör det svårt att bedöma rimligheten i att anta marken i Brattåker tjälad under stormsäsongen (Figurerna 19 och 20). Om marken i stället hade antagits otjälad skulle effekten av klimatförändringarna på sannolikheten för vindfällning ha minskat. Om man använder förekomst av tunt snötäcke som proxy för tjälförekomst indikerar klimatscenerierna minskande antal dagar med tjälbildande förhållanden i Götaland och Svealand men ökande i Norrland (Tabell 12). Samtidigt ökar snödjupet i delar av Norrland vilket förväntas leda till minskande mäktighet av tjäle där. Tjälförekomsten kan dessutom förväntas bero på skogens täthet (Mellander med flera, 2006). I en tätare skog förväntas en större andel av snön återfinnas i trädkronorna jämfört med på marken vilket leder i riktning mera tjäle. Resultaten av simuleringarna visade på tätare skogar av gran (Tabell 11). Ökad användning av gran under skötsel enligt svensk jägmästartradition skulle därför kunna påverka tjälförhållandena i riktning mera tjäle. Resultaten för tall i Brattåker indikerade glesare bestånd vid föryngringsavverkning vilket skulle kunna bero på att ytterligare en gallring hinner göras innan föryngringsavverkning. Om äldre skogar blir glesare skulle detta leda i riktning mera snö på marken, mindre tjäle och därmed ökad vindkänslighet. Det är dock vanskligt att generalisera framtida gallringsförhållanden under skötsel enligt svensk jägmästartradition till andra delar av landet utan ytterligare studier.

Vindklimatet

Kalibreringsarbetet som gjorts i denna studie understryker det inledningsvis gjorda konstaterandet att det framtida vindklimatet är osäkert. I en tidigare jämförelse mellan observerad vindhastighet som länkats till den geostrofiska vinden och momentan vindhastighet varje sjätte timme på 850 hPa-nivån framtagen av Rosaby Centres, SMHI, med deras RCAO-modell, var skillnaderna mellan vindhastigheter för motsvarande 99-percentiler försumbara (Blennow & Olofsson, revision inskickad). En jämförelse mellan observationsdata och data framtagna med RCA3-modellen visade på större skillnader som inte kunde försummas varför en kalibreringsfaktor togs fram för respektive fallstudieområde. Den årliga sannolikheten för att överskrida den geostrofiska vindhastigheten 30 m/s för Asa beräknades till 0.36 med RCA3-ECHAM4/OPYC3-modellerat vindklimat efter kalibrering för A2-scenariot och perioden 2071–2100 (Figur 21) och till 0.70 med motsvarande scenario och samma period beräknat med RCAO-ECHAM4/OPYC3 (Blennow & Olofsson, revision inskickad). Åtminstone för Asa kvarstår alltså en skillnad efter kalibrering mellan vindklimatscenerierna beroende på om RCAO- eller RCA3-modellen använts. Skillnaderna bidrar till osäkerhet vad gäller beräknade sannolikheter för vindfällning i absoluta termer. Det är dessutom vanskligt att jämföra beräknade sannolikheter för vindfällning i absoluta termer mellan fallstudieområdena eftersom RCA3-ECHAM4OPCY3 och RCA3-ERA40 scenerierna för överlappande perioder skiljde sig olika mycket åt för de två undersökningsområdena. De redovisade resultaten baseras på att kalibreringsfaktorer använts för att kompensera för dessa skillnader men osäkerhet kvarstår. Osäkerheten framstår som mindre vad gäller trenden i utvecklingen av vindklimatet så länge man håller sig till samma plats och till samma drivare. Även om klimatscenerierna inte ger en entydig bild av framtida vindstyrkor över Sverige kan det inte uteslutas att det blir blåsigare framöver, särskilt inte i sydligaste Sverige.

Trädslag

Även om vindkänsligheten påverkas av skötseln kan generellt sägas att vindkänsligheten i modellen ökar från björk, tall till gran. Detta antagande stöds bl.a. av erfarenheterna från januaristormen 2005 då de uppkomna skadorna per volymsandel var mest omfattande i gran och minst i lövdominerade bestånd (Skogsstyrelsen, 2006; Sallnäs med flera, pågående). De generellt sett högre beräknade sannolikheterna för vindfällning för Asa jämfört med Brattåker (Figurerna 17–20) förklaras bl.a. av skillnader i vindklimat och i skogens tillstånd, exempelvis en högre andel granbestånd i Asa.

Skötsel

Framtida skogstillstånd beror både på hur klimatet utvecklas och på hur vi sköter skogen. Vi valde i simuleringarna att efterlikna skötsel enligt svensk jägmästartradition. Det initiala skogstillståndet hade emellertid genererats av den historiska skötseln. När vi i simuleringarna applicerade skötselprogrammen gav detta upphov till skeva åldersklassfördelningar (Figur 16). Dessutom uppkom skillnader mellan åldersklassfördelningarna för olika klimatscenerier under simuleringensperioden. Under början av den första utvärderingsperioden (år 2011) hade åldersklassfördelningarna för respektive undersökningsområde påverkats endast i mindre omfattning av klimatförändringarna genom den applicerade skötseln samtidigt som skillnaden i beräknad sannolikhet för vindfällning var signifikant högre för A2-scenariot än för referensscenariot (1961–1990) (Tabell 6). Detta indikerade att skötseln så som den specificerats ledde i riktning ökad vindkänslighet. Ökningen uppkom trots att omloppstiden i någon mån sjönk mot slutet av simuleringensperioden (Tabell 8). Den ökade vindkänsligheten förklaras delvis av ett förändrat höjd-diameterförhållande men också av ett ökande antal vindexponerade bestånd under förhållanden med förändrat klimat (Tabellerna 9–11).

Slutsatser

Det i simuleringarna specificerade sättet att sköta skogen förefaller leda i riktning ökad vindkänslighet. Ett blåsigare vindklimat indikeras härutöver leda i riktning ökad sannolikhet för vindfällning för klimatscenarier baserade på modellerna RCA3- ECHAM4/OPYC3. Det framtida vindklimatet är dock osäkert. Minskad förekomst av tjäle förväntas leda i riktning ökad vindkänslighet. Förekomsten av tjäle i skogsmark är dock osäker, särskilt i Norrland. Indikerade ökande extrema nederbörds mängder i hela landet under stormsäsongen förväntas leda i riktning ökad vindkänslighet. Det finns stora möjligheter att påverka risken för vindfällning genom trädslagsval och genom hur vi sköter skogen. En rimlig konsekvens av detta är att närmare utreda vilken förändring av skogsskötseln som eventuellt är motiverad.

Klimatförändringar kommer att påverka skogsbrukets ekonomi

Drivmotorn för ekonomin i skogen är tillväxten och förändras tillväxthastigheten, till följd av klimatförändringar, påverkas även skötseln och möjligheterna att bedriva ett ekonomiskt skogsbruk. I nedanstående Tabell 15 bedömer man effekterna av en klimatförändring på skogen. Om man tillåts att gå utanför de vetenskapliga ramarna kan man spekulera hur effekterna kan påverka ekonomin, där vissa förväntas få en betydande inverkan på ekonomin medan andra förväntas bli mer marginella. Enligt Tabellen ökar produktionspotentialen i hela Sverige och om man summerar figur 6 (B2-alternativet), innebär det att den årliga tillväxten av stamved potentiellt skulle öka från dagens nivå på 100 miljoner m³ per år till mer än 120 miljoner år 2085. En ökad tillväxtpotential på ca 20 miljoner m³ per år motsvarar flera miljarder kronor om man lyckas utnyttja den. Trädslagsdiversitet behöver inte ha någon direkt betydelse för ekonomin om man inte byter trädslag i stor skala. Om man blev tvungen att byta ut granen i södra Sverige skulle det sannolikt ha negativa effekter på ekonomin, samtidigt som ett ökat användande av gran i norra Sverige skulle kunna ha en positiv effekt på ekonomin.

Om vindfällningarna ökar kommer det ha negativa effekter på ekonomin eftersom det är kostsamt att ta hand om stormfällt virke och kvaliteten försämras dels p.g.a. sprickor, spjälkning och brutna stockar och dels för att virket kan bli angripet av röta och insekter. Dessutom blåser det ner alltför tidigt under omloppstiden och man utnyttjar inte produktionspotentialen fullt ut. Skogstyrelsen anger att den samhällsekonomiska kostnaden för Gudrun blev 11–12 miljarder kronor (Skogstyrelsen, 2006). Stormfällningar är betydligt vanligare i södra Sverige men anpassningar av granskogsskötseln eller byte av trädslag kan påverka stormrisken avsevärt.

Tabell 15. Bedömda effekter av en klimatförändring på skogsproduktivitet och hälsa i ett 20–100 års perspektiv. + = ökning, - = minskning. Översatt från Sonesson et al., 2004.

Förändring i	södra Sverige	centrala Sverige	norra Sverige
Trädslagsdiversitet	++	+++	+
Skogsproduktion	+++	+++	+++
Skador orsakade av:			
Vind	+	+	+
Snö	-	-	-
Brand	+	+	±
Vårfrost	±	±	±
Hösfrost	-	-	-
Vintertorka	+	±	±
'Hardwood decline'	+	+	±
Torka	++	+	±
Vattensjuk mark	±	±	+
Ryggradslösa djur	+	+	+
Ryggradsdjur	±	+	+
Mikroorganismer och svampar	±	±	±
Markvegetation	+	+	+

Mängden snö kommer att minska och varaktigheten då skogsmarken är täckt av snö kommer att förkortas. Detta kommer i sig inte ha någon direkt påverkan på ekonomin. Avverkningarna utförs dock till stor del under vinterhalvåret då marken är tjälad och marken bär och vid sådana markförhållanden orsakar inte skogsmaskiner några körskador. Det kommer med andra ord bli svårare att avverka under vintern och få ut virket ur skogen. Detta kan ge negativa effekter på ekonomin om det inte kan lösas genom planering och att man avverkar under andra delar av året än vintern.

Brandrisken förväntas öka enligt tabell 15, vilket måste anses ha en negativ inverkan i ekonomiska termer. Störst brandrisk har vi under varma och torra somrar, vilket förutspås öka i SMHIs scenarier, i framför allt Sveriges sydöstra delar. I ett historiskt och globalt perspektiv är det tydligt att skötta skogar där man bedriver ett aktivt skogsbruk brandhärjas mindre frekvent.

Frekvensen av vårfrost och höstfrost förväntas vara den samma eller minska. Vårfrost i planteringar kan orsaka att skotten dör om frosterna inträffar i samband med skottskjutningen på våren. Detta tar vanligtvis inte död på plantorna eller de unga träden om det inte inträffar flera år i följd. Man bör tänka sig för i framtiden vad man väljer för något plantmaterial men det behöver vi inte bry oss om i någon större utsträckning idag. Vår- och höstfroster kommer inte ha någon signifikant negativ inverkan på ekonomin om vårfrosterna förväntas vara detsamma eller minska.

Svår torka under sommaren kan orsaka barr- och bladförluster och ge kraftiga produktionsnedsättningar ett antal år efter. Om det inträffar flera år efter varandra kan trädets vitalitet nedsättas och i slutändan även orsaka att träden dör. Försämrade vitalitet kan minska motståndskraften mot skadegörare som insekter och mikroorganismer. Om vi får varmare med mycket torra somrar kan det ge betydande produktionsförluster i framför allt södra Sverige.

”Hardwood decline”, skulle ungefärligen kunna översättas till diffusa lövträdssyndrom. Dessa kan öka med ett förändrat klimat, men kunskapen om vad som orsakar dem är bristfällig. Lövträden står idag för en mycket liten del av den årliga tillväxten och den stående skogen i Sverige och produktionsnedsättande effekter på lövträd har i dagsläget marginell betydelse för ekonomin i skogsbruket. Mot bakgrund av klimatförändringarna skulle däremot lövträdsandelen kunna öka i framför allt södra Sverige. Det behöver därför forskas betydligt mera framöver kring de bakomliggande orsakerna till olika lövträdssyndrom.

Vattensjuk mark eller försumpning förväntas öka i norra Sverige och skulle kunna ha en negativ inverkan på produktion, där nederbördsökningen förväntas vara störst enligt SMHIs scenarier. De negativa produktionseffekterna kommer sannolikt att bli störst på friska marktyper med finare textur än sand. Områden i skogslandskapet där avrinning hämmas eller förhindras av topografien är de som ligger främst i riskzonen för försumpning. En ökad temperatur och avdunstning kan motverka försumpningseffekten. Nederbördsökningen sker dock i huvudsak under höst-vinter-vår men minskar under sommaren. Under vintern är trädets upptag av vatten minimal och påverkar inte vattenöverskottet nämnvärt och en nederbördsökning enligt SMHI's scenarier borde öka avrinningen från skogsmark av samma storlek. Skötselåtgärder för att motverka försumpning och produktionsförluster som dikning bör diskuteras men är kontroversiellt i dagsläget. Försumpning kan regionalt ge ekonomiska förluster för skogsbruket i norra Sverige. För att studera detta borde verkliga

fallstudieområden i landskapet väljas ut, där man tar hänsyn till topografi, markanvändning, beståndsstruktur mm.

Om klimatet ändras, t.ex. genom att temperaturen ökar, kommer antagligen insektangreppen att öka i skogen. Förutom mer problem med redan kända skadegörare finns en risk att nya dyker upp. Det saknas kunskaper om vad det är som styr populationsdynamiken hos de flesta arter och om man ska kunna förutsäga framtida problem i samband med t.ex. en förhöjd temperatur måste vi lära oss mer om skadeinsekters ekologi. Snytbaggen är den skadeinsekt som angriper barrplanteringar och orsakar idag de största förlusterna i ekonomiska termer och problemen är större i södra Sverige jämfört med norra. Om man inte fick använda dagens insekticid mot snytbagge, har man uppskattat kostnaden till 550 miljoner per år. Ökade problem norröver är sannolikt att vänta med ett varmare klimat. Barkborrar är annan betydande grupp skadegörare som påverkar bland annat virkeskvaliteten. En tredje grupp skadeinsekter är blad- och barrätande insekter (tallmätaren och tallstekeln) där barrförluster kan ge tillväxsförluster. Ökande problem med skadeinsekter, särskilt i kombination med ökande stormfällningar och sommartorka, kan ge stora ekonomiska förluster i framtiden.

Få försök till kvantifiering har emellertid gjorts. Ett undantag är Anna-Marie Jönsson som publicerat en beräkning av hur granbarkborren kan tänkas påverkas av en klimatförändring (Jönsson, 2004), där man har utgått från Rossby Centres regionala klimatscenarioer baserade på RCAO modellen och Hadley Centre's GCM under utsläppsscenarioerna B2- och A2. Genom att simulera klimatförändringarna i en modell för barkborrens ekologi har hon lyckats prognostisera hur borrharnas benägenhet eller möjlighet att genomföra en sensommar-svärmning under olika scenarier. Beräkningarna har gjorts för två olika lokaler i Götaland; Växjö och Ljungbyhed och resultaten kan sammanfattas i Tabell 16. Jönsson drar slutsatsen ”Det finns all anledning till att tro att ökad frekvens av sensommarsvärmningar kommer att öka risken för angrepp på levande träd.”

Tabell 16. Antal tillfällen under en 30-årsperiod som barkborren kan förväntas genomföra en sensommarsvärmning under olika scenarier.

	Dagens klimat	Hadley A2-scenario	Hadley B2-scenario
Ljungbyhed	1-4	30	26-28
Växjö	1-4	30	20-23

Varmare väder påverkar på olika vis de svamporganismer, som angriper våra skogsträd både direkt och indirekt. Svampar vars spridning gynnas av mildt väder kan förutsättas att öka i betydelse om klimatet blir varmare som t.ex. rotröta. Rotrötan påverkar i första hand trädets kvalitet i rotstocken. Idag är problemen med rotröta störst i södra Sverige, framför på västsidan där nederbörden är högre. Svampar som angriper trädet under vintern kan medföra antingen ökade eller minskade angrepp beroende på trädets hårdighet under vintervilan. Varm vinter tycks hittills ha underlättat angrepp, medan torr sommar kan motverka angrepp av t.ex. Gremmeniella. Betydande barrförluster leder till minskad produktion och är omfattningen mycket hög kan det leda till att skogen dör. Tallsytte, är ytterligare ett exempel på en patogen som utvecklas under trädets viloperiod. Svampar som gynnas av att värdträdet utsätts för stress, t.ex. extremt torrt väder kan bli allvarigare som exempelvis honungsskivlingar representerar denna svamptyp. Exempel på skadetyper är grantorka och ekdöd. Skador och nedsatt tillväxt orsakade av svampskadegörare på skog kan ha en stor negativ effekt på ekonomin inom skogsbruket men i likhet med skadeinsekter vet man mycket lite inom området och omfattning vid ett förändrat klimat är mycket osäker.

Bland ryggradsdjur finns det flera vanliga arter som påverkar skogsekosystemet och som dessutom kan orsaka skador på ekonomiskt viktiga trädslag och i övrigt ha oönskade effekter. De väsentligaste arterna ur dessa perspektiv är älg, kronhjort, dovhjort, rådjur, vildsvin och harar. De ekonomiskt viktiga trädarterna som i första hand påverkas av viltet är tall och flera lövträdsarter (björk och ädla lövträd). Flera arter har sin naturliga nordgräns ungefär vid norrlandsgränsen. Dessutom anses rådjur leva på marginalen i stora delar av Norrland. En förändring av klimatet enligt Rosaby Centre's scenarier kommer sannolikt att medföra ökade utbredningsområden för nämnda arter, vilket i sin tur bl.a. påverkar storskaliga skademönster. Förändringar i t.ex. växtsäsongens längd, trädslagsblandning, tillväxthastighet och omloppstiden i skogen kommer att ge en annan fodersituation, med konsekvenser för viltets populationsdynamik. Generellt skulle det ge en förbättrad födotillgång och därmed påverka populationsdynamiken och reproduktionen. Ökande viltstammar innebär ökat problem med negativa ekonomiska konsekvenser.

Markvegetationen kommer att påverkas vid ett varmare klimat med förlängd vegetationsperiod och ökad tillgång på växtnäringsämnen i marken. Markvegetationen konkurrerar med plantorna och kan orsaka plantdöd om man inte anpassar markberedningsmetod, planteringstidpunkt och eventuell herbicidbehandling. Ökad markvegetation vid ett förändrat klimat kan man sannolikt hantera med anpassning av föryngringsarbete som kan medföra ökade kostnader för skogsbruket. Sammantaget har det en liten inverkan på ekonomin.

Om man skulle våga sig på konststycket att rangordna de ekonomiska effekterna av förändrad produktion och risken för stormfällningar, produktionsförluster, skadeangrepp och andra olägenheter som klimatförändringarna kan innebära skulle det kunna sammanfattas som i Tabell 17.

Tabell 17. Uppskattning av de ekonomiska effekterna vid ett förändrat klimat.

Förändring av	Positivt för ekonomin	Negativt för ekonomin	Forskningsbarhet
Skogsproduktion	> 2 miljarder per år		Hög: bra kunskaper, prioriterat
Trädslagsdiversitet	1-100 miljoner per år		Måttlig: omvärldsfaktorer styr trädslagsval
Stormfällningar		miljoner till miljarder per stormtillfälle	Hög: bra kunskaper, prioriterat
Snöförhållanden		< 100 miljoner i fördyrande omständigheter per år	Låg: lämpar sig för uppskattning - planering
Skogsbränder		0.1-200 miljoner per brandtillfälle	Låg: lämpar sig för uppskattning - planering
Frost		1-100 miljoner per år	Måttlig: stora osäkerheter och svårt att analysera
Torka		10-500 miljoner per extremt torrår	Måttlig: stora osäkerheter och svårt att analysera
Sjukdomar på lövträd		< 10 miljoner per år	Hög: har dock liten effekt på ekonomin
Skadeinsekter		10-500 miljoner per år	Hög: dåliga kunskaper, högprioriterat
Svampar och patogener		10-500 miljoner per år	Hög: dåliga kunskaper, högprioriterat
Viltskador		10-200 miljoner per år	Hög: dåliga kunskaper, prioriterat
Vattensjuk mark		1-100 miljoner per år	Måttlig: jämförelse mellan markfuktighetsklasser
Markvegetation		1-100 miljoner per år	Låg: lämpar sig för uppskattning - planering

Den stora och enda positiva ekonomiska effekten av klimatförändringarna är den ökade produktionspotentialen medan riskerna för skadeverkningar är många och mycket svåra att kvantifiera. Osäkerheterna är stora inom de flesta områdena när det gäller hur klimatförändringarna kan komma att påverka den svenska skogen. Det finns dock mycket som är forskningsbart och där vi kan förbättra vår kunskap avsevärt och förmåga att förutsäga hur skogen kommer att påverkas i framtiden. Det är både forskarsamhällets och de politiska beslutsfattarnas uppgift att skapa en plattform och beredskap inför kommande klimatförändringar.

Forskningsbehov

Idag arbetar man med flera olika modeller som lämpar sig för simuleringar på regional- och beståndsnivå för att skatta produktionspotentialen vid ett förändrat klimat. Dessa är delvis parameteriserade med data från fältförsök i Sverige med ökad temperatur och koldioxidhalt. Vidareutveckling av modellerna/simuleringarna skulle dock vara till stort gagn när det gäller att inkludera näringsdynamiken i marken, skogsskötseln, olika markfuktighetsförhållanden och extrema väderhändelser.

En ökad temperatur kommer att påverka näringsdynamiken i marken och är sannolikt en nyckelfaktor när man försöker förutsäga hur produktionen förändras i ett förändrat klimat. Av ekonomiska skäl finns bara ett markkoppvärmningsförsök (gran) i Sverige som visar på anmärkningsvärda produktionseffekter. Däremot vet vi inte ifall produktionsökningen är långsiktigt bestående eller om de är generaliserbara för andra trädslag än gran. Att starta upp flera liknande experiment med olika trädslag med geografisk spridning vore högst önskvärt.

Effekterna av en ökad koldioxidhalt på fotosyntesen/produktionen skiljer sig mellan olika fältexperiment. I det enda fältexperiment i Sverige på skog (Flakaliden i Västerbotten), har man har inneslutit hela träd i kammare. Resultat från försöket visar att en förhöjd koldioxidhalt har i stort sett ingen effekt på fotosyntesen/produktionen vid låg tillgång på växtnäring. Fältexperiment utanför Sveriges gränser visar på en tillväxtökning på 10-40% vid en förhöjd koldioxidhalt. Nya FACE-experiment (Free Air Carbon dioxide Enrichment), där man behandlar hela bestånd är därför högprioriterat, dels för att behandla ett stort antal träd och flera olika trädslag och dels för att slippa en eventuella "kammareffekter".

När det gäller riskfaktorer låter dessa sig bäst fångas i ett bottom-up perspektiv, det vill säga genom uppskalning från studier i lokal skala. Idag finns sådana studier över sannolikheten för vindfällning gjorda för ytterst få platser. Detta gör det svårt att skala upp resultaten till andra delar av landet. Ytterligare fallstudier skulle därför behöva göras. Befintliga modellverktyg behöver å-jour-hållas tekniskt sett och dessutom vidareutvecklas, exempelvis skulle det vara angeläget att inkorporera effekter av vindbyar och turbulens i WINDA-modellen, att parameterisera modellen utifrån svenska fältförsök och för ytterligare trädslag, och att möjliggöra prediktion av omfattningen av skada. Förekomst av tjäle i svensk skogsmark idag och i framtiden och dess inverkan på trädens stabilitet är dåligt känt vilket behöver åtgärdas. Bättre kunskap behövs dessutom om trädens stabilitet under olika markfuktighetsförhållanden. Vindskador på icke vindfällda träd har rapporterats. Det behövs forskning för att undersöka omfattningen av produktionsnedsättningar som detta kan leda till och hur skadorna kan minskas. Det vore önskvärt med säkrare vindklimatscenarier.

Skadeangreppen från insekter, svamp och vilt inom skogsbruket kommer sannolikt att öka och utgör ett stort ekonomiskt hot för skogsbruket. Det räcker dock inte att studera specifika skadegörare utan även samspelen mellan värdväxt och naturliga fiender. Huruvida skadegörare kan förflyttas norrut och om nya arter kan introduceras i södra Sverige från kontinenten kan också ha stor inverkan för skogsbruket i Sverige. I dagsläget har vi mycket bristfälliga kunskaper om skadeangreppen från insekter, svamp och vilt och forskning är mycket angeläget inom dessa områden. På sikt bör verktyg tas fram för att kunna beräkna sannolikhet för skada.

Generellt kan sägas att vi idag med begränsad precision kan förutsäga eller i alla fall spekulera kring hur en klimatiförändring skulle kunna påverka enskilda komponenter i det komplexa systemet skog-skogsbruk. Vi har däremot en mycket begränsad kunskap om vilka

effekter det kan tänkas bli på systemet som sådant och på balansen mellan de olika komponenterna. Effekterna kommer i alla skalor, det är naturligtvis inte bara de svenska skogarna som kommer att påverkas utan också skogarna på andra håll i världen. Detta i sin tur kan komma att förändra handelsströmmar, konkurrensförhållanden m.m. vilket förändrar påverkan på de svenska skogarna genom mänskliga aktiviteter.

Det är mycket stora osäkerheter i analyserna av tänkbara effekter av klimatiförändringarna. Osäkerheten i sig behöver vara en del i det underlag som behövs för att idag och den närmsta framtiden fatta beslut om eventuella anpassningsåtgärder. En utökad forskning om hur välavvägda beslut kan fattas i en sådan situation framstår därvid som angelägen.

Det behövs forskning för att anpassa skogsbruket till ett förändrat klimat, exempelvis baseras val av tidpunkt för skötselåtgärder ofta på empiriska modeller. Eftersom klimatet förändras behöver sannolikt modellerna modifieras eller bytas ut.

Tack

Rosby Centre, SMHI, tackas för tillhandahållande av klimatscenariodata. Erik Kjellström, Rosby Centre, SMHI, tackas för konstruktiv diskussion vad gäller kalibrering av vindklimatscenariodata. Arbetet bakom rapporten har finansierats av FORMAS., Lämsförsäkringar samt Klimat-och sårbarhetsutredningen.

Referenser

- Alexandersson, H., & Vedin, H., 2002. Stormar det mera nu? SMHI. Väder och Vatten, 10:18.
- Alexandersson, H., & Edquist, E., 2006. Klimat i förändring. En jämförelse av temperatur och nederbörd 1991–2005 med 1961–1990. Faktablad nr 29. SMHI, Norrköping.
- Andersson, M., Dahlin, B., Mossberg, M., 2005. The Forest Time Machine – a multi-purpose forest management decision-support system. *Comput. Electron. Agr.* 49, 114–128.
- Anonym., 1985. Gallringsmallar, Södra Sverige. National Board of Forestry, Jönköping, 35 sidor.
- Anonym., 2005. Beredningsplan för bruk ved omfattande stormskador. Norges Skogeierforbund og Skogsbrand, Report June 2005.
- Bergh J., McMurtrie R.E. & Linder S. 1998. Climatic factors controlling the productivity of Norway spruce: a model-based analysis. *Forest Ecology and Management* 110: 127-139.
- Bergh, J., et al. 2003. Modelling the short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries. *Forest Ecology and Management* 183: 327-340.
- Bergh, J., Freeman, M., Räisänen, J. 2006. Effects of global change on net primary production in Scandinavia – a model based analysis on regional climate scenarios. *Global Change Biology* (in press).
- Blennow, K. & Olofsson, E., 2004. Kan man undvika stormskador? I K. Blennow (red.). Osäkerhet och aktiv riskhantering – aspekter på osäkerhet och risk i sydsvenskt skogsbruk. ISBN 91-576-6643-1 SUFOR www.sufor.nu. Sidorna 38–43.
- Blennow, K. & Olofsson, E. The probability of wind damage in forestry under a changed wind climate. *Climatic Change*. (revision insänd).
- Blennow, K., Sallnäs, O., 2004. WINDA – a system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape. *Ecol. Model.* 175(1), 87–99.
- Blennow, K. Eriksson, H. 2006. Riskhantering i skogsbruket. Skogsstyrelsen, Rapport 14. 51 sidor.
- Blennow, K., Olofsson, E., Sallnäs, O., 2003. Evaluating WINDA – a tool for assessing the probability of wind damage to forest stands. In: Ruck, B., Kottmeier, C., Mattheck, C., Quine, C., Wilhelm, G. (Eds.), *Wind Effects on Trees*. University of Karlsruhe, Germany, pp. 137–144.
- Bärring, L., & von Storch, H., 2004. Scandinavian storminess since about 1800, *Geophysical Research Letters*, 31.
- Ekö, P.M., 1985. En produktionsmodell för skog i Sverige, baserad på bestånd från riksskogstaxeringens provytor. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture, Umeå, Report 16, 224 pp. "(In Swedish, with English summary)".
- Gardiner, B., Peltola, H., Kellomäki, S., 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecol. Model.* 129, 1–23.
- Gumbel, E.J., 1958. *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, 375 pp.
- Gardiner, B.A., Marshall, B., Achim, A., Belcher, R., & Wood, C., 2005. The stability of different silvicultural systems: a wind tunnel investigation. *Forestry*, 78:471–484.
- Holmberg, L.-E., 2005. Sammanställning av stormskador på skog i Sverige under de senaste 210 åren. Rapport No. 9. Skogsvårdstyrelsen. 14 sidor.
- Jönsson, A-M., 2004. Klimatet och risken för angrepp av granbarkborre. I Blennow(ed.) *Osäkerhet och aktiv riskhantering – aspekter på osäkerhet och risk i sydsvenskt skogsbruk*. SU
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén, & Wyser, K. 2006. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rosby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). SMHI Reports in Meteorology and Climatology, No. 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sverige. 54 sidor.
- Kristensen, L. Rathmann, O., and Hansen, S.O., 2000. Extreme winds in Denmark. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 87, 147–166.
- Lindström, G., & Alexandersson, H., 2004. Recent mild and wet years in relation to long observation records and future climate change in Sweden. *Ambio*, 33:183–186.
- Lindström, G., Bishop, K., & Ottosson Löfvenius, 2002. Soil frost and runoff at Svartberget, northern Sweden—measurements and model analysis. *Hydrol. Process.* 16, 3379–3392.
- Mellander P.-E, Laudon H., Bishop K., 2005. Modelling variability of snow depths and soil temperatures in Scots pine stands *Agricultural and Forest Meteorology*, 133: 109-118.
- Morse, A.P., Gardiner, B.A. & Marshall, B.J., 2002. Mechanisms controlling turbulence development across a forest edge. *Boundary-Layer Meteorology*, 103:227–251.

- Mortensen, N. G., Landberg, L., Troen, I. & Petersen, E. L., 1998. Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP). Risø National Laboratory, Roskilde, Danmark.
- Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.), 2000. Emission Scenarios. Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK, 570 pp.
- Nielsen, C.N., 2003. Adaptive physiology and tree management. KVL, Köpenhamn, Danmark. 140 sidor.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H., Ikonen, V.P., 1999. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.* 29, 647–661.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., & Granander, M., 2000. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, 135:143–153.
- Persson, P., 1975. Stormskador på skog – Uppkomstbetingelser och inverkan på skogliga åtgärder. Royal College of Forestry, Department of Forest Yield Research, Research Notes 36, 294 sidor.
- Rummukainen, M., Bergström, S., Persson, G., Rodhe, J., Tjernström, M., 2004. The Swedish Regional Climate Modelling Programme, SWECLIM: a review. *Ambio* 33, 176–182.
- Räisänen, J., Hansson, A., Ullerstig, R., Döscher, L., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P., Willén, U., 2004. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Clim. Dynam.* 22, 13–31.
- Sallnäs, O., Blennow, K., Andersson, M., pågående. Factors explaining the distribution of wind damage in southern Sweden after a storm in 2005.
- Savill, P.S., 1983. Silviculture in windy climates. *For. Abs.* 44(8), 473–488.
- Schelhaas, M-J., Nabuurs, G.J., Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Glob. Change Biol.* 9, 1620-1633.
- Skogsstyrelsen, 2006. Stormen 2005 – en skoglig analys. Meddelande No. 1. Skogsstyrelsen, Jönköping.
- UNECE/FAO., 2000. Effects of the December 1999 storms on European timber markets. Forest products and market review. Economic Commission for Europe, Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 23–37.
- Venäläinen A, Tuomenvirta H, Heikinheimo M, Kellomäki S, Peltola H, Strandman H, Väisänen H., 2001. Impact of climate change on soil frost under snow cover in a forested landscape. *Climate Research*, 17: 63–72.

Appendix 1

Regionala klimatscenarier

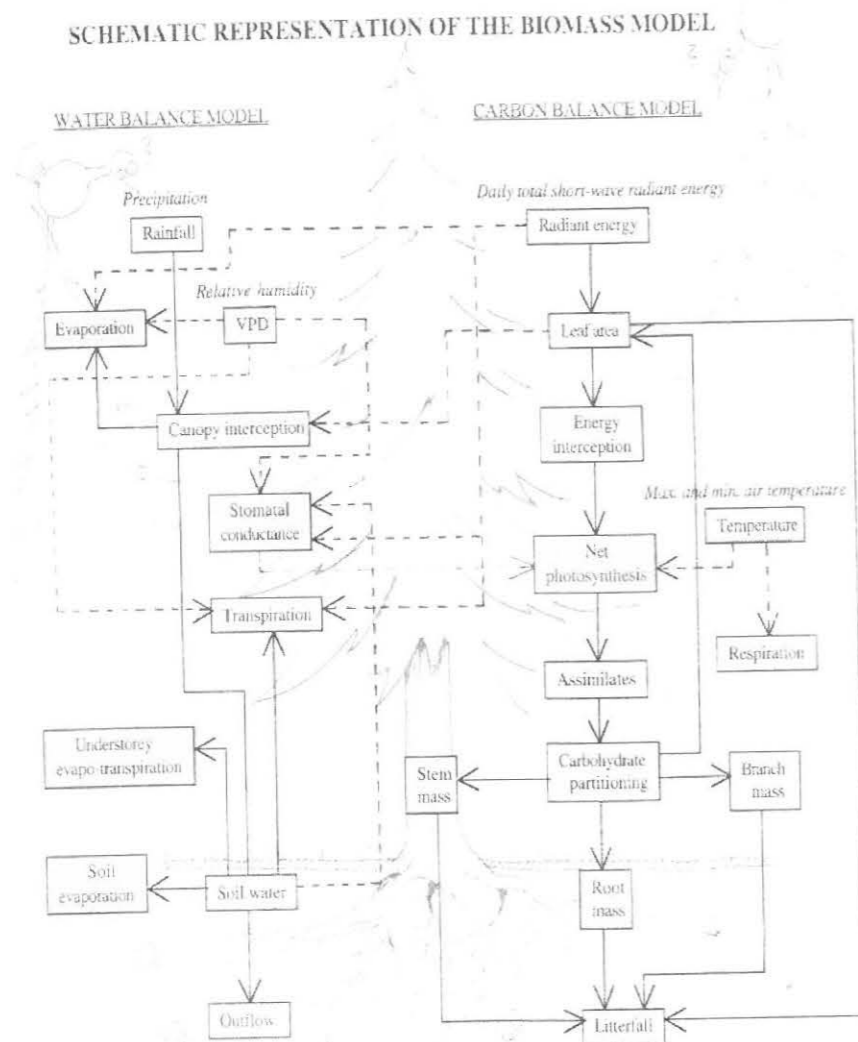
Med hjälp av generella cirkulationsmodeller (GCM) tas fram globala scenarier för hur det framtida klimatet kan komma att utvecklas. Ett scenario kan definieras som en konsistent beskrivning av hur framtiden kan komma att se ut (Porter, 1985 i Rodgers, 2001). Ett scenario utgör alltså inte någon prognos utan en beskrivning av en möjlig utveckling givet vissa antaganden. Den rumsliga upplösningen i ett klimatscenario kan ökas över en viss region genom nedskalning där ett globalt klimatscenario används som drivdata.

För senaste generationens dynamiska regionala klimatscenarier som tagits fram vid Rosby Centre vid SMHI med deras regionala klimatmodell RCA3 har man använt sig av globala drivdata vid beräkningarna framtagna med den generella cirkulationsmodellen ECHAM4/OPYC3 (Kjellström med flera, 2006). Dessutom har man använt två olika scenarier för framtida utsläpp av växthusgaser; SRES B2 och A2, där A2 motsvarar något högre utsläpp än B2 (Nakićenović et al., 2000).

Appendix 2

Beskrivning av den process-baserade produktionsmodellen BIOMASS

BIOMASS utvecklades ursprungligen i Australien på 80-talet för *Pinus radiata* men redan då använde man sig av produktionsfysiologiska data för vår tall hämtade från Svenska barrskogslandskapets ekologi som pågick under 1970-talet. Modellen är en process-baserad produktionsmodell, där olika processer representeras av en eller flera ekvationer som är baserade på väletablerade växtfysiologiska kunskaper och produktionsfysiologiska samband (Figur 23). BIOMASS har även anpassats för boreala klimatförhållanden för att på ett realistiskt sätt uppskatta och beskriva fotosyntesproduktionen över året. De flesta modeller saknar boreala anpassningar och överskattar fotosyntesproduktionen i stor utsträckning (20-100%). De klimatvariabler som modellen använder sig av är ackumulerad mängd globalinstrålning per dygn, maximum- och minimumtemperaturen varje dygn och ackumulerad nederbörd per dygn.



Figur 23. Schematisk beskrivning av den process-baserade produktionsmodellen BIOMASS.

Modellen är relativt krävande när det gäller parameteriseringen, där olika växtfysiologiska data rörande fotosyntes, respiration, allokering, beståndsstruktur, markförhållanden mm är nödvändiga. Beräkningar av olika utdata sker vanligtvis på dygnsbasis men går att få per timme. Utdata kan enkelt räknas om till månads- och årsvärden om så önskas. BIOMASS hanterar inte näringsdynamiken i marken utan förutsätter att en ökning av produktionen leder till ett ökat upptag och tillgänglighet av näring från marken. Detta kan påverka resultatet och ge över- eller underskattningar av hur ett förändrat klimat påverkar produktionen. Modellen hanterar vattenbrist dels genom att stomata stänger vilket minskar fotosyntesproduktionen och dels att vid extrem vattenbrist tappar beståndet barr/blad som minskar produktionen. Däremot påverkas inte produktionen i modellen vid ett stort överskott av vatten, vilket kan ske om frisk och fuktig mark omvandlas till fuktig eller blöt mark i ett framtida klimat med kraftig ökning av nederbörden i exempelvis norra Sverige. För att kunna få samma höga regionala upplösning som SMHI's transienta scenarier har vi gjort en batch-körning för varje pixel med unik parameterisering av LAI och olika biomassafraktioner. Parameteriseringen har gjorts för frisk markvegetationstyp som är den vanligaste typen i svensk skogsmark.

Appendix 3

Simulering av framtida skogstillstånd

Med hjälp av modellen The Forest Time Machine (FTM) kan framtida skogstillstånd simuleras (Andersson med flera, 2005). I FTM delas utvecklingen av skogsbeståndet in i olika utvecklingsfaser, t.ex. ung, virkesproducerande, frö- alternativt skyddsgivande. I ungskogsfasen beräknas den tid det tar för träden att uppnå en höjd av 8 m. Därefter följer den virkesproducerande fasen där tillväxt i termer av grundyta och volym beräknas i steg om fem år med hjälp av empiriska funktioner enligt Ekö (1985) som baserats på data från riksskogstaxeringen. Efter den virkesproducerande fasen kan skogen slutavverkas eller delvis avverkas. Skogens tillstånd kan på detta sätt simuleras med femårs intervall. För varje utvecklingsfas används ståndortsindex (SI) som en av de oberoende variablerna för att prediktera trädens tillväxt. Genom att anta en förändring i biomassaproduktion direkt proportionell mot en förändring i bonitet och därefter relatera bonitet till SI kan SI under förändrat klimat skattas. Ståndortsindex uppdateras på så sätt successivt under simuleringsperioden.

Som indata till simuleringar med FTM behövs rumsligt explicit skoglig information för början av simuleringsperioden, förutom för trädskiktet också exempelvis vad gäller markfuktighetsklass och markvegetationstyp. Skötselåtgärder specificeras i form av skötselprogram som kan innefatta föryngringsåtgärd, röjnings- och gallringsåtgärder, och typ av föryngringsavverkning. Varje åtgärd kan specificeras genom att antal variabler, exempelvis med avseende på artsammansättning efter åtgärd, åtgärdsintensitet, och tidpunkt för föryngringsavverkning.

Appendix 4

Beräkning av sannolikheten för vindfällning

WINDA (Blennow med flera, 2003; Blennow & Sallnäs, 2004) är ett integrerat system av modeller för att skatta sannolikheten för vindfällning för bestånd inom ett undersökningsområde. I beräkningarna tas hänsyn till beståndets tillstånd, dess omgivning och det lokala vindklimatet. För närvarande kan modellen köras för trädslagen gran, tall och björk. Grundläggande antaganden är att vädret inom undersökningsområdet är det samma, d.v.s. att det orsakas av samma vädersystem, och att vindskador initieras vid exponerade beståndskanter. WINDA har modifierats för att kunna användas tillsammans med regionala klimatscenedata (Blennow & Olofsson, revision inskickad). Fyra huvudkomponenter av den modifierade modellen beskrivs nedan.

Exponerade kanter som är åtminstone 10 m höga identifieras i ett geografiskt informationssystem. Längs dessa görs beräkningar av sannolikheten för vindfällning punktvis varje 50 m. Vinden delas in i sex sektorer, vilket motsvarar att varje punkt antas anblåst inom en 60° vid sektor. För varje punkt beräknas den maximala vindstyrka träden kan stå emot. Dessa beräkningar görs med hjälp av modellen HWIND (Peltola et al., 1999). I HWIND delas krafterna som verkar på träden in i en horisontell och en vertikal komponent (gravitation). Genom att anta en vindprofil vid beståndskanten beräknas utifrån den vertikala fördelningen av stam- och kronsegment medelbelastningen på grund av vind och gravitation för varje höjdsegment. Motståndskraften mot rotvälta predikteras utifrån beräknad vikt hos rot/jordvolymen. Ett träd antas välta om det maximala vridmomentet överskrider stödet från förankringen av rot/jordvolymen. Det maximala vridmomentet ett träd kan motstå utan stambrott beräknas från diameter i brösthöjd och brottstyrkeindex för veden. Kritiska vindhastigheter beräknas motsvarande vridmomenten som behövs för rotvälta respektive stambrott. En modifiering av HWIND gör det möjligt att ta hänsyn till variationer i trädskiktet framför en exponerad beståndskant.

Wind Atlas and Application Program (WASP) (Mortensen et al., 1998) används för att beräkna den kritiska fria vindhastigheten. Den kritiska fria vindhastigheten är den beräknade kritiska vindhastigheten i trädtoppsnivå som rensats från inverkan av terrängens skrovlighetsvariationer och orografi. Den beräknade kritiska fria vindhastigheten länkas till den kritiska geostrofiska vindhastigheten enligt Kristensen et al. (2000). Den årliga sannolikheten för att överskrida den kritiska geostrofiska vindhastigheten i varje vindriktningsektor beräknas med hjälp av extremvärdesteori (Gumbel, 1958) utifrån en tidsserie av årliga maximumvindhastigheter för varje sektor. Den årliga sannolikheten för vindfällning för varje bestånd beräknas utifrån sektorsvis maximumvärden på sannolikheten för rotvälta respektive stambrott som aggregerats för all vindriktningsektorer.

Trädskiktet inom undersökningsområdet och dess omedelbara omgivning beskrivs i en digital karta. Trädskiktet beskrivs genom information om trädhöjd, diameter i brösthöjd, antal stamma per ha per trädslag. Området utanför undersökningsområdet och dess omedelbara omgivning beskrivs i aerodynamiskt hänseende i form av skrovlighet och nollplansförskjutning till ett avstånd av omkring 5 km från undersökningsområdet. För hela området beskrivs topografin med en digital höjdmodell med 50 m upplösning. Härigenom kan inflytandet av terrängen på vinden beräknas. En rutin i WINDA identifierar nollplansförskjutningen framför den exponerade kanten och beräknar luckans längd. Luckans längd, nollplansförskjutningen och skrovligheten framför kanten används i HWIND

tillsammans med beståndsinformationen för att beräkna den kritiska vindhastigheten i trädtoppsnivå för respektive rotvälta och stambrott.

Som beskrivning av vindhastigheten under varje 30-års utvärderingsperiod användes momentana värden varje sjätte timme för vindhastighet på 850 hPa-nivån (motsvarar ca 1500 m höjd) beräknade med RCA3-ECHAM4/OPYC3-modellen av Rossby Centre, SMHI, för den pixel som motsvarar de centrala delarna av respektive undersökningsområde. Vindhastigheten på 850 hPa-nivån användes som proxy för den geostrofiska vindhastigheten. Data länkades till 1 h medelvärde av vindhastigheten för en plats med hjälp av en faktor som togs fram efter att ha jämförts med observationsdata från Jönköpings flygplats för perioden 1968–1990. Observationsdata hade kompenserats för lokalt inflytande på vinden och hade länkats till den geostrofiska vinden. Därefter jämfördes med vindklimatet för motsvarande period modellerat med RCA3-modellen där återanalyserade meteorologiska observationsdata (ERA40) använts som drivdata i stället för data från en global klimatmodell (Kjellstöm med flera, 2005). Nittionio-percentilen för observerad vindhastighet efter anpassning till en Weibullfördelning länkades till RCA3-ERA40 data för den närmsta pixeln. För att kalibrera respektive fallstudieområdes RCA3-ECHAM4/OPYC3-modellerade extremvindsklimat till RCA3-ERA40 modellerat extremvindsklimat jämfördes 99-percentilerna efter anpassning till en Weibullfördelning. På detta sätt togs de totala kalibreringsfaktorerna +1,4% respektive +7,2% fram för Asa respektive Brattåker. Vindriktningen representerades av RCA3-ECHAM4/OPYC3-modellerad vindriktning för 10 m över marken.