

UTGIVEN
I SAMARBETE
MELLAN



Naturskyddsföreningen



HUGGA ELLER SKYDDA?

Boreala skogar i klimatperspektiv

Hugga eller skydda?

Boreala skogar i klimatperspektiv

Text, grafik och layout: Roger Olsson

Omslagsbild: Lars-Erik Håkansson (Lehån).

ISBN: 978-91-558-0052-9

Publicerad i april 2011 av Svenska Naturskyddsföreningen och Världsnaturfonden WWF i samarbete med Luftförorenings- och klimatsekretariatet (AirClim)

Svenska Naturskyddsföreningen, Box 4625, 116 91 Stockholm
www.naturskyddsforeningen.se

Världsnaturfonden WWF, Ulriksdals Slott, 170 81 Solna
www.wwf.se

Förord

Effekten på skogen och dess roll i ett föränderligt klimat diskuteras ofta i samband med avskogning i framförallt tropiska områden. Samtidigt utgör den boreala skogen ett större kolförråd än vad som finns i både den tropiska och temperade skogen sammantaget. Klimatförändringarnas effekt på den boreala skogen är därför av mycket stor betydelse, liksom hur vi förvaltar dessa skogar för att inte öka utsläpp av växthusgaser.

Kunskapen kring dessa frågor ökar successivt, men den återspeglas inte alltid i samhällsdebatten. Samtidigt är kunskap avgörande för att kloka beslut ska kunna fattas om den boreala skogens framtid. Det är av vikt att klimat- och skogspolitiken är balanserad och inte endast utgår från ekonomiska intressen. En politik med slagsida leder sannolikt inte till åtgärder som är det bästa för klimatet.

För att motverka en sådan obalans har undertecknade organisationer givit journalisten Roger Olsson i uppdrag att ta fram en rapport som utifrån aktuell kunskap beskriver klimateffekter på obrukad respektive brukad boreal skog samt hur brukandet och olika skogsprodukter påverkar upptag och utsläpp av växthusgaser. Uppdraget har varit formulerat så att rapporten diskuterar skog och skogsbruk i den boreala regionen utslutande i ett klimatperspektiv. Det är först när man har en bild av klimateffekterna av olika handlingsalternativ som det är möjligt att på ett adekvat sätt väga in för- och nackdelar för ekonomin, miljön och sociala värden.

Rapporten grundar sig främst på en litteraturgenomgång med uppföljande frågor till forskare och experter. Den 27 januari 2011 hölls även ett diskussionsmöte om rapporten med experter från myndigheter och departement.

Rapporten har för oss skapat en tydlighet och lyfter även fram resultat som, oss veterligen, tidigare inte har kommunicerats till en bredare publik. De övergripande slutsatserna i rapporten kan sammanfattas med att vi, utifrån ett klimatperspektiv, bör undvika att börja bruka orörda boreala skogar, att brukandet bör diversifieras för att undvika att kol frigörs från marken och att för- och nackdelar, på ett helt annat sätt än idag, måste vägas in i beslut om skogsbrukets intensifiering samt vilka produkter från skogen vi väljer att tillverka. Vi hoppas att det finns ett intresse att diskutera dessa resultat som förhoppningsvis kan skapa en bredare samsyn i frågan om den boreala skogen och klimatet.

Håkan Wirtén

generalsekreterare, Världsnaturfonden WWF

Svante Axelsson

generalsekreterare, Svenska Naturskyddsföreningen

Innehåll

Sammanfattning	5
1. Den globala uppvärmningen	7
2. Den boreala skogen	9
3. Klimatet och skogen – samband och processer	11
<i>Kolets kretslopp</i>	
<i>Koillöden och kolförråd i boreala skogar</i>	
<i>Klimat effekter på kolföden</i>	
<i>Andra samband mellan boreala skogar och klimat</i>	
<i>Skogen som klimatpolitiskt redskap</i>	
4. Som man frågar får man svar – om systemavgränsningar	21
5. Naturliga skogsekosystem	25
<i>Skogens tillväxt</i>	
<i>Förändringar i ekosystem och vegetationstyper</i>	
<i>Naturliga störningar</i>	
<i>Boreala naturskogar som kolsänkor</i>	
<i>Bruka eller skydda naturskogar?</i>	
6. Brukade skogsekosystem	33
<i>Klimat effekter på skogstillväxten</i>	
<i>Skogsbruksmetoder i klimatperspektiv</i>	
<i>Bruka eller låta växa?</i>	
7. Lagring av kol i skogsprodukter	45
8. Substitution	47
<i>Substitution av bränslen</i>	
<i>Substitution av material</i>	
9. Skogen och klimatkonventionen	53
<i>Marrakesh-principerna</i>	
<i>Förslag till ändringar och tillägg</i>	
<i>Åtaganden och referensnivåer</i>	
10. Diskussion och slutsatser	57
<i>Boreala naturskogar</i>	
<i>Brukade boreala skogar</i>	
<i>Substitution av bränsle och material</i>	
Referenser	61

Sammanfattning

Denna rapport redovisar översiktligt sambanden mellan boreala skogar, skogsbruk och klimatförändringar. Den behandlar uteslutande klimataspekter, vilket inte innebär att andra perspektiv, som till exempel samhällsekonomi eller biologisk mångfald, anses vara av underordnad betydelse. Avgränsningen motiveras endast av strävan efter tydlighet.

En central utgångspunkt är att +2 °C är en kritisk gräns för den globala uppvärmningen, och att det krävs drastiska begränsningar av utsläppen av växthusgaser de närmaste decennierna för att den gränsen inte ska överskridas. Analysen av de boreala skogarnas betydelse för klimatet och av olika handlingsalternativ kan därför inte bara göras i ett långt tidsperspektiv (100 år eller mer).

De boreala skogarnas kolförråd är större än något annat landekosystem, och nästan dubbelt så stort som de tropiska skogarnas. Det enorma kolförrådet gör de boreala skogarna till en nyckelfaktor för framtidens klimat.

Omkring hälften av världens boreala skogar är gamla naturskogar, helt eller nästan helt opåverkade av skogsbruk. Här finns en mycket stor del av kolförrådet. Dessa skogar kan fortsätta att fungera som kolsänkor i många hundra år. Fortsatt uppvärmning kan förvandla de boreala naturskogarna till en kolkälla genom att omfattningen av naturliga störningar – bränder och insektsangrepp – ökar. Tendenser i den riktningen är redan tydliga. Om uppvärmningen överskrider en kritisk nivå (3-5 °C har föreslagits) kan värme- och vattenbrist leda till omfattande skogsdöd i den boreala regionen. Stora delar av kolförrådet kommer då ut i atmosfären, vilket skulle driva på uppvärmningen ytterligare i en irreversibel och självförstärkande process.

Att omföra boreal naturskog till brukad skog har negativ klimateffekt på kort och medellång sikt, eftersom delar av det stora kolförrådet avgår till atmosfären vid avverkning. Det tar lång tid, 100 år eller mer, för en ny skogsgeneration att binda motsvarande mängd kol, vilket alltså innebär att naturskogsavverkningar i detta tidsperspektiv ökar den globala uppvärmningen ytterligare.

I brukade boreala skogar har människan större möjligheter att påverka flödena av växthusgaser genom skogsskötsel och användning av den skördade biomassan. Även här är det nödvändigt att ta hänsyn till kraven på snabba utsläppsbegränsningar när man analyserar olika handlingsalternativ. Det som ter sig optimalt på 100 eller 200 års sikt kan vara kontraproduktivt i förhållande till vad som måste göras de närmaste decennierna.

Intensivare skogsbruk med ökad produktion och ökat uttag, exempelvis genom omfattande gödsling, innebär klimatmässiga risker. Även bortsett från riskerna är sådana alternativ inte självklart positiva, i synnerhet inte kortsiktigt. Att i dag börja bryta stubbar i svensk skog i stor omfattning för att öka tillgången på skogsbränsle skulle exempelvis ge en kolskuld – det vill säga vara negativt från klimatsynpunkt – under åtminstone de närmaste 30 åren.

Det finns intressanta möjligheter i skogsskötselstrategier med andra mål än att maximera produktion och virkesuttag. Förlängning av omloppstiderna i skandinaviskt skogsbruk har exempelvis visats ha positiva klimateffekter, i synnerhet i granskogar, även om man tar hänsyn till substitutionseffekterna (*se nedan*). Det beror framför allt på att sågtimrets andel av uttaget ökar. Kalhyggesfritt skogsbruk skulle också ha omedelbara positiva effekter vad gäller skogsbrukets påverkan på klimatet, eftersom kalhygget är en kolkälla.

En klimatmässig nackdel med förlängda omloppstider och kalhyggesfritt skogsbruk är

att tillgången till avverkningsrester för skogsbränsle, och därmed möjligheten att ersätta fossila bränslen, minskar.

Just denna möjlighet att ersätta – substituera – fossilbränsleanvändning med biomassa från skogen är av avgörande betydelse för de brukade skogarnas totala klimatpåverkan. Skogsprodukter kan ersätta fossila bränslen både direkt genom förbränning och indirekt, genom att ersätta energikrävande material som stål och betong. Över tid kan de beräknade substitutionseffekterna bli stora, eftersom de undvikta emissionerna adderas för varje skogsgeneration. I det korta tidsperspektivet (några decennier) är det dock tveksamt om substitutionseffekter klimatomässigt kan motivera satsningar på ökad avverkning eller volymproduktion i skogen.

I substitutionsstudier utgår man ofta från att ökat virkesuttag används antingen för material- eller bränslesubstitution, eller för en kombination av båda. Det avviker starkt från det faktiska förhållandet i Sverige, där mindre än en femtedel av virkesuttaget blir konstruktionsvirke med lång livslängd, och där omkring hälften används för papperstillverkning. Tillverkning och användning av papper är generellt negativt från klimatsynpunkt (även om effekterna sannolikt skiljer sig åt mellan olika pappersprodukter). Att minska konsumtionen av papper och använda större del av det skördade virket för trävaror och bränsle skulle således få en positiv klimateffekt.

Det är också viktigt att hålla i minnet att substitutionseffekter i någon mening är teoretiska. De bygger på antagandet att om en viss mängd träråvara tillförs marknaden, så minskar användningen av andra råvaror eller material i motsvarande mån. I praktiken kan en del av skogsråvaran istället komma att användas för ökad konsumtion. Inga av de substitutionsstudier som refereras i denna rapport tar hänsyn till sådana marknadseffekter.

1. Den globala uppvärmningen

Jorden blir varmare. Halterna av koldioxid och andra växthusgaser i atmosfären har ökat, främst på grund av utsläpp från förbränning av fossila bränslen. Medeltemperaturen har stigit med 0,8 °C sedan slutet av 1800-talet (IPCC 2007a, Frieler m. fl. 2009). Hur snabbt uppvärmningen kommer att fortsätta och hur stor den kommer att bli beror på i vilken utsträckning vi lyckas begränsa utsläppen av växthusgaser. FN:s klimatpanel IPCC har redovisat en lång rad scenarier där den globala medeltemperaturen vid slutet av detta sekel är 1,1-6,4 °C högre än i dag, beroende på hur utsläppen av växthusgaser utvecklas. För att uppvärmningen ska begränsas till högst 2 °C får enligt dessa scenariestudier koncentrationen av koldioxid i atmosfären inte bli högre än 400 ppm (miljondelar). Redan idag innehåller atmosfären omkring 380 ppm koldioxid (IPCC 2007a).

I sin fjärde utvärdering 2007 gjorde IPCC bedömningen att den globala uppvärmningen bör begränsas till högst 2 °C för att begränsa risken för konsekvenser som samhället skulle ha mycket svårt att hantera. Senare forskning har styrkt denna bedömning eller till och med indikerat att gränsen kan ligga lägre (Fee 2011). Ovanför den kritiska gränsen skulle små ytterligare temperaturhöjningar kunna utlösa stora och irreversibla förändringar som i sig kan driva på uppvärmningen ytterligare i en självförstärkande process. En grupp ledande forskare har identifierat ett tiotal sådana "tipping elements", som enligt deras bedömning skulle kunna utlösas före nästa sekelskifte. Avsmältning av istäcket i Arktis, upptining av permafrostområden och omfattande skogsdöd i Amazonas och de boreala skogarna är tre exempel. I de nämnda fallen skulle förändringarna kunna ske inom loppet av några decennier eller högst ett sekel. Upptining av permafrost och skogsdöd påverkar båda klimatet genom att stora mängder växthusgaser släpps ut i atmosfären (Lenton m. fl. 2008). Senare forskning har gett stöd för dessa bedömningar. Slutsatsen att global uppvärmning över 2 °C riskerar att leda till sprängvisa och oåterkalleliga förändringar i det globala systemet, med skenande uppvärmning som följd, har stärkts (Schellnhuber 2009).

För att hålla uppvärmningen under två grader måste utsläppen av växthusgaser enligt IPCC:s bedömning börja minska senast 2015 och ha begränsats med 50-85 procent år 2050 (jämfört med 1990 års utsläpp) (IPCC 2007b). Senare bedömningar har kommit fram till att de industrialiserade ländernas koldioxidutsläpp från fossila bränslen i det närmaste måste upphöra senast år 2030 om det ska finnas några möjligheter att klara tvågradersmålet (Schellnhuber m. fl. 2009).

Med de åtaganden som världens stater hittills gjort kommer dock utsläppen att fortsätta att öka under de närmaste decennierna (IPCC 2007b). Om den trenden inte bryts kommer världen att utsättas för en uppvärmning på mer än 4 °C vid slutet av detta sekel. Ett snabbt och dramatiskt trendbrott vad gäller utsläppen av växthusgaser är alltså av avgörande betydelse.

Klimatförändringar i den boreala regionen

I stort sett alla klimatmodeller visar att uppvärmningen i den arktiska regionen (norr om 60° nordlig bredd) kommer att bli långt större än det globala genomsnittet. Det stämmer också med den faktiska utvecklingen hittills (Rummukainen & Källén 2009). Medeltemperaturen i den arktiska regionen har stigit dubbelt så snabbt som den globala under de senaste hundra åren (IPCC 2007a).

Om den globala medeltemperaturen stiger med 2,8 °C till år 2100 kommer stora delar av de arktiska landområdena att utsättas för 4-5 °C uppvärmning (IPCC 2007b). Med nuvarande utsläppstrend och en global temperaturhöjning på 4°C kan temperaturhöjningen i norra Skandinavien bli 6 °C. Delar av arktiska Kanada och Asien kan komma att värmas 10-12 grader (UK Met Office 2009).

Vid en global uppvärmning på något mer än två grader beräknas medeltemperaturen i Sverige öka med 2-4 °C, mest i norr och mer vintertid än under sommaren. Vintrarna blir mildare och somrarna varmare. Våren kommer tidigare och hösten senare. Nederbörden beräknas öka med i medeltal 10-20 procent, mest under vinterhalvåret. Antalet extrema regnväder (med stora nederbördsmängder under kort tid) blir fler. Vattenbrist kan ändå bli ett problem i sydöstra Sverige, eftersom avdunstningen ökar när det blir varmare. Vintrarnas snötäcke kommer att minska i utbredning och varaktighet. Klimatmodellerna ger inte entydiga besked om hur vindförhållanden kan komma att förändras. I genomsnitt kan det tänkas bli något blåsigare. Stormarna kan tänkas bli något färre, men samtidigt kraftigare (Rummukainen 2010), vilket i sig kan öka avdunstningen och därmed bidra till vattenbrist. Vissa klimatmodeller förutser att medelvindstyrkan i Skandinavien kommer att öka med 7-13 procent vintertid till år 2100, och att den maximala vindhastigheten kommer att öka lika mycket (Eriksson 2007).

2. Den boreala skogen

Boreala skogar breder ut sig över omkring 14 procent av jordens vegetationstäckta yta och är därmed världens största sammanhängande landekosystem. De bildar ett grönt bälte av varierande bredd på norra halvklotet, ungefär mellan 45:e och 70:e breddgraden. Det boreala skogsbältet omfattar 1,4 miljarder hektar, vilket motsvarar 38 procent av världens skogsareal (Soja m. fl. 2007). Mer än hälften finns i Ryssland, och omkring 6 procent i Skandinavien (Olsson, R 2010). I norr gränsar den boreala skogen till trädlös tundra. I söder är gränsen mer diffus och utgörs ofta av en zon av blandskogar som övergår i tempererad lövskog.

Boreala skogar domineras av barrträd, med inslag av lövträd som björk och asp. Det kärva klimatet är en faktor av avgörande betydelse för deras ekologi. Delar av den boreala skogen, främst i Sibirien, växer på ständig permafrost, och perioder med permafrost förekommer även söder om zonen med ständigt frusen mark. Vintrarnas snötäcke är av stor ekologisk betydelse, eftersom det skyddar marken från vinterkylan och därmed skapar möjligheter för många växt- och djurarter att överleva den kalla årstiden (Tivy 1993).

Storskaliga störningar spelar en avgörande roll för dynamiken i naturliga boreala skogs-ekosystem. Återkommande bränder, stormfällningar och angrepp av skadegörare skapar luckor där nya skogsgenerationer kan etableras (Juday m.fl. 2005). Naturliga skogsbränder, orsakade av blixtnedslag, inträffar med 50-200 års mellanrum och varje enskild brand kan påverka tiotusentals hektar skog (Tivy 1993).

I den brukade skogen är avverkning och andra skogsbruksåtgärder den störning som mer än någon annan styr ekosystemets dynamik. Förändrade skogsskötselmetoder kan påverka såväl skogens känslighet för klimatförändringar som dess effekter på klimatet (Juday 2005).

Omkring hälften av världens boreala skogar har inte påverkats i nämnvärd utsträckning av skogsbruk eller andra mänskliga verksamheter. Stora naturskogsområden finns i den norra delen av den boreala zonen, som är mycket glest befolkad och till stora delar väglös (Bryant m. fl. 1997). Mer än hälften av de stora naturskogsområden som finns kvar i världen är boreala skogar i Kanada och Ryssland (Juday m. fl. 2005). I Skandinavien är nästan all skog präglad av mänsklig påverkan och till större delen också av det senaste halvseklats industriella skogsbruk. I Sverige finns i biologisk mening äldre och naturskogsartad skog huvudsakligen i naturreservat och andra skyddade områden. Uppskattningarna av arealen sådan skog utanför reservaten är osäkra. Totalt är andelen naturskogsartad skog i Sverige sannolikt under 10 procent, varav en stor del i små områden som präglas av det omgivande brukade skogslandskapets dynamik (Cedergren 2008, SCB 2009).

När man analyserar sambanden mellan klimat, klimatförändringar och boreala skogar är det väsentligt att skilja mellan naturskogar, där naturlig dynamik råder, och brukade skogar, där människan präglar skogen. Denna skillnad är av stor betydelse både för klimatets effekter på skogen och för återkopplingarna mellan skogen och klimatet.

Den globala uppvärmningen har redan betydande effekter på jordens landekosystem, och effekterna kommer att bli fler och starkare med ökad uppvärmning. Redan vid en global medeltemperaturhöjning på 1,5-2,5 °C finns det risk för storskalig omvandling av skogar till skoglösa naturtyper. Boreala skogar kommer sannolikt att påverkas särskilt kraftigt av klimatförändringarna, dels därför att uppvärmningen på nordliga breddgra-



Figur 1. Det boreala skogsbältet, schematiskt uppdelat i orörda naturskogar/urskogar och brukade skogar (efter Bryant m. fl. 1997).

der väntas bli långt större än det globala genomsnittet, dels eftersom temperaturen är en faktor av avgörande betydelse i boreala skogar (IPCC 2007a).

Som de flesta andra ekosystem kommer den boreala skogen sannolikt att reagera icke-linjärt på förändrade miljöförhållanden. Det innebär att förändringarna inte sker gradvis och proportionellt i förhållande till stigande temperatur, utan att de uppträder plötsligt när vissa tröskelvärden överskrids (IPCC 2007d).

3. Klimatet och skogen

- samband och processer

Växthusgasbalansen för ett ekosystem – i detta fall skogen – är nettoutbytet av tre växthusgaser mellan ekosystemet och atmosfären: koldioxid (CO_2), metan (CH_4) och lustgas (N_2O). Sett till volym och klimateffekt är flödena av koldioxid helt dominerande. Metan och lustgas är dock betydligt mer kraftfulla växthusgaser, vilket innebär att även jämförelsevis små flöden har stor betydelse för klimatet.

Koldioxid och metan innehåller kol och flödena av dessa gaser ingår således i kolets globala kretslopp.

Kolets kretslopp

Kolets kretslopp är den kemiska motor som förser det mesta av livet på jorden med ”byggnadsmaterial” och energi. Kolets kretslopp har också stor betydelse för atmosfärens kemiska sammansättning och därmed för klimatsystemet.

Kolflöden

Gröna växter tar upp koldioxid ur atmosfären och binder det genom fotosyntesen i kolhydrater med hjälp av solens energi. En del av de kolhydrater som växten bygger upp använder den för sin egen energiförsörjning, varvid koldioxid återgår till atmosfären. Processen kallas autotrof respiration och innebär enkelt uttryckt att växterna andas. Återstoden (nettoprimärproduktionen, NPP) är den mängd kol som växterna kan använda för att bygga upp sin biomassa i stam, rötter, blad etc.

Växter och växtdelar äts av växtätare, eller dör och bryts ned av mikroorganismer. Växtätarna och mikroorganismerna använder kolhydraterna som energikälla. Kolet transporteras på så sätt i näringskedjorna och det mesta återgår till atmosfären som koldioxid när djuren andas, eller när de i sin tur dör och bryts ned. Denna process kallas heterotrof respiration. Störningar som bränder, insektsangrepp eller avverkning ökar den heterotrofa respirationen. Det gör också, i allmänhet, ett varmare klimat.

Mått och enheter

Kolförråd och kolflöden anges i denna rapport oftast i Mt (megaton) eller Gt (gigaton).

1 Mt = 1 miljon (10^6) ton

1 Gt = 1 miljard (10^9) ton

1 Gt är alltså 1 000 Mt.

I de flesta fall anges flöden av koldioxid (CO_2) som kol (C). 1 kg kol motsvarar 3,7 kg CO_2 . Omvänt innehåller 1 kg CO_2 0,27 kg kol.

1 m^3 ved innehåller omkring 0,2 ton kol.

Enheter CO_2 -ekvivalenter ger ett mått på den sammanlagda växthusgaseffekten av utsläpp av flera växthusgaser. Växthusgasen metan är exempelvis 23 gånger mer kraftfull än koldioxid som växthusgas, vilket betyder att 1 kg metan ger samma klimateffekt som 23 kg koldioxid. Utsläpp av 1 kg koldioxid och 1 kg metan är alltså $1 + 23 = 24$ kg CO_2 -ekvivalenter.

En del av det kol växterna tar upp ur atmosfären lagras i marken som dött organiskt material. Detta flöde är litet och avtar ju äldre skogen blir, men över tid kan ändå stora kolförråd byggas upp.

Bränder spelar en väsentlig roll i kolets kretslopp. På samma sätt som levande organismers andning bryter de ned växtbiomassa, så att koldioxid återgår till atmosfären. Tropiska savanner och boreala skogar är ekosystem som är anpassade till återkommande naturliga bränder. Atmosfären tillförs årligen 2-5 Gt (Gigaton) kol genom bränder i dessa ekosystem (Scholes 2004).

Utöver de nämnda processerna finns ett antal mindre flöden i kolets kretslopp, varav tre bör uppmärksammas här: VOC, metan och löst organiskt kol.

VOC (Volatile Organic Compounds) är ett samlingsbegrepp för flyktiga organiska kol-föreningar, exempelvis monoterpener. Växter släpper ut ett stort antal sådana föreningar i atmosfären, oftast i små mängder (Scholes 2004). Utsläppen av VOCs från boreala skogar kan grovt förväntas öka med ökande fotosyntes, eftersom bildningen av dessa ämnen är starkt knuten till fotosyntesen (Bäck & Hari 2009). I atmosfären kondenseras VOC till aerosolpartiklar, som påverkar atmosfärens strålningsbudget. De fungerar också som kondensationskärnor för molnbildning, vilket påverkar molnens livslängd och deras egenskaper i förhållande till strålningen. Enligt IPCC är aerosoler för närvarande den största osäkerhetsfaktorn i beräkningarna av klimateffekter (Kulmala m. fl. 2009).

Metan avges när organiskt material bryts ned i syrefria eller syrefattiga miljöer (till exempel i en våtmark, i en soptipp eller i magen på en växtätare) (Scholes 2004). Som växthusgas är metan 23 gånger mer effektiv än koldioxid. Det betyder alltså att ett ton metan ger samma uppvärmningseffekt som 23 ton koldioxid (Morén & Olsson 2007). De kemiska betingelserna i marken avgör om metan produceras eller bryts ned (Nordin m. fl. 2009). I skogslandskapet är det främst torvmarker som avger metan, och dikning av sådana marker för skogsproduktion kan påverka metanavgången kraftigt (Bergkvist 2007). (Se vidare avsnitt 6 om dikning av torvmarker.)

Såväl metan som VOC omvandlas mer eller mindre snabbt till koldioxid i atmosfären. I den processen påverkar de atmosfärskemien, vilket i vissa fall kan leda till att en annan kraftfull växthusgas, marknära (troposfäriskt) ozon, bildas (Scholes 2004).

Löst organiskt kol (DOC, Dissolved Organic Carbon) från delvis nedbrutet materialet i det översta markskiktet transporteras med vatten längre ner i markprofilen. En del av detta lösta organiska kol följer med grundvattnet ut i sjöar och vattendrag, men i boreala skogsekosystem fastnar mycket i marken och bidrar till att bygga upp de relativt stabila förråden av kol där. I svensk skogsmark finns en stor del av kolförrådet i mineraljorden, dit det alltså transporterats med grundvattnet som DOC (Morén & Olsson 2007).

Förråd, källor och sänkor

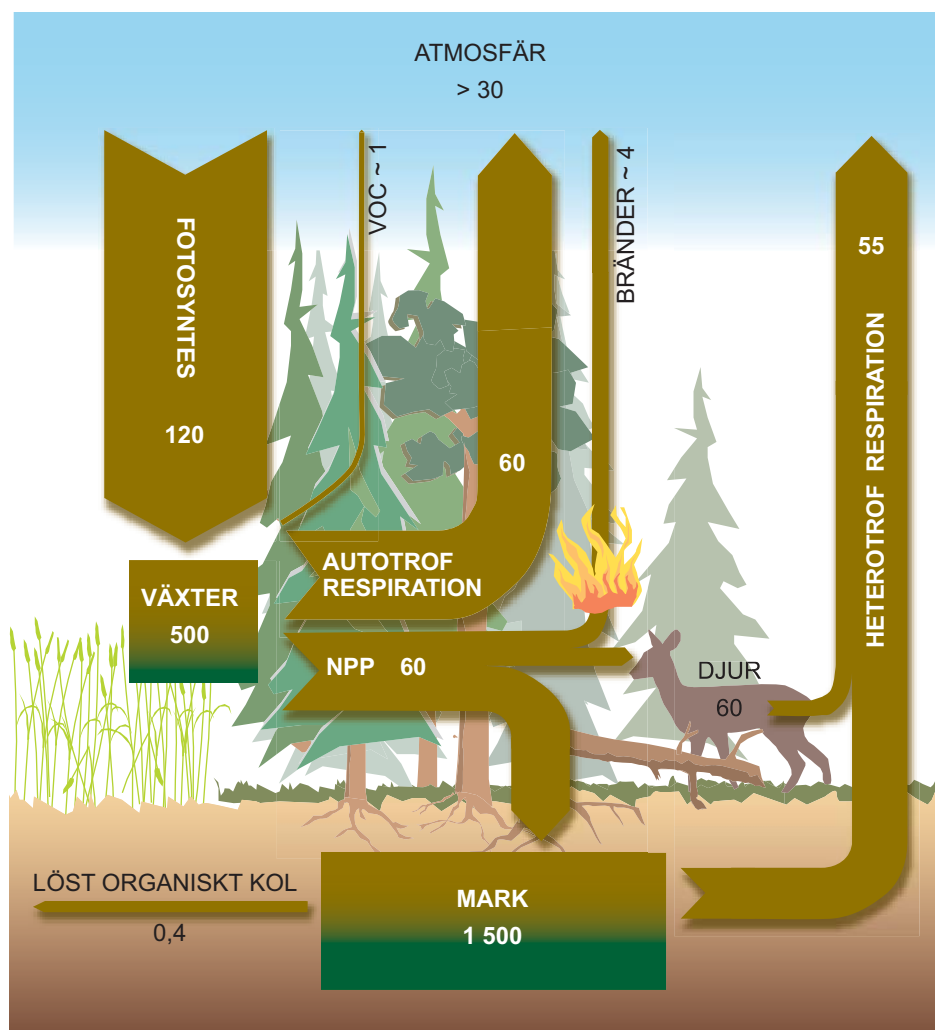
Kolförråd eller en kolpool är en mängd kol som lagras i ett visst system, till exempel i den växande skogen i Sverige eller i skogsmarken. Genom flöden av kol från eller till förråden förändras deras storlek över tid.

Kolsänka är ett system som tar upp mer kol ur atmosfären än det avger (förrådet ökar).

Kolbindning innebär att kol tas upp ur atmosfären och lagras i en sänka.

Kolkälla är ett system som avger mer kol till atmosfären än det tar upp (förrådet minskar).

Kolbalans eller växthusgasbalans är nettot av alla flöden av kol eller växthusgaser i det system man studerar. Om summan av alla kolflöden från atmosfären till skogsekosystemet är lika stor som summan av alla flöden i motsatt riktning är alltså kolbalansen noll. Kolbalansen varierar över tid.



Figur 2. Kolets kretslopp i landekosystemen. De boreala skogarnas andel av förråden i mark och levande växter anges med grön färg i respektive box. Bilden visar flöden under naturliga förhållanden, vilket innebär att effekterna av mänsklig påverkan inte redovisas.

Förråd anges i Gigaton (Gt) och flöden i Gt per år. (1 Gt = 1 miljard ton).

De naturliga flödena i figuren kan jämföras med utsläppen av koldioxid från industriprocesser och förbränning av fossila bränslen, som beräknas vara omkring 8 Gt kol per år (Scholes 2004). (Efter Steffen m. fl. 2004).

Kolförråd

Det globala kolförrådet i levande växtbiomassa är omkring 500 Gt, vilket är ganska lite jämfört med kolförråden i världshaven och i fossila avlagringar (olja och kol). Växternas kolförråd är dock viktigt, eftersom det kan öka eller minska ganska snabbt om klimatet eller människans sätt att sköta skogar eller jordbruksmark förändras.

Det totala kolförrådet i marken i världens landekosystem beräknas vara 1 500–2 000 Gt, vilket alltså är tre gånger mer än vad som finns i den växande biomassan och 50 gånger mer än i atmosfären. En mycket stor del av detta kol, minst 40 procent, finns i boreala skogar (Scholes 2004).

Kolflöden och kolförråd i boreala skogar

Globalt

Enligt FN:s klimatpanel IPCC är kolförrådet i boreala skogar (i mark och växtlighet) 550 Gt, vilket motsvarar 30 procent av allt kol i världens landekosystem. De boreala skogarnas kolbindning är 1 Gt per år (IPCC 2007a). Siffrorna i tabell 1 baseras på andra källor och avviker något från de nämnda, men ger ändå en rättvisande jämförelse av kolförråd och kolbindning i världens stora skogsregioner.

Oavsett vilka skattningar man utgår från är kolförrådet i det boreala skogsekosystemet

Tabell 1. Kollager i mark och växtbiomassa i världens skogar (Gt). (Woods Hole Research Center)

Biom	Yta (milj ha)	Mark	Växt-biomassa	Totalt
Boreal skog	1 509	625	78	703
Tropisk skog	1 756	216	159	375
Tempererad skog	1 040	100	21	121

större än i något annat landekosystem, och nästan dubbelt så stort som de tropiska skogarnas (Kasischke 2000). Även per ytenhet håller boreala skogar dubbelt så mycket kol som tropiska (Watson m. fl. 2002). I grunden beror denna skillnad på klimatet. I de flesta skogar i varmare områden finns större delen av kolförrådet i de levande växterna. Nedbrytningen av dött organiskt material är snabb och förråden i marken byggs inte upp. I boreala skogar ackumuleras däremot ofullständigt nedbrutet organiskt material i marken över tid, eftersom de låga temperaturerna gör att nedbrytningen går långsamt. Boreala skogar som får växa ostört bygger långsamt upp markens kolförråd genom hundratals eller tusentals år.

Kolförrådet, per ytenhet räknat, är större i naturliga boreala skogar än i skogar som brukas och där man regelbundet tar ut virke genom avverkningar. I en gammal naturskog i Sverige (det vill säga en skog som aldrig varit kalavverkad och som fått växa i huvudsak ostört i åtminstone ett par hundra år) kan virkesförrådet vara 3–4 gånger större än medelvolymin i våra brukade skogar, vilket innebär att kolförrådet i den växande skogen är lika mycket större. I gammal, obrukad skog finns också mer kol i marken, eftersom förrådet fortsätter att byggas upp, om än långsamt, så länge skogen får växa ostört. Däremot binder unga och medelålders skogar mer kol än gamla, per ytenhet räknat, eftersom de växer snabbare (Olsson 2010).

De enorma kolförråden i mark och vegetation gör de boreala skogarna till en nyckelfaktor för det framtida klimatet, i synnerhet som de kan förväntas vara särskilt känsliga för och reagera snabbt på stigande temperaturer, med dramatiska konsekvenser för kolets kretslopp och atmosfärens innehåll av växthusgaser som följd. Sådana förändringar är, som vi ska se i följande avsnitt, redan synbara.

Sverige

Kolförrådet i Sveriges skogar beräknas vara 1 Gt i växande biomassa, 1,9 Gt i fast skogsmark (Olsson, M 2010) och ytterligare uppskattningsvis 0,6 Gt i dikad torvmark med produktiv skog (Bergqvist & Olsson 2008). Både biomassa- och markkolförråden är, per ytenhet räknat, betydligt större i södra Sverige än i norr, men variationen är stor mellan olika marker (Morén & Olsson 2007).

Enligt Sveriges officiella rapportering till klimatkonventionen var markanvändningssektorn en kolsänka på omkring 0,04 Gt CO₂-ekvivalenter år 2009 (Naturvårdsverket 2011), vilket motsvarar omkring 0,01 Gt kol. Skogen och skogsbruket står för nästan hela denna kolsänka. Siffran kan jämföras med Sveriges totala utsläpp av växthusgaser, som var omkring 0,06 Gt CO₂-ekvivalenter (Naturvårdsverket 2011). Man bör hålla i minnet att rapporteringen under klimatkonventionen inte enbart styrs av naturvetenskapliga principer, utan också påverkas av klimatkonventionens regelverk (se avsnitt 9).

Skogens kolbindning har i det närmaste halverats under det senaste decenniet. Orsaken är att avverkningen ökat snabbare än tillväxten (Bergqvist & Olsson 2008). Modellberäkningar visar, att med samma skogsskötsel som idag kommer kolsänkan i den växande skogen att förbli i stort sett oförändrad under de närmaste 20 åren. Inte heller kolbindningen i marken förändras nämnvärt. Beräkningarna utgår från att klimatförändringarna ökar skogstillväxten. Om den effekten räknas bort minskar kolsänkan (Lundblad m. fl. 2009).

Klimat effekter på kolflöden

Lagring och frisättning av kol i boreala skogar styrs huvudsakligen av fyra faktorer:

- trädens och växtlighetens tillväxt,
- nedbrytningen av dött organiskt material,
- frekvens och omfattning av bränder och andra störningar,
- förändringar i permafrostens omfattning (Juday m. fl. 2005).

Permafrost behandlas inte i denna rapport.

Tillväxt

Ökad tillväxt innebär att växterna tar upp mer koldioxid ur atmosfären. Temperaturhöjningar kan öka skogens tillväxt, främst genom att vegetationsperioden förlängs. I det boreala området har det särskilt stor betydelse om våren kommer tidigare, eftersom det då också finns mycket ljus, i kontrast till hösten (Hari & Kulmala 2008). Med ett förändrat klimat kan tillgången till vatten bli en tillväxtbegränsande faktor, åtminstone regionalt, och det kan då motverka eller upphäva de positiva tillväxteffekterna av högre temperatur (Hari & Nikinmaa 2009). I stora delar av den boreala regionen är tillgången till kväve en tillväxtbegränsande faktor.

Högre koldioxidhalter i atmosfären kan direkt påverka trädens tillväxt, eftersom växterna använder koldioxid i fotosyntesen. Det är känt att tillgången på koldioxid kan vara begränsande för tillväxten, i synnerhet under goda ljusförhållanden. Det är dock inte givet att koldioxidhalter på nuvarande och förväntade nivåer leder till ökad fotosyntes. Det är inte heller säkert att ökad fotosyntes ger större tillväxt hos träden, eftersom interna mekanismer i träden eller skogen kan motverka koldioxidgödslingens effekt (Hari & Kulmala 2008).

Nedbrytning

Liksom trädens tillväxt är de mikrobiologiska processerna i marken starkt temperaturberoende. Nedbrytningen av organiskt material ökar med stigande temperatur. Det innebär inte bara att mer koldioxid frigörs, utan också att tillgången på kväve (och andra näringsämnen) i marken ökar, vilket kan öka skogens tillväxt (Hari & Kulmala 2008).

Även flödena av metan (CH_4) kan påverkas av ökad kvävefrisättning i marken, liksom av högre temperatur och ändrade nederbördsförhållanden, men kunskapen om detta är mycket begränsad (Pihlatie 2009).

Störningar

Störningar är en mycket viktig faktor för kolbudgeten i landekosystem. De innebär oftast stora förluster av kol till atmosfären genom att träd och annan växtlighet dör och bryts ned efter störningen. Skogsbränder, som är den dominerande störningsfaktorn i naturliga boreala skogsekosystem, innebär också ökad nedbrytning i marken. Storskaliga insektsangrepp och stormfällningar ger samma effekt på kolbudgeten (Juday m. fl. 2005). Det har ifrågasatts om mätningar av skogsekosystemens tillväxt eller direkta utbyte av koldioxid med atmosfären är relevanta i klimatsammanhang, eftersom de inte tar hänsyn till störningarnas stora betydelse. Man har visat att störningar spelar en huvudroll för de stora mellanårsvariationerna i den boreala skogens kolbalans (Magnani m. fl. 2007).

Återkopplingar till klimatet

Förändringar i de boreala skogarnas tillväxt och biomassa, liksom i markprocesserna, påverkar alltså kolets kretslopp och därmed atmosfärens innehåll av koldioxid och andra

växthusgaser. Klimatbetingade förändringar i skogsekosystemet har med andra ord återkopplingar till klimatet. Sådana återkopplingar kan vara positiva, det vill säga driva på den globala uppvärmningen, eller negativa, det vill säga bromsa uppvärmningen (Juday m. fl. 2005). Om återkopplingen mellan klimatet och skogarnas kolbalans totalt sett är positiv eller negativ – det vill säga om ett varmare klimat kommer att öka eller minska skogarnas kolbindning – råder det ännu skilda uppfattningar om inom forskarsamhället (Lagergren m. fl. 2006). I många fall tycks skillnaderna bero på tidsperspektivet och om man beaktar effekterna av storskaliga störningar eller inte.

Om analysen begränsas till hur varmare klimat och högre koldioxidhalt i atmosfären påverkar skogens tillväxt tenderar återkopplingen att bli negativ, det vill säga skogens kolbindning ökar. Man förutsätter då att skogen ostört fortsätter att reagera på förändringar i klimat och atmosfärskemi, och att den utvecklingen är representativ för skogslandskapet i stort. Tar man med effekterna av att bränder och andra störningar väntas öka förändras bilden. Frisättningen av kol på grund av ökad störningsfrekvens bedöms enligt många studier bli större än kolbindningen genom ökad skogstillväxt (*se vidare avsnitt 5*).

Andra samband mellan boreala skogar och klimat

De boreala skogarna kan påverka klimatet också genom mekanismer som inte direkt har med kolets kretslopp att göra. Här berörs kortfattat två sådana mekanismer.

Albedo

Inom meteorologin är albedo förhållandet mellan infallande solenergi och den del av solstrålningen som reflekteras tillbaka mot rymden, i molntäcket eller vid marken. Den del av solstrålningen som inte reflekteras tas upp av exempelvis marken eller växtligheten och omvandlas till långvägig värmestrålning. Den bidrar alltså till uppvärmningen. Om albedo minskar betyder det alltså att mer av den infallande solstrålningen omvandlas till värme, vilket ökar den globala uppvärmningen. Omvänt har ökad albedo en avkylande effekt.

Jordens albedo har alltså stor betydelse för värmebalansen. Förändringar i utbredningen av olika vegetationstyper eller av snötäckets varaktighet och utbredning kan förväntas påverka albedo, men sambanden är komplicerade och effekterna svåra att förutse.

Inget annat av jordens stora biom har lika stor påverkan på albedo som den boreala skogen. Dess mörka och ojämna yta absorberar en stor del av den infallande strålningen, medan slät och snötäckt tundra har högt albedo. Minskad utbredning av den boreala skogen och ökad brandfrekvens kan båda väntas dämpa uppvärmningen genom att de förändrar albedo (Juday 2005).

Ökad skogstillväxt betyder ökad barrmassa, vilket kan sänka skogslandskapets albedo. Samtidigt ökar transpirationen, det vill säga trädens avdunstning av vattenånga till atmosfären, vilket leder till ökad molnbildning (Räisänen & Smolander 2009). Molnbildningen kan som nämnts ovan också påverkas av utsläppen av VOC.

Dessa effekter kan vara av stor betydelse som balanserande faktor i det globala klimatsystemet. I ett kallt klimat kan den boreala skogens låga albedo ge en värmande effekt. I ett varmare klimat kan den tänkas avge så mycket vattenånga att den ökande molnbildningen ger en kylande effekt (Spracklen m. fl. 2008).

Lustgas

Nitrat i skogsmarken kan avgå till atmosfären som kvävgas, kvävemoxid eller lustgas (N_2O) i proportioner som avgörs av de kemiska förhållandena i marken (Nordin m. fl.

2009). Som växthusgas är lustgas 296 gånger mer kraftfull än koldioxid (Morén & Olsson 2007).

Lustgasbildning gynnas speciellt på marker där grundvattennivån är hög och varierande (Morén & Olsson 2007).

Utsläppen av lustgas från det boreala skogsekosystemet är omkring 0,5 Mt kväve per år, vilket sett till klimateffekten motsvarar drygt 0,1 Gt kol (beräknat från Pihlatie m. fl. 2009).

Utsläppen av lustgas från svensk skogsmark har beräknats till 4 700 ton, vilket sett till klimateffekten motsvarar närmare 0,0004 Gt kol. Dikade torvmarker står i princip för hela detta utsläpp (Bergkvist 2007).

Varmare klimat kan leda till ökade utsläpp av lustgas. Experiment med kvävegödsling har visat att skogsekosystem reagerar olika på kvävetillskott. Utsläppen av lustgas tycks i hög grad vara beroende av om skogens tillväxt är begränsad av tillgången till kväve eller inte när tillskottet kommer. I kvävebegränsade system tas det extra kvävet snabbt upp av växterna och lustgasutsläppen ökar bara tillfälliga strax efter tillskottet. System som redan läcker mycket lustgas svarar däremot starkt på kvävetillskott, och utsläppen ökar ytterligare. Om man antar att systemet svarar på samma sätt på det kvävetillskott som uppstår genom ökad nedbrytning av organiskt material till följd av högre temperatur kan man göra en grov uppskattning av lustgasemissionerna från boreala skogar. En finsk modellstudie har uppskattat att lustgasutsläppen i hela den boreala skogsregionen vid måttlig global uppvärmning skulle kunna bli 1,5 Mt kväve per år, vilket är omkring tre gånger så mycket som nuvarande emissioner (Pihlatie m. fl. 2009). Ökningen skulle, sett till klimateffekten, motsvara utsläpp av omkring 0,12 Gt kol, vilket alltså är i storleksordningen 10-20 procent av den totala kolbindningen i boreala skogar.

Dikning av beskogade torvmarker och gödsling av skog är åtgärder som kan påverka utsläppen av lustgas (*se vidare avsnitt 6*).

Skogen som klimatpolitiskt redskap

Principiellt finns det tre olika sätt att använda skogar för att hantera och påverka kolets globala kretslopp och därmed halten av koldioxid i atmosfären (Lindner & Karjalainen 2007):

- **Skydd.** Att skydda skogar är ett sätt att förhindra att deras existerande kolförråd frigörs och att bevara deras naturliga förmåga att binda kol. Här ingår åtgärder mot avskogning, ökade arealer av skogar i naturreservat och andra skyddade områden, samt åtgärder för att minska omfattningen av bränder och andra störningar som leder till minskade kolförråd.
- **Skogsskötsel för kolbindning.** Hur man väljer att sköta skogen och använda skogsprodukter har stor betydelse för den totala klimateffekten. Åtgärder för ökad skogstillväxt, till exempel gödsling, och nyanläggning av skog på tidigare obeskogade marker är två exempel. Andra möjligheter är att öka kolförråden i skogar och skogsprodukter, exempelvis genom förlängda omloppstider eller ökad livslängd för produkter.
- **Substitution.** Substitution innebär att skogsprodukter används för att minska användningen av fossila bränslen eller för att ersätta material som orsakar utsläpp av växthusgaser vid tillverkningen. Det kan ske genom att man använder trä som bränsle, men också genom att trä ersätter mer energikrävande material som stål eller betong i exempelvis byggnader.

De tre metoderna har olika potential att bidra till sänkta halter av koldioxid i atmosfären på kort respektive lång sikt.

Skydd är den mest effektiva metoden på kort sikt i områden där gamla skogar med stora kolförråd hotas av avverkning eller andra former av exploatering (som exempelvis utvinning av olja och naturgas).

Boreala skogar är naturligt utsatta för störningar – bränder, stormfällningar och angrepp av skadegörare – som innebär att kol återgår till atmosfären. På lång sikt når naturliga boreala skogslandskap ett tillstånd där avgången av kol genom störningar och nedbryt-

Hur säkra är siffrorna?

De siffror som ges för kolförråd och kolflöden i detta avsnitt uppvisar stor spännvidd. Det ger en bild av kunskapsläget. Trots långvarig och intensiv forskning råder fortfarande betydande osäkerhet om hur mycket kol som finns i världens skogsekosystem och om hur stor den årliga kolbindningen är.

Skillnaden mellan de högsta och de lägsta värdena som anges i litteraturen för den boreala skogens kolbindning är ungefär 0,5 Gt. Uppskattningar av de europeiska skogarnas kolbalans varierar lika mycket – från en källa på 0,1 Gt per år till en sänka på 0,46 Gt per år (Lindner m. fl. 2004). Skillnaden motsvarar nästan hälften av EU-ländernas totala kolutsläpp från fossila bränslen (Luyssaert m. fl. 2010).

Att kolbalansberäkningar ger olika resultat beror bland annat på metod och på vilka kolförråd och flöden man tar med. En omfattande studie av kolbalansen i Europas skogar baserad på såväl inventeringsdata, mätningar av koldioxidflöden som modellberäkningar, visar på mycket stor spännvidd beroende på vilken metod eller beräkningsgrund som används. Beräkningarna av nettoprimärproduktionen varierar mellan 439 och 574 gram kol per m² och år, alltså med drygt 30 procent (Luyssaert m. fl. 2010).

I Sverige och många andra länder kan kolförrådet i biomassan ovan mark, d v s den växande skogen, beräknas utifrån data om virkesförråd etc i skogsinventeringar (i Sverige Riksinventeringen av skog). För biomassan i skogsmarken finns inte lika bra data och beräkningarna blir därför mer osäkra. Kyotoprotokollet kräver också att andra kolförråd tas med i beräkningarna, till exempel organiskt kol i marken, och dessa mäts sällan med den noggrannhet som krävs. Problemet med att uppskatta förändringar i markens innehåll av organiskt kol är att förändringarna över tid är små i förhållande till kolpoolens storlek, samtidigt som kolinnehållet varierar mycket mellan olika jordar. Därför är det svårt att skala upp enstaka mätningar till nationell nivå (Lagergren m. fl. 2006).

Det finns teknik för att direkt mäta kolutbytet mellan skogar och atmosfären ("eddy covariance"). Tekniken är emellertid dyrbar och därför kan mätningarna bara göras på ett fåtal platser. I Sverige fanns 2006 åtta torn för sådana mätningar, vilket är långtifrån tillräckligt för att göra direkta beräkningar av skogarnas totala kolbalans. Det skulle krävas mätningar i skog av olika artsammansättning, åldersklass, markförhållanden, klimat m m för att möjliggöra detta (Lagergren m. fl. 2006).

Osäkerheten i Sveriges redovisning av kolutbytet i skogsbiomassan under klimatkonventionen har hittills varit omkring 20 procent av kolsänkans storlek. Osäkerheten i de svenska beräkningarna av förändringarna av kolförråden i förna och mark är bedömda till 70 respektive 35 procent (Lundblad m. fl. 2009). Siffrorna för Sverige är ändå jämförelsevis tillförlitliga, eftersom det finns detaljerade inventeringsdata för såväl växande skog som skogsmark i vårt land. Sverige är ett av få länder som har underlag för att objektivt skatta noggrannhet för upptag eller utsläpp av kol från levande biomassa. De allra flesta länder är hänvisade till subjektiva bedömningar (Lundblad m. fl. 2009).

Förutsägelser om hur kolbalansen i boreala skogar kommer att förändras är än mer problematiska. De måste utgå från att det inte blir några fundamentala förändringar i skogens sätt att fungera, trots att viktiga miljöfaktorer kommer att förändras utanför de gränser som vegetationen evolutionärt kunnat anpassa sig till. Insekts- och svampangrepp är exempel på företeelser i ekosystemen som har stor betydelse och de kommer att på sikt orsaka skador på ekosystemen som minskar kolbindningen. Detta betyder att våra uppskattningar av framtida kolbindning sannolikt ofta är för optimistiska (Hari m. fl. 2009).

I ett klimatpolitiskt perspektiv blir naturligtvis den stora vetenskapliga osäkerheten ett problem när länder räknar in kolsänkor i skogsekosystem eller skogsprodukter i sina utsläppsminskningar.

ning är lika stor – eller nästan lika stor – som kolbindningen i den levande biomassan. Kolförrådet i marken kan dock fortsätta att växa under tusentals år.

Skogsskötsel med inriktning på klimatnytta innebär i allmänhet att ekosystemets inbindning av kol per tidsenhet eller det totala kolförrådet ökar jämfört med ett alternativ utan de vidtagna åtgärderna. Ofta tar det dock tid innan åtgärderna ger effekt, och kortsiktigt kan effekten på kolbalansen vara neutral eller till och med negativ, till exempel på grund av att frisättningen av kol från marken under en tid efter en avverkning är större än inbindningen i den nya skogen. Oavsett vilka skötselmodeller som tillämpas når skogsproduktionen förr eller senare ett tak, där kolinbindningen inte kan öka mer. Detsamma gäller inbindning av kol i skogsprodukter. Förr eller senare bryts skogsprodukterna ner eller bränns. Om inte produktionen av trävaror ständigt ökar (vilket naturligtvis i det långa perspektivet inte är möjligt) uppstår därför vid någon tidpunkt ett jämviktstillstånd, där avgången från kolförrådet är lika stor som tillförseln.

Effekterna av substitution bygger på att skogsbränsle ger långt mindre utsläpp av växthusgaser än fossila bränslen. På samma sätt ger trä mindre utsläpp än andra byggnadsmaterial. Varje ton olja, stål eller betong som ersätts med trä antas minska utsläppen av koldioxid till atmosfären, jämfört med om substitutionen inte skett. Därigenom kan substitution, till skillnad från skydd och skogsskötsel, uthålligt ge stora bidrag till begränsningen av koldioxidhalterna i atmosfären – så länge man antar att det finns fossila bränslen att substituera. Substitution kan ske i flera led. Avverkningsrester kan användas som bränsle. Trä kan ersätta stål eller betong i byggnader, för att brännas när byggnaderna tjänat ut.

På beståndsnivå utesluter de tre metoderna delvis varandra. Om man vill bygga upp och bevara största möjliga kolförråd i växande skogar kan man inte samtidigt ta ut råvara för substitution. Skötsel kan däremot kombineras med substitution. Ökad skogsproduktion ger ökade volymer biomassa som kan användas för substitution. Varje skogsgeneration producerar virke vars substitutionseffekt adderas till tidigare generationers.

I ett större geografiskt perspektiv – regionalt eller nationellt – kan metoderna naturligtvis kombineras. Alla skogar kan och behöver inte skötas på samma sätt. Från klimatsynpunkt finns det som vi ska se exempelvis goda skäl att behandla äldre obrukade skogar annorlunda än produktionsskogar.

Som nämnts har metoderna olika effekter beroende på tidsperspektiv. Åtgärder som ger stor positiv effekt på växthusgasutsläppen på lång sikt kan ge liten eller rentav negativ effekt på kort sikt. I det rådande läget, där en mycket snabb minskning av utsläppen är nödvändig för att undvika dramatiska klimateffekter och en skenande uppvärmning, är detta en aspekt av central betydelse. En metod som ter sig optimal på 100 eller 200 års sikt kan vara kontraproduktiv i förhållande till vad som måste göras de närmaste decennierna.



4. Som man frågar får man svar – om systemavgränsningar

När man diskuterar samband mellan skog och klimat är det av avgörande betydelse hur man väljer att avgränsa det system man analyserar, i rum och tid. Olika avgränsningar kan leda till vitt skilda slutsatser om hur en viss åtgärd eller strategi påverkar flödena av växthusgaser och därmed klimatet.

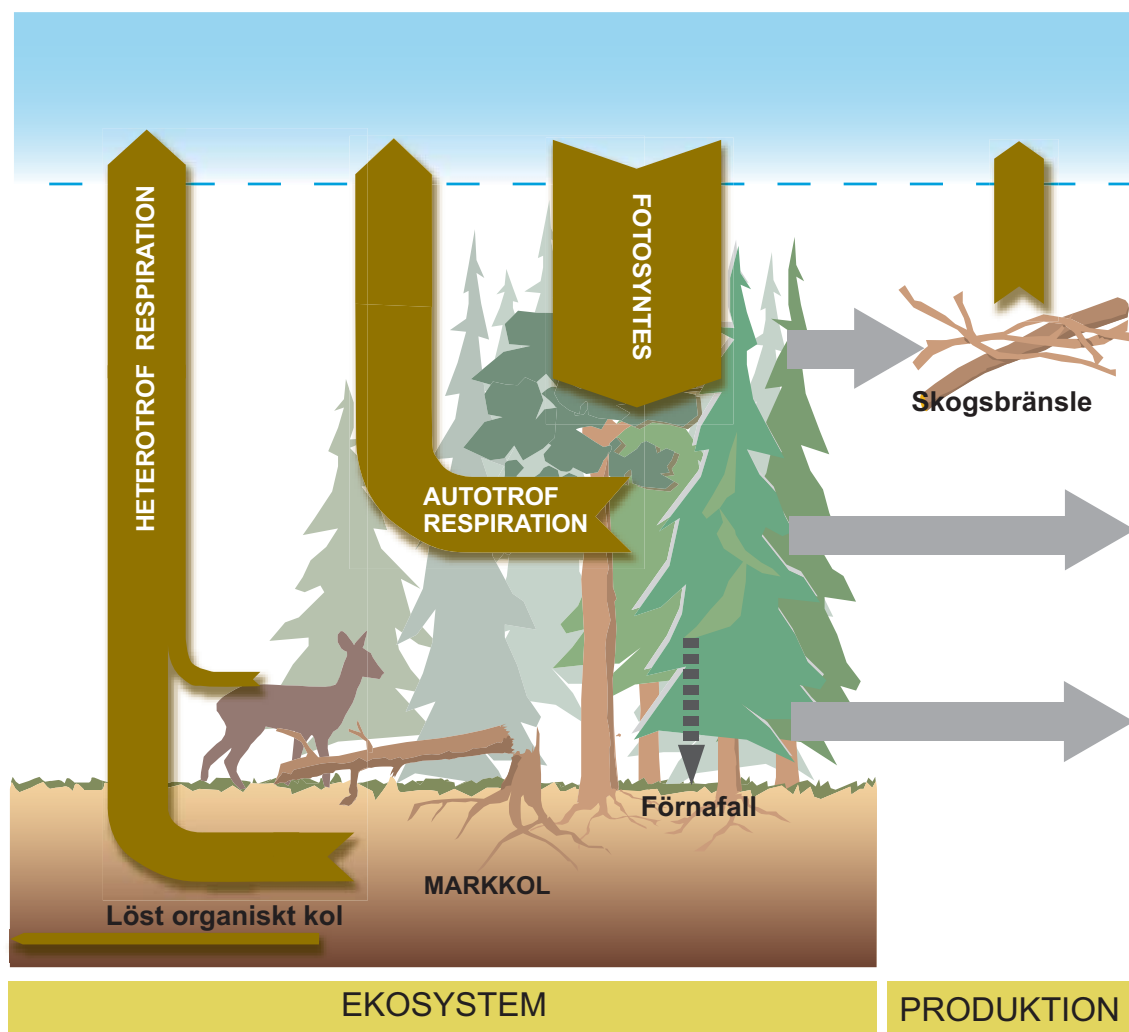
Bedömningar och beräkningar av hur ett varmare klimat kommer att påverka skogens tillväxt utgår ofta från ett beståndsperspektiv. Man begränsar sig då till hur det enskilda, växande skogsbeståndet reagerar på förändrad temperatur och/eller koldioxidhalt i atmosfären. Redan om man väljer att ta in skogsmarken och dess processer i systemet kan dock utfallet förändras, eftersom nedbrytarna i marken och därmed kolflödena också påverkas av klimatet. I ett större landskaps- eller ekosystemperspektiv kommer också bränder och andra naturliga störningar med i bilden, liksom skogslandskapets mindre produktiva och ibland trädlösa torvmarker. Samspelet mellan skogen och klimatet i obrukade skogar förstås bäst i detta ekosystemperspektiv.

I brukade skogsekosystem tillkommer en faktor av stor betydelse för kolbalansen, nämligen att människan tar ut biomassa genom avverkningar. När man diskuterar klimatkonsekvenserna av virkesuttag måste man göra klart för sig om analysen begränsar sig till det skördade virket, eller om man även tar in de effekter som avverkningen (och andra skogsbruksåtgärder som gjorts för att producera den skördade biomassan) ger upphov till. Det är till exempel känt att kalhuggning medför betydande frisättning av kol från skogsmarken (Lindroth m. fl. 2009).

Avgörande för vilken effekt en avverkning får för flödena av växthusgaser är dock hur det skördade virket används. Enligt de regler som hittills gällt för rapporteringen av kolsänkor under Kyotoprotokollet antar man att kolet i uttaget virke omedelbart återgår till atmosfären. Detta antagande är vanligt även i andra analyser. I praktiken används dock en del av virket exempelvis för att bygga hus. Det förblir då ett kolförråd under decennier, eller kanske till och med sekel, innan det slutligen ruttnar eller bränns. Vill man belysa den effekten måste man alltså ta in användningen av det skördade virket i det system man analyserar. Koldioxidutsläpp från skogsmaskiner, transporter av virke och skogsindustrins processer hör också hemma i detta perspektiv.

Man kan också välja att utöka det analyserade systemet med ytterligare en nivå, genom att räkna med effekterna av substitution. Biomassa från skogen kan användas som bränsle och ersätta kol och olja. De minskade koldioxidutsläpp som detta innebär kan räknas in i kalkylen. På motsvarande sätt kan man räkna med att trä ersätter andra byggnadsmaterial, exempelvis betong, som ger upphov till långt större koldioxidutsläpp vid tillverkningen. Utsläppsminskningarna till följd av minskad tillverkning av betong kan därför räknas in i kalkylen. Som vi ska se längre fram är substitutionseffekterna av avgörande betydelse för skogsbrukets totala klimatpåverkan.

Tidsaspekten är av lika central betydelse som den rumsliga avgränsningen av systemet. Nästan alla projektioner av klimatförändringar och konsekvenser av olika scenarier eller åtgärder har år 2100 som borte horisont, det vill säga ungefär en skogsgeneration i våra brukade skogar. Om vi ska lyckas begränsa den globala uppvärmningen till högst två grader är den kritiska tidsperioden betydligt kortare än så. Som nämnts måste utsläppen



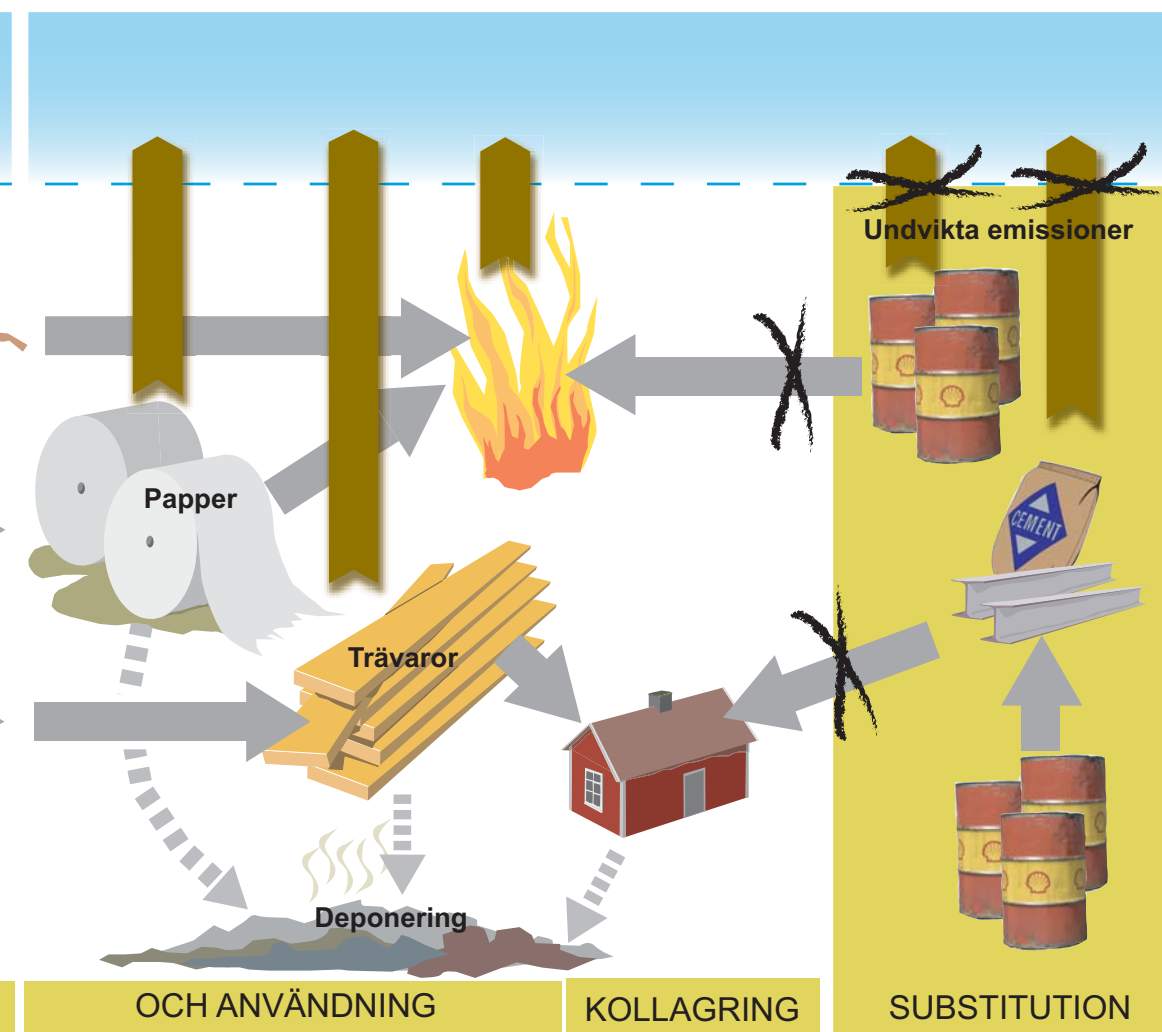
av växthusgaser då börja minska senast 2015 och ha begränsats med 50-85 procent år 2050. Få analyser av klimateffekterna av olika sätt att utnyttja skog och skogsprodukter beaktar detta kortare perspektiv. I skogen är hundra år en kort tid. Det är vanligt att analyser av klimateffekter rör sig med perspektiv på flera omloppstider, ofta 200-300 år, utan att för den skull beakta hur samhällsutvecklingen och ett förändrat klimat kan påverka skog, skogsproduktion, utvecklingen av byggnadsmaterial eller den globala energiförsörjningen i ett sådant tidsperspektiv (t. ex. Eriksson m. fl. 2007, Bergqvist & Olsson 2008, Olsson, M 2010, Sathre m. fl. 2010).

Vad som är ett klokt sätt att använda våra skogar från klimatsynpunkt i det långa perspektivet – hundra år eller mer – är inte nödvändigtvis det bästa alternativet även under den period som är helt avgörande för framtidens klimat, det vill säga de närmaste 30 åren. Vi återkommer till detta i följande avsnitt.

Systemavgränsningar i denna rapport

Den här rapporten växlar mellan olika systemavgränsningar. Strävan är att vara tydlig med vilka avgränsningar som görs och hur detta påverkar analys och slutsatser.

I avsnitt 5, som behandlar obrukade boreala skogar, är det system som analyseras ekosystemet inklusive skogsmarken. Så länge ingen biomassa tas ut ur skogen genom avverkning kan ekosystemet i praktiken ses som ett slutet system. De växthusgaser som avges av systemet hamnar i atmosfären, och de som tas upp av systemet försvinner ur



Figur 3. Samband mellan skog, skogsbruk och skogsprodukter i ett klimatperspektiv. I opåverkade skogar, där inget uttag av virke sker, avgörs klimateffekten av nettoflödet av växthusgaser mellan skogsekosystemet och atmosfären. Skogsekosystemet och atmosfären kan i praktiken ses som ett slutet system. När biomassa (virke) tas ut ur systemet påverkas inte bara kolbalansen i ekosystemet, utan genom skogsprodukternas hela livscykel. Det uppstår utsläpp av växthusgaser vid transporter, produktion och användning. Dessutom är de skördade skogsprodukterna ett kolförråd. Att räkna in effekterna av substitution innebär att man vidgar systemet ytterligare, genom att tillgodoräkna de utsläpp av växthusgaser som undviks genom att skogsprodukter (bränsle och trävaror) ersätter fossila bränslen och material som produceras med hjälp av fossila bränslen.

atmosfären. Nettoutbytet mellan ekosystemet och atmosfären avgör klimateffekten.

I avsnitt 6, som behandlar brukade skogar, diskuteras hur olika skogsbruksstrategier och åtgärder påverkar upptag och avgång av växthusgaser i skogen. Även här är alltså utgångspunkten ett ekosystemperspektiv. I brukade skogar är dock virkessuttaget och vad som sker med den skördade biomassan av långt större betydelse för klimatet än det som sker i skogsekosystemet. Det gäller i synnerhet substitutionseffekterna, som behandlas i avsnitt 8. Kollagring i skördade skogsprodukter behandlas i avsnitt 7.

Vad gäller avgränsningen i tid diskuterar rapporten även det korta perspektivet. Skälet är att våra möjligheter att begränsa uppvärmningen till högst två grader som nämnts avgörs under de närmaste decennierna. Om det misslyckas ökar risken för att klimatförändringen drivs på ytterligare av positiva förstärkningsmekanismer, som tinande permafrost och omfattande skogsdöd, med åtföljande utsläpp av växthusgaser till atmosfären. I en sådan situation kan förutsättningarna för de boreala skogarna och för skogsbruk i regionen förändras dramatiskt. Samtidigt krymper eller omintetgörs möjligheterna att hejda en skenande uppvärmning genom skogsbruk och klok användning av skogsråvara, eftersom de förändringar i kolflödena som de kan åstadkomma inte förmår kompensera de positiva förstärkningsmekanismernas enorma tillskott av växthusgaser till atmosfären.



5. Naturliga skogsekosystem

Den grundläggande skillnaden mellan naturliga och brukade skogar i klimathänseende är att det inte sker någon skörd av biomassa (genom avverkningar) i skogar där den naturliga dynamiken råder. Ingen biomassa lämnar systemet. Träd och andra växter som dör bryts ned, och det kol som lagrats i deras biomassa återgår antingen till atmosfären som koldioxid, eller binds i marken för kortare eller längre tid. Hur stor inlagringen av kol i marken är och hur snabbt nedbrytningen sker är av stor betydelse från klimatsynpunkt. Bränder, insektsangrepp och stormfällningar är naturliga störningar i boreala skogar och kan påverka kolflödena dramatiskt.

I detta avsnitt diskuteras de boreala skogarna huvudsakligen i ett globalt perspektiv, eftersom huvuddelen av de naturliga boreala skogsekosystemen finns i Nordamerika och Ryssland.

Skogens tillväxt

Effekter av varmare klimat

Det förefaller rimligt att varmare klimat skulle gynna tillväxten i boreala skogar, eftersom temperaturen och vegetationsperiodens längd är begränsande faktorer i ekosystemet. Studier av hur boreala skogar svarat på uppvärmningen hittills visar dock motstridiga resultat. Under de senaste decennierna har tillväxten ökat i vissa fall och minskat i andra, beroende på region, ståndort och trädslag. I några fall är de konstaterade tillväxtminskningarna stora. En förklaring kan vara stress orsakad av torka, som i sin tur är en följd av ett varmare klimat (Juday m. fl. 2005). Tillväxtstudier baserade på årsringar från träd över hela den boreala regionen har visat att negativ tillväxtrespons på temperaturhöjningar under 1900-talet är vanlig. Det förekommer över nästan hela det boreala området och hos en lång rad undersökta barrträdsarter. Minskad tillväxt är vanligare i den varmare delen av arternas utbredningsområden, vilket antyder att temperaturstress kan vara en bidragande faktor. På många håll förändrades trädens respons på temperaturhöjningar runt 1950. Sambandet försvagades eller skiftade i vissa fall från positivt till negativt (Lloyd & Bunn 2007). Med stigande temperatur kan negativa effekter på trädens och skogens tillväxt komma att bli vanligare, eftersom arter och ekosystem inte förmår anpassa sig till allt mer extrema miljöförhållanden (IPCC 2007d).

I delar av den boreala regionen påverkas skogstillväxten av kvävenedfall från antropogena källor. Det är svårt att särskilja dessa effekter från tillväxtförändringar som beror på klimatet (*se nedan*).

För boreala skogar i Kanada har det visats att de potentiella tillväxtökningarna till följd av ett varmare klimat kan förstärkas eller dämpas beroende på hur nederbördsförhållandena förändras (Kang m.fl. 2006 b).

Effekter av koldioxidgödning

Ökade halter av koldioxid i atmosfären skulle kunna öka trädens tillväxt, eftersom de gröna växterna använder koldioxid för sin fotosyntes. Det är dock inte givet att koldioxidhalter på förväntade nivåer leder till ökad fotosyntes (Bernes 2003). Växterna har inte kunnat anpassa sig evolutionärt till så höga koldioxidhalter och därför kan man inte förutsäga hur olika arter kommer att reagera (Hari m.fl. 2009).

Det finns försök, såväl i laboratorier som i fält, som visar att fotosyntesen ökar kraftigt om koldioxidhalten i den omgivande atmosfären höjs. Växterna verkar dock anpassa sig till de högre halterna, och inom några månader eller på sin höjd år återgår fotosynteshastigheten till den som råder vid normala koldioxidhalter. Fältförsök där hela träd fått växa i förhöjd koldioxidhalt under flera år har visat att den långsiktiga fotosyntesökningen är beroende av näringstillgången i marken (Eriksson, H 2007). Kvävetillgången kan alltså på samma sätt som när det gäller temperaturinducerad tillväxt vara en begränsande faktor. Detta gör prognoser över förväntad tillväxt till följd av koldioxidgödning osäkra (Hari & Kulmala 2009).

Kvävenedfall påverkar skogarnas kolbindning

Tillväxten i boreala skogar begränsas under naturliga förhållanden i allmänhet av tillgången på kväve i marken. Positiva tillväxteffekter i skog på grund av varmare klimat har konstaterats främst i områden där vatten och näringsämnen inte är begränsande faktorer, som i Europa och östra Nordamerika. Dessa delar av den boreala regionen ligger nära tätbefolkade och industrialiserade områden och är därför påverkade av kvävenedfall från antropogena källor. I delar av dessa områden är kvävenedfallet tio gånger större än den naturliga bakgrundsnivån. Antropogent kvävenedfall har beräknats påverka omkring 30 procent av den boreala skogsregionen (Hari & Kulmala 2008). I europeiska skogar har tillväxten generellt ökat sedan slutet av 1900-talet på grund av kvävedeposition (Lindner & Karjalainen 2007). I Sverige kan kvävenedfallet förklara upp till 70-80 procent av skillnaderna i kolbindning mellan skogar i södra och norra Sverige (Morén & Olsson 2007).

Nedfallet av kväve från luftföroreningar har alltså stor betydelse för skogens tillväxt och för hur den kommer att reagera på ett varmare klimat. Modellstudier har visat att nedfallet av antropogent kväve kan orsaka en ökad kolbindning på 0,44-0,74 Gt per år i världens landecosystem, huvudsakligen i boreala och tempererade skogar (Magnani m.fl. 2007). Som nämnts ovan är dock bara en mindre del av den boreala skogsregionen påverkad av kvävenedfall från antropogena källor.

Utsläppen av kväveoxider inom EU minskade med 39 procent mellan 1990 och 2008 (EEA 2010). Enligt de flesta utsläppsscenarier kommer nedfallet av kväve över Europa att fortsätta minska under de närmaste decennierna (Luyssaert m.fl. 2010). Det är innebär att kvävenedfallets effekt på skogstillväxten kommer att klinga av.

Förändringar i ekosystem och vegetationstyper

Många modellstudier visar att klimatzonerna på norra halvklotet skulle förflyttas omkring 500 km norrut vid en global uppvärmning på 2 °C år 2100 (Kirilenko & Sedjo 2007). Man skulle kunna föreställa sig att de boreala skogarna svarar på en sådan förändring genom att följa med klimatzonerna norrut. Det finns en rad studier baserade på vegetationsmodeller som skisserar sådana scenarier. Modellerna förutsätter dock att varje trädslag kommer att växa överallt där klimatet är lämpligt, vilket i praktiken är högst osannolikt, åtminstone i ett så kort perspektiv som hundra år (Aitken m.fl. 2008). Orsaken är att en förflyttning av de skogbildande trädens utbredningsområden med i genomsnitt 5 km per år vida överstiger arternas naturliga spridningsförmåga, som i genomsnitt är 200-300 meter per år (IPCC 2007 c). Enstaka individer kan naturligtvis sprida sig snabbare än så och etablera utposter som fungerar som utgångspunkter för fortsatt spridning, men det betyder inte att skogsekosystemet kan migrera norrut i takt med klimatförändringen. De förändringar som för närvarande kan ses exempelvis i Alaska och vid trädgränsen i den skandinaviska fjällkedjan tyder snarare på seklång eftersläpning (IPCC 2007 d, Kullman & Öberg 2009, Lloyd 2005).

Ett mer sannolikt scenario är att höga temperaturopppar under sommaren i kombination med vattenbrist leder till ökad stress, minskad motståndskraft mot skadegörare och sjukdomar och därmed dödlighet hos träden. I kombination med förändrade störningsregimer – ökad frekvens och omfattning av bränder och insektsangrepp – kan detta leda till omfattande skogsdöd som förvandlar boreala skogsområden till halvöppna, savannliknande landskap eller öppna gräsmarker. Det skulle i sin tur innebära att mycket stora mängder koldioxid från skog och skogsmark skulle frigöras till atmosfären. Omfattande boreal skogsdöd har pekats ut som en av de kritiska tröskeffekter som skulle kunna förstärka den globala uppvärmningen i en ond cirkel om temperaturen stiger över en viss tröskelnivå. Som tröskelnivå har i detta fall föreslagits 3–5 graders höjning av den globala medeltemperaturen, men den siffran är mycket osäker (Lenton m.fl. 2008).

Naturliga störningar

Såväl brandfrekvensen som insektsangreppen har ökat i boreala skogar under de senaste decennierna, och fortsatt uppvärmning väntas förstärka den trenden (Balshi m. fl. , Kurz m. fl. 2008a, Kurz m.fl. 2008b). Fler extrema väderhändelser i det framtida klimatet kan också komma att öka stormfällningarna (Lindroth m.fl. 2008).

Bränder

Bränder spelar en huvudroll i kolets kretslopp i den boreala zonen genom att frisätta kol inte bara under utan också efter branden. Sammantaget kan de direkta och indirekta kolflödena från skogsbränder i den boreala zonen utgöra mer än 20 procent av de globala utsläppen från brinnande biomassa (Juday m.fl. 2005). Förändringar i brandregimen har visats vara helt avgörande för kolbalansen i ett kanadensiskt borealt landskap under en halvsekelång period (1948–2005) (Bond-Lamberty m.fl. 2007).

Skogsbrandfält kan förbli en kolkälla under omkring 30 år efter branden. Försök i boreala skogar i Alaska har visat att omkring 20 procent av kolet i markens översta skikt förloras till atmosfären genom nedbrytning under de första 20–30 åren efter en brand på grund av förhöjd marktemperatur (Juday m. fl. 2005).

I Nordamerikas boreala region ökade den totala skogsbrandarealen med en faktor 2,5 mellan 1960- och 1990-talet. I västra Nordamerika fördubblades brandarealen under de sista 20 åren av 1900-talet (Juday 2005). Enligt ryska data var skogsbrandytan 29 procent större under 1990-talet än under 1980-talet. Rysk officiell skogsbrandstatistik är dock problematisk, och uppskattningar baserade på satellitdata ger genomgående mycket högre siffror. Såväl statistik som satellitdata visar dock att skogsbrandytan har ökat sedan 1998 (Soja m.fl. 2007).

Utsläppen av kol från skogsbränder i Nordamerika beräknas ha fördubblats från 1960-talet till 1990-talet, från omkring 0,03 Gt per år till över 0,06 Gt. I Eurasien beräknas utsläppen ha ökat från 0,1–0,2 Gt per år 1996/97 till närmare 0,5 Gt 2002 (Kang m.fl. 2006 b).

Resultat från modellstudier tyder på att skogsbränderna kommer att fortsätta att öka i antal och omfattning i takt med den globala uppvärmningen (Juday 2005, Olsson, R 2010). Antalet dagar med hög brandrisk i Rysslands boreala zon beräknas öka med 12–30 procent om den globala medeltemperaturen stiger med 2,4 °C (Malevsky–Malevich m. fl. 2008). Om uppvärmningen når +4 °C kan skogsbrandytan i Nordamerika komma att öka med 74–118 procent till år 2100 (Flannigan m. fl. 2009).

En modellstudie har visat, att en ökning av den brandhärjade ytan med 50 procent kan innebära en ökad tillförsel av kol till atmosfären med 0,33–0,8 Gt per år under de närmaste 50–100 åren, beroende på brandfrekvens och på vilket antagande man gör om

fördelningen av markens kollager mellan organiska jordar och mineraljordar i marken (Kasischke m.fl. 1995). Modellstudier för 2,4-3,4 °C uppvärmning visar att kolutsläppen till atmosfären från skogsbränder kan komma att öka med 2,5 - 4 gånger jämfört med 1990-talet. Det riskerar att driva på uppvärmningen ytterligare, vilket i sin tur skapar förutsättningar för än mer omfattande skogsbränder (Soja m. fl. 2007).

Samtidigt kommer ökad brandfrekvens att öka den boreala zonens albedo, vilket har en nedkylande effekt (Goetz m. fl. 2007). Det finns åtminstone en studie som tyder på att den negativa återkopplingen genom albedo skulle vara större än den positiva genom kolförluster, sett över en hel skogsbrandcykel på 80 år (Bonan 2008).

Insektsangrepp

Omfattande insektsangrepp, som skadar eller dödar skog över stora arealer, är liksom bränder en naturlig störning i boreala skogar. Sett till den yta som påverkas är insekts-attacker en mer omfattande störning än bränder. I östra Ontario, Kanada, angrep bredvecklare (spruce budworm, *Choristoneura*) en 20 gånger större skogsareal än den som brann mellan åren 1941 och 1996 (Volney & Fleming 2007). I British Columbia pågår sedan många år det största utbrottet någonsin av contortabastborre (*Dendroctonus ponderosae*) (Kurz m. fl. 2008a). Angreppet av en spinnare (sibirian silk moth, *Dendrolimus superans sibiricus*) i Krasnoyarsk-regionen i Sibirien under 1990-talet innebar förlust av 50 miljoner m³ timmer, vilket motsvarar sju årsavverkningar i regionen (Olsson 2010). Ännu större angrepp har förekommit under de senaste 100 åren (Soja m. fl. 2007).

Insektsattackerna förväntas öka i såväl frekvens som intensitet med klimatförändringarna, dels på grund av direkta effekter på insektspopulationerna, dels genom störningar i skogsekosystemens interaktioner (Stireman m. fl. 2005).

Omfattande och ökande insektsangrepp påverkar de boreala skogarnas kolbalans i samma riktning som bränder och effekterna kan vara stora. Döda och skadade träd över stora arealer minskar skogens upptagning av koldioxid, samtidigt som utsläppen ökar när den döda veden efterhand bryts ned. Bastborreangreppet i British Columbia har förvandlat 37 miljoner ha skog från en liten kolsänka till en betydande kolkälla. Under angreppets toppår motsvarade dess påverkan på kolbalansen 75 procent av alla skogsbränder i Kanada (Kurz m. fl. 2008a).

Medan omfattande bränder främst förekommer i naturliga skogsekosystem, drabbar omfattande insektsangrepp också brukade skogar.

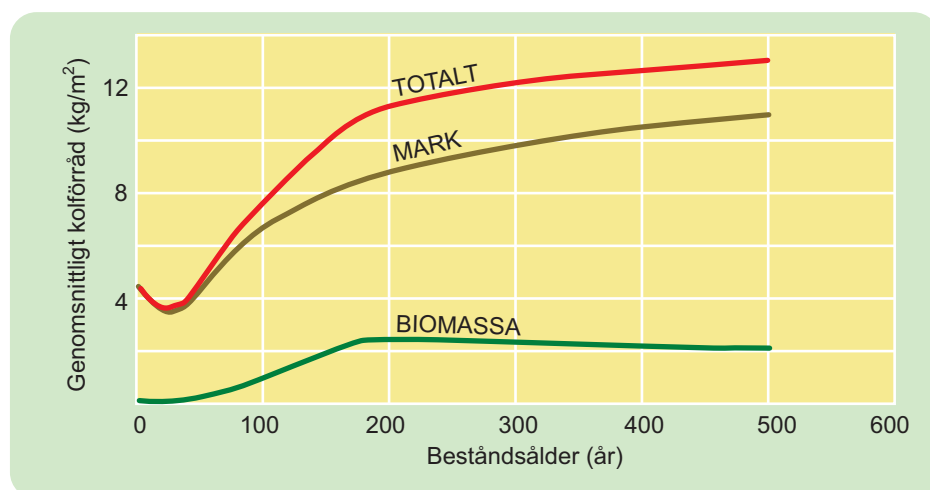
Stormfällningar

Antalet extrema väderhändelser, inklusive stormar, väntas öka i den boreala regionen som följd av den globala uppvärmningen (IPCC 2007a). Det innebär med stor sannolikhet att omfattningen av stormfällningar och stormrelaterade skogsskador kommer att öka, vilket får konsekvenser för skogens kolbalans.

De data som finns rörande effekterna av stormfällningar är främst från brukade skogar. (Se vidare avsnitt 6.)

Boreala naturskogar som kolsänkor

Det har varit en utbredd uppfattning att gamla skogar är koldioxidneutrala, det vill säga att de slutar fungera som kolsänkor. En genomgång av befintliga data visar dock att detta inte är fallet. Tempererade och boreala ostörda naturskogar fortsätter vanligen att binda kol även när de är flera hundra år gamla. Även 800 år gamla skogar kan fungera som kolsänkor (Luyssaert m. fl. 2008). Nyligen har rapporterats att skogar med flertusenårig kontinuitet på öar i norrländska sjöar fortsätter att fungera som kolsänkor genom kolin-



Figur 4. Kolförrådets utveckling i en skog av svartgran i Alaska. Kolförrådet i biomassan är som störst när skogen är runt 200 år gammal, medan det totala kolförrådet fortsätter att växa ännu efter 500 år, tack vare kolupplagring i marken. Diagrammet bygger på uppskattningar och ger en principiell bild av utvecklingen. (Efter Kasischke m.fl. 1995).

lagring i marken. Över 90 procent av kolförrådet i dessa skogar är markkol (Johnsson & Wardle 2010).

Hälften av världens återstående gamla naturskogar finns i de tempererade och boreala zonerna, och huvuddelen av dessa skogar finns i sin tur i norra delen av den boreala zonen. De beräknas binda 0,8-1,8 Gt kol per år, vilket är omkring 10 procent av de globala ekosystemens kolbindning.

Eftersom gamla skogar fortsätter att binda kol i hundratals år innehåller de mycket stora mängder. Stora delar av detta kolförråd kommer att avgå till atmosfären om skogarna avverkas eller störs på annat sätt (Luyssaert m. fl. 2008, Kang m. fl. 2006 a).

Även om de boreala naturskogarna delvis skyddas av sin otillgänglighet pågår fragmentering, avskogning och exploatering (bland annat gruvarbete, torvbrytning och dammbyggen) som på sikt undergräver deras roll som kolsänka och kolförråd. Bara en liten del av de boreala skogarna (mindre än 10 procent) har någon form av formellt skydd. Med fragmentering och ökad mänsklig närvaro blir också skogsbränder orsakade av människor vanligare, särskilt i Sibirien. I Rysslands skogar brann 7,5 miljoner ha skog 2002 och 14,5 miljoner ha 2003. Huvuddelen av dessa bränder orsakades av människor (Bradshaw m. fl. 2009).

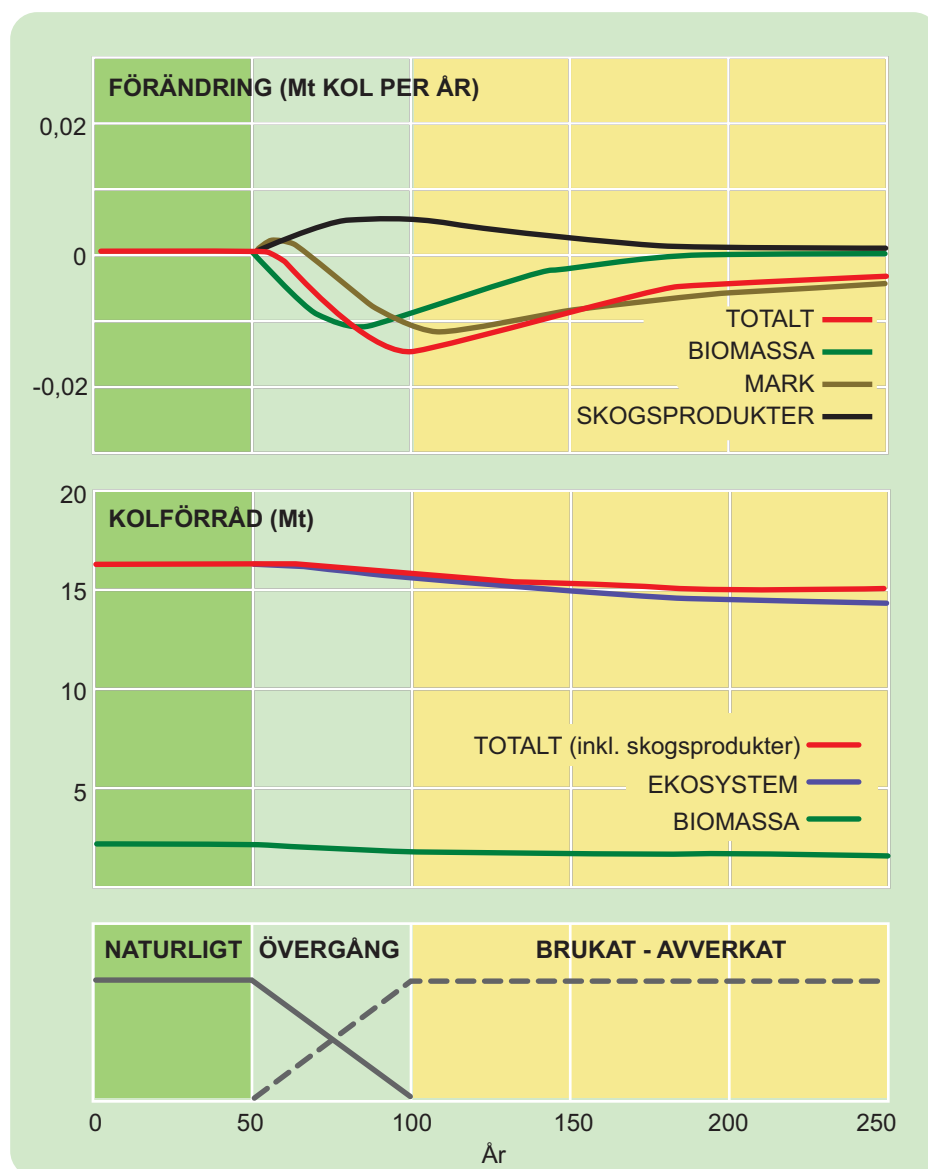
Bruka eller skydda naturskogar?

De boreala urskogarna har mycket större kolförråd än brukade skogar, främst i marken men även i den växande skogen (Lindner & Karjalainen 2007). Gamla skogar binder mindre kol per tidsenhet än yngre (som har större tillväxt), men de är inte – vilket ofta hävdas – koldioxidneutrala. Även flerhundraåriga skogar kan som nämnts vara kolsänkor. Hur de kommer att påverka klimatet beror på hur snabba och omfattande förväntade förändringar av de naturliga störningsregimerna kommer att bli, vilket i sin tur avgörs av klimatförändringen.

Det kan vara värt att notera, att av de svenska skogarnas kolbindning i virkesförrådet under den närmaste 20-årsperioden beräknas 70-90 procent ske i reservat och på hänsynsmarker, det vill säga oftast äldre skog som av naturvårdsskäl är undantagen från avverkning (Lundström m. fl. 2009).

En risk med att lagra kol genom bevarande av boreala skogar är att förändrade störningsregimer (bränder, insektsangrepp och stormfällningar) kan leda till att delar av kolförråden frisätts. Den risken ökar över tid och ju större uppvärmningen blir. Att ersätta naturliga störningsregimer med skogsbruk, där avverkning är den dominerande

Figur 5. Förändringar i årliga kolföden (överst) och kolförrådet (mitten) i ett borealt skogslandskap i Kanada vid omföring från naturskog till brukad skog. Under år 0-50 är skogen obrukad och naturliga störningsregimer råder (med en störningsfrekvens på 80 år). Under år 50-100 ersätts naturliga störningar gradvis av avverkning, i samma omfattning men med längre omloppstid (120 år). Resultaten bygger på modellsimuleringar. De växthusgasutsläpp som uppstår i samband med processer, transporter och användning av det avverkade virket ingår inte i analysen. Studien tar hänsyn till kolinlagring i skördade skogsprodukter, men inte till substitutions-effekter. (Efter Kurz m. fl. 1998).



störningen, är dock inte en lösning på det problemet. Om den gamla skogen avverkas kommer kolbindningen temporärt att upphöra, men viktigare är att delar av kolförrådet kommer att avges till atmosfären. Eftersom kollagen i såväl mark som biomassa är större än i en brukad skog blir också koldioxidavgången till atmosfären större vid en avverkning och det tar lång tid för en ny skogsgeneration att binda motsvarande mängd kol.

En kanadensisk modellstudie indikerar hur kolbudgeten påverkas när naturliga skogar omförs till brukade. Studien omfattade sex 100 000 ha stora skogslandskap, varav ett var boreal skog i östra Kanada. I utgångsläget räknade man med de naturliga störningarnas effekter på kolbalansen. Under en femtioårsperiod ersattes därefter naturliga störningar gradvis med avverkning, varefter systemen följdes under ytterligare 150 år. Resultaten visar, att omföring av naturliga skogsekosystem till brukade innebär nettoförluster av kol till atmosfären även på mycket lång sikt. I det boreala skogsekosystem som ingick i studien var förlusten på ekosystemnivå omkring 12 procent 2000 år efter att man börjat avverka. Under den femtioåriga övergångsfasen var kolförlusterna mycket större (se figur 5) (Kurz m. fl. 1998).

Det bör understrykas att detta är resultat av en modellstudie, och att det finns skillnader

mellan skogsbruket i Kanada och Skandinavien som kan ha betydelse för kolflödena. Utfallet skulle också kunna påverkas av olika anpassningar av skogsskötseln. Resultaten är ändå intressanta, inte minst i det medellånga perspektivet (50-100 år), eftersom effekterna är så kraftiga.



6. Brukade skogsekosystem

I brukade skogsekosystem är uttaget av virke normalt den dominerande störningen. Skogens kolbalans påverkas dessutom på olika sätt av skötselåtgärder som exempelvis markberedning, trädslagsval och gödsling. De naturliga störningarna påverkas också genom skogsskötsel. Framför allt är brandfrekvensen mycket lägre än den naturliga i flertalet brukade boreala skogar. Risken för stormfällningar och angrepp av skadegörare kan såväl minska som öka till följd av skogsbruksåtgärder.

En fundamental skillnad mellan naturliga och brukade skogsekosystem är att biomassa tas ut ur systemet i de senare, genom avverkning. Från klimatsynpunkt är det av avgörande vad som sker med den skördade virket. Om trä används exempelvis som byggnadsmaterial kan det dröja många decennier eller kanske sekel innan det slutligen bryts ned eller bränns, så att kolet frigörs. Skogsbiomassa kan också, som nämnts tidigare, användas för att minska användningen av fossila bränslen, antingen genom att direkt ersätta kol, olja eller fossilgas, eller också genom att trä ersätter andra material som tillverkas med hjälp av fossila bränslen (exempelvis betong eller stål).

Fokus i detta avsnitt ligger på skog och skogsbruk i Sverige, men med några utblickar till andra länder.

Klimateffekter på skogstillväxten

I större delen av Sverige är temperaturen normalt begränsande för skogstillväxten, och man kan därför förvänta sig att ett varmare klimat ökar tillväxten. I försök där man värmt upp skogsmarken i medelålders granskog i Västerbotten 5 °C över den naturliga nivån nästan fördubblades trädens stamvolymtillväxt över sex år. Beräkningar visar att produktionen i svensk skog kan komma att öka med 5-14 procent fram till år 2040 till följd av ett varmare klimat. Längre fram väntas produktionen öka ännu mer (*se tabell 2*) (Bergh m.fl. i Eriksson 2007).

Ökad skogstillväxt innebär att biomassan ökar och därmed att mer kol binds i den växande skogen. Det förutsätter dock att inte avverkningen ökar i samma trakt och att det inte sker något produktionsbortfall till följd av ökade skador genom bränder, skadegörare och stormfällningar. Den modell som använts för tillväxtprognoserna räknar inte med effekter av förändrade störningsregimer (Eriksson 2007), eftersom det saknas data som gör det möjligt att inkludera sådana effekter. Man måste alltså hålla i minnet att utfallet av beräkningarna inte ger en fullständig eller realistisk bild av den utveckling som kan förväntas.

Man bör också hålla i minnet att ökad volymtillväxt hos skogsträden inte är liktydigt med ökad biomassatillväxt, och därmed inte heller med ökat energiinnehåll eller ökad kolinlagring. Snabbare tillväxt innebär ofta att vedens täthet minskar. Fördubblad tillväxt kan innebära att tätheten minskar med 20 procent (Lundgren, C o.daterad).

Naturliga störningar i brukade skogar

Som vi sett är naturliga störningar en faktor av fundamental betydelse för ekologi och kolbalans i naturliga boreala skogar. I brukade skogar kan de i större eller mindre utsträckning kontrolleras och begränsas, men det förefaller ändå sannolikt att klimatförändringarna kommer att påverka störningsregimerna även här på ett sätt som kommer

Tabell 2. Relativ produktionshöjning i Sveriges skogar (procent) för 2,5 och 4,5 °C global uppvärmning (IPCC:s scenarier B2 och A2). I det varmare A2-scenariot väntas granens produktionsökning stagnera eller till och med sjunka mot slutet av seklet. Klimatet blir för varmt för att passa granen. (Bergh m fl i Eriksson 2007.)

Period	Produktionsökning (%)	
	Scenario B2	Scenario A2
2011 - 2040	5	14
2041 - 2070	14	25
2071 - 2100	24	31

att få betydande konsekvenser för kolbalansen. Det finns exempel som visar att enstaka väderhändelser redan i dag ger sådana effekter. Den extrema värmen och torkan över Europa sommaren 2003 beräknas ha minskat växtlighetens kolbindning med omkring 30 procent, vilket innebär att den förvandlades till en kolkälla på omkring 0,5 Gt per år. Det är lika mycket som fyra års kolbindning i ekosystemen under normala väderförhållanden (Ciais m. fl. 2003).

Bränder

I Sveriges skogar har brandfrekvensen minskat dramatiskt. I dag är brandfrekvensen för ett enskilt skogsbestånd lägre än en brand per 1 000 år, mot en brand per 50-200 år vid 1900-talets början. Att det brinner mindre beror både på effektivare brandbekämpning och en skogsskötsel som minskar brandrisken, bland annat genom att mängden torr, död ved i skogen minskat kraftigt. Under 1950-talet och 1960-talet ökade skogsbränderna tillfälligt. Till följd av förbättrad brandbekämpning har de därefter åter minskat i antal och omfattning.

Risken för skogsbrand kommer sannolikt att öka i hela landet till följd av fler heta sommarperioder med stort vattenunderskott. Mest kommer brandrisken troligen att öka i Götaland, där somrarna i genomsnitt blir torrare (Lagergren m. fl. 2006).

Stormfällningar

Vind är den störning som orsakat störst skador inom europeiskt skogsbruk under 1900-talet. Skadornas omfattning varierar stort mellan åren, men det finns en trend att de blivit allt mer omfattande under 1900-talet. Åtminstone för södra Sverige, där stormskadorna varit störst, kan detta inte förklaras med att stormar blivit vanligare. En bidragande faktor kan däremot vara att den stående volymen skog ökat och att trakthyggesbruket skapat stormkänsliga hyggeskanter. Ett mildare och blötare klimat minskar dessutom skogens stabilitet. Andelen gran, ett trädslag som är jämförelsevis känsligt för storm, ökade dessutom i landskapet fram till 1990-talet. Klimatförändringarna kan förväntas påverka risken för vindfällning både direkt genom förändrat klimat och indirekt genom ett förändrat skogstillstånd. Hur vindkänsliga framtidens skogar blir kan påverkas av trädslagsval och skötselmetoder (Eriksson 2007).

Stormen Gudrun, som drog fram över södra Sverige i januari 2005, vindfällde 66 miljoner m³ stamved över en yta på omkring 2 720 km². Kolförlusterna från den stormfällda arealen under det första året efter stormen var mångdubbelt större än från kalhyggen, per ytenhet räknat. De totala kolutsläppen till atmosfären till följd av Gudrun beräknades till 2,3–3,4 Mt under det första året efter stormen. Därtill kommer effekten av utebliven kolbindning från den stormfällda skogen, som beräknats till 0,4 Mt per år (Lindroth m. fl. 2009). Sammantaget innebär detta att kolsänkan i den svenska skogen i runda tal halverades. Stormen Lothar, som drog fram över Europa 1999, beräknas ha minskat kolupptaget i Europas skogar med 16 Mt. Detta visar att effekterna av stormfällningar på grund av ökad stormfrekvens måste beaktas vid bedömningar och beräkningar av skogens roll i framtida kolbalanser (Lindroth m. fl. 2009).

Mildare och blötare vinterklimat i framtiden leder till minskad stabilitet. Hur vindkän-

lig den framtida skogen blir påverkas av skogsskötsel, trädslagsval och rumslig planering. Gallring kan påverka trädens höjd och form, antal stammar per ytenhet och rotningsförhållanden. Modellstudier visar, att utan förändrade bruksmetoder leder förväntade klimatförändringar till ökad vindkänslighet hos Sveriges skogar (Blennow 2007).

Insekts- och svampangrepp

Flera skadegörare i svensk skog kan förväntas gynnas av ett varmare klimat. Till dem hör den skadegörare som redan i dag orsakar svenskt skogsbruk de största förlusterna, nämligen rottickan. Kalhyggesbruk och åretruntavverkningar har bäddat för en ökning av rotröteangreppen under de närmaste decennierna. Ett varmare klimat kommer med stor sannolikhet att driva på den utvecklingen ytterligare. Den form av rotröta som angriper tall kan väntas sprida sig norrut (Eriksson 2007).

Andra patogena svampar som kan komma att gynnas av ett varmare klimat är *Greminiella*, knäckesjuka och tallskyttesvamp. Vad gäller *Greminiella* förefaller riklig nederbörd under ett enskilt år kunna utlösa en storskalig epidemi. Klimatförändringarna kan också leda till att nya skadesvampar kan komma att etablera sig i Sverige (Eriksson 2007).

Såväl den åttatandade barkborren som snytbaggen, de båda insekter som orsakar störst skada för svenskt skogsbruk, kommer troligen att gynnas av klimatförändringarna. Barkborren är från klimatsynpunkt den allvarligaste skadeinsekten, eftersom den angriper gamla träd, som binder mycket kol. Granbarkborren gynnas av tre samverkande biologiska mekanismer:

- ökad stormfrekvens ger fler vindfällen, som är perfekt yngelmateriel för granbarkborren.
- granar stressas av värme och torka, medan barkborren gynnas av värme.
- varmare klimat förlänger säsongen för barkborren.

2006 och 2007 hann barkborren utveckla två generationer under samma sommar i Sverige. Det är ett scenario som länge varit en farhåga och som antagits kunna bli verklighet mot slutet av detta sekel, men som alltså redan inträffat (Schlyter 2008). Under för barkborren gynnsamma betingelser kan detta leda till mångdubblad populationsstorlek och därmed betydligt allvarligare angrepp än i dag (Eriksson 2008).

Angrepp av skadegörare innebär att skogens tillväxt och därmed kolbindningen minskar, även om skogen överlever. Om skogen dör blir den en kolkälla när den döda veden efterhand bryts ned. Två stora insektsattacker beräknas i kombination med andra störningar förändra Kanadas brukade skogar från kolsänka till kolkälla, vars omfattning har beräknats till mellan 0,030 och 0,245 Gt kol under åren 2008–2012. Detta visar att strategier för att påverka brukade skogars kolbalans genom skötselåtgärder kan omtintgöras genom öknings i naturliga störningar (Kurz m. fl. 2008 a).

Skogsbruksmetoder i klimatperspektiv

Avverkning och markberedning

Vid en avverkning transporteras en stor del av trädbiomassan och dess innehåll av kol bort ur skogen. Men den största delen av skogens totala kolförråd finns i marken, som utsätts för ljus, värme och syre på kalhygget, i synnerhet i samband med markberedning. Nedbrytningen i marken ökar, vilket leder till ökade utsläpp av koldioxid från skogsmarken. Det gör hygget till en kolkälla under upp till 15 eller 20 år, även om ny skog anläggs så snart som möjligt efter avverkningen. Det tar ytterligare ett par decennier för den växande skogens kolbindning att kompensera för dessa utsläpp. Först 30–40 år efter

planteringen är kolbalansen återställd till utgångsläget vid skörden (Lindroth m. fl 2009, Grelle 2010).

En skog med trakthyggesbruk förlorar alltså en stor del av markkolet vid varje avverkning. Kollagret byggs upp igen under skogens uppväxt, men uppbyggnaden sker långsamt och kolförråden i marken blir aldrig lika stora som i skogar som inte kalhuggs (Grelle 2010). Detta indikerar att man avsevärt skulle kunna öka nettoupptaget av koldioxid i Sveriges skogar genom att undvika hyggesfasen och i stället bedriva ett hyggesfritt skogsbruk.

Kontinuerliga avverkningsmetoder, där man inte kalhugger utan regelbundet tar ut en viss andel träd ur skogen, har andra effekter på skogens kolbalans än hyggesbruk. Man undviker hyggesfasen med dess stora kolförluster och upprätthåller istället en kontinuerlig kolsänka. Koldioxidupptaget i den växande skogen påverkas knappast alls av små uttag av biomassa, eftersom de träd som blir kvar gynnas av minskad konkurrens. Därför är hyggesfritt skogsbruk bättre i ett klimatperspektiv, trots att tillväxt och skörd blir något mindre än i kalhyggesbruk. Kolförrådet i den hyggesfria skogen är i allmänhet något större än i skogar i hyggesbruk (Grelle 2010). Kontinuerliga avverkningsmetoder kommer att försvåra och fördyra uttag av avverkningsrester, vilket innebär att potentialen för substitution av fossila bränslen blir mindre.

Gallring kan, sett till effekten på skogens kolbalans, likställas med hyggesfri avverkning. Kolupptaget påverkas knappast alls av en normal gallring (Lindroth 2009).

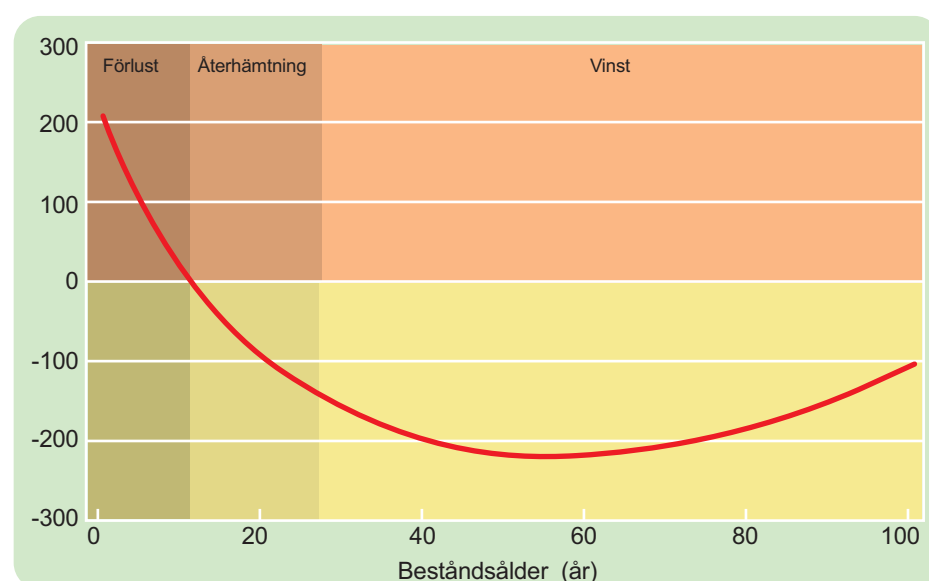
Omloppstidens betydelse

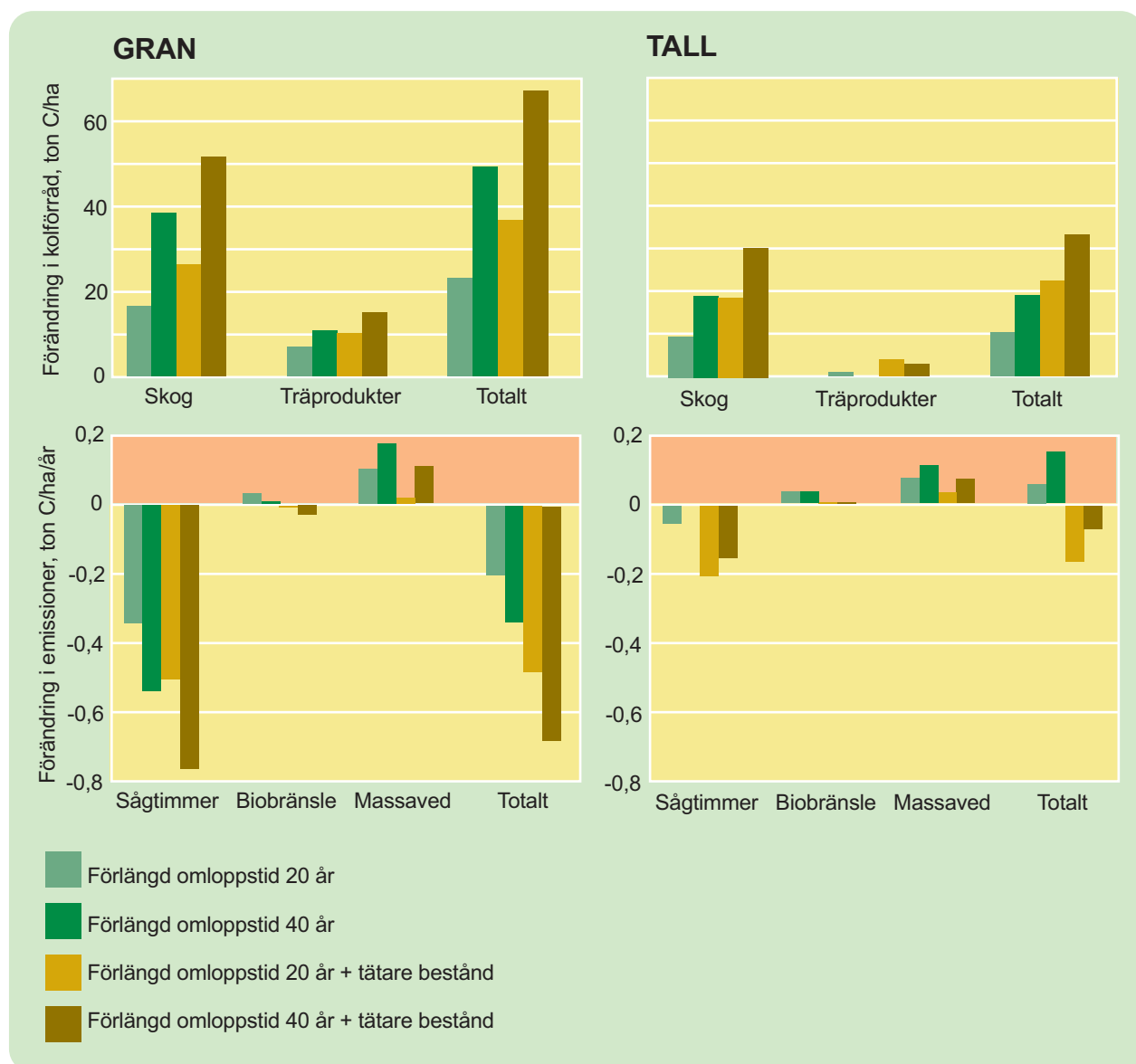
Om man vill lagra maximalt med kol i mark och träd kan senareläggning av avverkningar vara en bra åtgärd.

Modellberäkningar har visat att en förlängning av omloppstiden med 20 procent skulle öka kolinlagringen i biomassa med 13 procent och i marken med 10 procent, sett över en hundraårsperiod (Bergkvist & Olsson 2008). Kortsiktigt kan effekterna bli ännu större. Att minska avverkningen med 10 procent i Sveriges skogar skulle öka kolinlagringen med 60 procent till år 2030. Inga andra förändringar av skogsskötseln ger så stora effekter på kolbalansen på så kort tid (Lundblad m. fl. 2009).

Samtidigt innebär förlängda omloppstider att uttag av virke och avverkningsrester för biobränsle minskar. Även om man tar hänsyn till att biobränslen ersätter fossila bränslen och därmed minskar utsläppen av koldioxid, ger dock förlängning av omloppstiden en större reduktion av utsläppen än en förkortning, sett över en hundraårsperiod (Bergkvist

Figur 6. Nettoutbyte av växthusgaser mellan ekosystemet och atmosfären i skogsbestånd efter kalhuggning. Kalhygget tas upp år 0. Skogen är en källa till växthusgasutsläpp drygt 10 år efter kalhuggningen. Det tar ytterligare drygt 10 år för det nya beståndet att kompensera förlusterna under hyggesfasen. Diagrammet bygger på data från skogar i Sverige, Finland, Storbritannien och Frankrike. (Efter Lindroth m. fl. 2009.)





Figur 7. Effekter på skogens kolförråd (överst) och på det årliga kolflodet av fyra skogsskötselalternativ, två med förlängda omloppstider och två med förlängda omloppstider i kombination med minskad gallring (tätare bestånd). Utfallet visas i relation till ett basalternativ, där skogen sköts enligt gällande riktlinjer för finskt skogsbruk.

Virkesuttaget differentieras på sågtimmer, massaved och biobränsle, och man antar att 70 procent av tillgängligt biobränsle i

form av avverkningsrester tas ut i samband med slutavverkningar. Studien tar hänsyn till de substitutionseffekter som uppstår när skogsprodukterna ersätter fossila bränslen eller material.

I granskogar (t v) får samtliga samtliga skötselregimer positiv klimateffekt: såväl skogens kolförråd som substitutionseffekten ökar. För tallskogar ökar utsläppen med de skötselregimer som enbart förlänger omloppstiden. Det är värt att notera att sågtimret står för hela den

positiva effekten, medan massaved och biobränsle med ett undantag ger ökade utsläpp. (Efter Pingouid m. fl. 2010.)

& Olsson 2008). Detta bekräftas av en studie där även effekterna av materialsubstitution ingår (*se figur 7*). Den visar att skogsskötselmodeller med förlängd omloppstid och större virkesförråd kan ge både ökade kolförråd i skogen och minskade utsläpp genom substitution. Den positiva effekten beror på ökad produktion av sågtimmer. Ökat uttag av massaved och biobränsle ger däremot generellt negativa effekter på kolbalansen. Studien tyder därigenom också på, att ett skogsbruk med maximal volymproduktion som mål inte är det bästa från klimatsynpunkt (Pingoud m. fl. 2010).

Man bör hålla i minnet att strategier för att öka kolförråden i växande skog är begränsade i tid. Kollagren kan inte fortsätta att växa hur länge som helst. Över tid ökar också riskerna för att det kol som lagras i skogen frisätts genom störningar (Bergkvist & Olsson 2008).

Trädslagsval

Valet av trädslag har betydelse för skogens förmåga att anpassa sig till ett förändrat klimat, men också för dess kolbalans.

Bestånd av gran och björk bygger upp större förråd av kol i marken än tall. Orsaken kan vara att förnan från dessa trädslag innehåller mer kväve än tallförna. I norra Sverige är kolinnehållet i marken 65 procent större i gran- och björkbestånd än i tallbestånd, i södra Sverige är skillnaden 33 procent. Ökad inblandning av gran och/eller björk i tallbestånd i delar av landet, till exempel i östra Götaland, norra Dalarna och Gästrikland, kan vara ett sätt att öka kolbindningen i Sveriges skogar i framtiden (Bergkvist & Olsson 2008).

Det framtida klimatet i södra Sverige kan förväntas bli både varmare och torrare sommartid. Det innebär att tallen blir mer intressant på många marker. Tall är inte lika känslig för storm som gran, men å andra sidan är den sämre än gran och björk på att binda kol (Bergkvist & Olsson 2008).

Intensivodling av skog

Metoder för intensivodling av skog innefattar främst ökad gödsling, där man gödslar många gånger under skogens omloppstid (så kallad behovsanpassad gödsling, BAG), samt ökad användning av främmande trädslag som contortatall, lärk och sitkagran. Användning av högförädlad skogsodlingsmaterial (kloner av gran och hybridasp) i kombination med gödsling ingår också i intensivskogsbrukets arsenal (Larsson m. fl. 2009). Tillförsel av upp till 1 500 kg kväve per hektar över en hel omloppstid kan bli aktuellt (Nordin m. fl. 2009). I dagens skogsbruk tillförs vanligen 150 kg kväve per hektar vid ett tillfälle omkring tio år före slutavverkning.

I försök där man tillfört sammanlagt 600–1 800 kg kväve per hektar under perioder på 14–30 år har kolförråden i träden ökat med i genomsnitt 25 kg per kg tillfört kväve. Markkolförråden har ökat med 11 kg per kg tillfört kväve. Där man även tillförde fosfor och kalium var motsvarande siffror 38 kg för träd och 11 kg för mark (Bergkvist & Olsson 2008). Eftersom produktion av gödningsmedel ger växthusgasutsläpp motsvarande 0,4–1,2 kg kol per kg kväve är alltså klimateffekten mycket positiv.

Ett exempel från Västerbotten visar att en granskog som gödslas upprepade gånger fram till avverkning hade 26 procent högre medelkolförråd än en motsvarande skog som inte gödslas. Den gödslade skogen gav 80 procent mer råvara än den ogödslade, vilket innebär att den kan substituera mycket mer fossila bränslen eller material (Lundmark 2010).

En utredning av möjligheterna till intensivodling av skog i Sverige räknar med att omkring 15 procent av Sveriges skogsmark skulle kunna tas i anspråk för intensivskogsbruk, främst för intensivt gödslad skog med contortatall eller högproducerande grankloner. (Larsson m. fl. 2009). Det skulle öka kolinbindningen med 3,8 Mt per år 2030–2040 jämfört med ett basalternativ utan intensivodling (Lundblad m. fl. 2009).

Ännu finns dock inga svenska erfarenheter av intensivodling av skog i större skala och över längre tid. Osäkerheterna och riskerna är betydande.

Man vet att beståndsstruktur och markvegetation förändras kraftigt efter långvarig gödsling. Det finns ännu inga mätningar av nettoflöden som visar ökat upptag av koldioxid i skogar som har gödslats i många år (Grelle 2010).

Intensivskogsbruk innebär mer homogena bestånd och mindre variationsrika skogar, vilket kan medföra ökade risker för angrepp av skadegörare och sämre motståndskraft mot klimatförändringar. Det finns ännu inget vetenskapligt underlag som möjliggör bedömningar av risken för skogsskador i intensivodlad skog (Witzell 2009).

Gödsling kan öka risken för angrepp av vissa skadegörare, till exempel törskate- och snöskyttesvamp. Gödsling av rötad skog kan också öka rötangreppen, vilket i sin tur kan öka risken för stormfällningar. Trädens kemiska försvar mot skadegörare kan försämrats, vilket kan medföra ökade skador genom exempelvis älgbete (Witzell 2009). Alla dessa effekter minskar tillväxten och därmed också kolinbindningen.

Tillför man skogen kväve genom gödsling kan man på sikt vänta sig att avgången av lustgas från skogsmark ökar, eftersom det finns en stark koppling mellan mängden kväve i marken och lustgasavgången. I dag kommer 80-90 procent av lustgasutsläppen i Sverige från jordbruksmark, där man bland annat kvävegödslar för att öka produktionen. Med skogsgödsling tillför man på samma sätt kväve till skogsekosystemet. Ökad kvävetillförsel kommer att öka mängden kväve i förhållande till kolmängden i skogsmarkens organiska material, vilket ökar sannolikheten för nitrifikation och därmed avgång av lustgas (Bergkvist & Olsson 2008). I skogsmark har den andel av det tillförda kvävet som avgår i form av lustgas uppmäts till 0,5-1 procent. Med de gödselgivor som planeras för intensivskogsbruk och de tillväxteffekter som konstaterats i försöken kompenseras dessa utsläpp mer än väl av den ökade kolbindningen i skogen. Som mest beräknas omkring 20 procent av kolbindningen tas i anspråk för att kompensera lustgasutsläpp på 3 procent av det tillförda kvävet (Nordin m. fl. 2009). Hur stora de faktiska lustgasutsläppen blir på olika marker vid intensivskogsbruk i stor skala är dock okänt. Kunskapen om vad som sker med markkvävet vid avverkning av intensivgödslade skogar är också mycket begränsad. Eftersom lustgas är en mycket kraftfull växthusgas får små förändringar av flödena stora effekter för den totala växthusgasbalansen.

Flödena av växthusgaser kan också påverkas indirekt genom att gödslingen påverkar sjöar och vattendrag i skogslandskapet. Dessa effekter är för närvarande svåra att kvantifiera (Nordin m. fl. 2009).

Flera studier har rapporterat att kvävegödsling minskar skogsmarkens förmåga att bryta ned metan, men det finns också studier som påvisar motsatt effekt. Beräkningar utifrån finska förhållanden indikerar att nuvarande atmosfärisk kvävedeposition inte är tillräckligt stor för att begränsa metanoxidationen. Sannolikt kommer inte en långsam ökning av kväve i skogsmarken att påverka metanoxidationen i någon större omfattning, och betydelsen för koncentrationen av metan i atmosfären kommer att vara liten (Pihlatie 2009).

Omfattande intensivodling av skog skulle förändra sortimentutbytet. Andelen sågtimmer blir mindre, medan andelen massaved och ved för energiändamål ökar. Vad gäller användningen av intensivodlat virke anger den tidigare nämnda utredningen om intensivskogsbruk att råvaran med fördel kan användas inom massaindustrin och att det är fullt möjligt att utnyttja den som sågtimmer, även om andelen av sämre kvaliteter sannolikt skulle öka något (Larsson m. fl. 2009). Intensivskogsbruk är alltså i första hand en satsning på ökade kvantiteter virkesråvara.

Dikning och skogsbruk på torvmarker

Det finns 5 miljoner ha sumpskogar, det vill säga torvtäckta marker med skogsproduktion i Sverige. Det är omkring 20 procent av skogsmarken och hälften av all torvtäckt mark i Sverige (Bergkvist & Olsson 2008). Sedan 1850 har mer än 1,5 miljoner ha torvmark dikats med syfte att producera skog (Bergkvist 2007).

När man dikar torvmark ökar man syretillgången så att torv kan brytas ner. Det innebär avgång av koldioxid och ibland lustgas till luften. Å andra sidan minskar avgången av metan, eftersom metan bildas i syrefria förhållanden. Syftet med dikning är att öka skogstillväxten, och om det lyckas ökar skogens upptag av koldioxid. Den skattade nettoeffekten för klimatet av nydikning brukar ändå bli neutral eller negativ, även om man räknar in den potentiella energinyttan av den ökade skogsproduktionen (Eriksson 2008).

De dikade markerna utgör omkring 7 procent av Sveriges skogsmark, men står för 15 procent av de skogsmarkens totala utsläpp av växthusgaser. Avgången av koldioxid från dikad skogsmark beräknas vara omkring 10 Mton per år. Finland, som har tre gånger mer dikade torvmarker (ca 5 miljoner ha) (Jord- och skogsbruksministeriet 2010) rapporterar utsläpp på omkring 5 Mton, vilket ger ett begrepp om osäkerheten i beräkningarna (Lundblad m. fl. 2009).

Tar man hänsyn till kolbindningen i den skog som växer på dikade torvmarker kan de vara en källa för växthusgaser i storleksordningen 1-2 Mton CO₂-ekvivalenter per år (Bergkvist 2007).

Mellan 300 000 och 450 000 hektar åkermark på dikade torvmarker och gamla sjöbottnar har tagits ur bruk sedan början av 1930-talet. En stor del av den arealen används troligen för skogsproduktion i dag. Så mycket som 30-45 procent av den dikade skogsmarken i Sverige kan vara sådan tidigare åkermark. Denna marktyp har enligt en finsk studie visat sig vara en mycket stor källa för utsläpp av lustgas. Upp till 30 kg per ha och år uppmättes. Dikad skogsmark kan alltså släppa ut mycket mer lustgas än vi hittills känt till (Bergkvist 2007).

När träden i torvmarksskogar faller och inte längre förbrukar vatten stiger grundvattennivån. Vattennivån är viktig för hur mycket och vilka växthusgaser som avgår. Generellt är metanavgången större ju högre grundvattennivån är, medan koldioxidavgången minskar när grundvattnet stiger. Eftersom metan är 23 gånger starkare som växthusgas kan en grundvattenhöjning ändå innebära ökad klimatpåverkan. Också lustgasutsläppen påverkas av grundvattennivån. Minst växthusgaser släpps ut när grundvattennivån varken är hög eller mycket låg (Bergkvist & Olsson 2008).

Om avverkad sumpskog ska återbeskogas måste igenvuxna diken rensas, vilket alltså innebär att utsläppen av växthusgaser ökar. Att låta diken sättas igen, eller fylla igen dem aktivt är ett annat handlingsalternativ, med komplexa effekter både på skogens kolbalans och på virkesproduktionen (Bergkvist & Olsson 2008). Forskningsprogrammet LUSTRA rekommenderade att dikade skogsmarker som åter försumpats ska skötas på ett sådant sätt att skogsproduktion bibehålls. Grundvattennivån ska hållas på en nivå så att skogen kan fortsätta att växa. Däremot tyder resultaten på att ytterligare sänkningar ökar avgången från marken mer än vad som kompenseras av ökad skogstillväxt och att detta därför är negativt från klimatsynpunkt (Bergkvist 2007).

Skörd av skogsbränsle

Användningen av skogsbränsle i Sverige har i det närmaste tredubblats under den senaste tioårsperioden. Det är huvudsakligen avverkningsrester (GROT – grenar och toppar) som används. För närvarande sker uttag av GROT på omkring en tredjedel av den årliga hyggesarealen (Eriksson 2011).

Uttag av skogsbränsle innebär att biomassa tas ut ur skogen och bränns. Nedbrytningen, och därmed avgången av koldioxid till atmosfären, sker snabbare än om materialet hade lämnats att multna i skogen. Om materialet fått ligga kvar i skogen hade dessutom en mindre del av dess kolinnehåll långsiktigt lagrats in i marken.

Skörd av GROT innebär också att näringsämnen förs bort från skogsmarken, i synnerhet om skörden sker innan barren fallit av. Om det leder till minskad tillväxt i den kommande skogsgenerationen blir följden minskad inlagring av kol i biomassan. Uttag av grenar och kvistar har rapporterats ge tillväxtförluster i efterföljande skogsproduktion med mellan 6 och 32 procent (Jacobson m. fl. 2000, Sterba 2003 i Nabuurs m. fl. 2008). Vid uttag av avverkningsrester vid gallring finns indikationer på tillväxtminskningar med 11-26 procent (de Jong 2010).

Stubbrytning

Nästan 20 procent av trädets biomassa finns i stubben, och stubbar är således en stor potentiell skogsbränsleresurs. Intresset för stubbrytning har ökat kraftigt under de senaste åren, men ännu används metoden bara i begränsad skala.

Stubbrytningens effekter på kolbalans och miljö är dåligt undersökta (Grelle 2010). Forskning pågår, men få resultat är ännu redovisade. Den kraftiga omrörningen av marken i samband med stubbrytning skulle kunna öka nedbrytningen och därmed leda till ökad frisättning av kol. Å andra sidan skulle omrörningen kunna förbättra etableringen av ny skog och därmed gynna kolinbindningen på sikt.

En studie har visat att koldioxidavgången var lika stor under första året efter stubbrytning som efter markberedning. Under andra året fanns en tendens till ökad avgång från stubbruten mark, men orsaken till detta var oklar. En påtaglig skillnad var att andelen mark som var påverkad av körspår och på annat sätt var betydligt större på stubbrutna hyggen. Kraftiga körspår minskar avgången av koldioxid, men kan samtidigt göra marken vattensjuk, vilket ökar risken för avgång av metan (Mjöfors & Strömberg 2010).

Enligt en annan studie var kolförrådet i mark, trädbiomassa och hela ekosystemet lägre ännu 27 år efter stubbrytning, jämfört med motsvarande ytor där stubbar och avverkningsavfall lämnades kvar. Skillnaden i kolförråd var av samma storleksordning som kolinnehållet i de stubbar som skördades, vilket innebär att ingen klimatnytta uppnåts med att använda stubbarna som biobränsle i detta fall. Resultatet tyder på att stubbrytning leder till lägre kolförråd i både mark och trädbiomassa även på lång sikt, men det rör sig här om ett begränsat försök med delvis svårtolkade resultat. Det behövs fler studier för att nå säkerhet vad gäller stubbrytningens climateffekter (Mjöfors & Strömberg 2010).

Effekterna på kolflödena av en ökad stubbrytning till 25 TWh år 2030 har beräknats. Det motsvarar ungefär 30 procent av de årligen skapade stubbarna i landet. Stubbryt-

Vad är skogsbränsle?

Alla bränslen som härstammar från biologiskt material kallas **biobränslen**. **Trädbränsle** är biobränslen där träd eller delar av träd är utgångsmaterial.

Skogsbränsle är trädbränsle som tidigare inte haft någon annan användning: avverkningsrester, virke utan industriell användning (till exempel från röjningar) samt biprodukter från industrin.

Det trädbränsle som kommer direkt från skogen kallas ibland **primärt skogsbränsle**.

GROT (grenar och toppar) är avverkningsrester efter uttag av stamved.

ning av denna omfattning beräknas minska kolinbindningen i biomassa med 1,8 Mton kol år 2030. Effekterna på förrådet av markkol ingår inte i beräkningen (Lundblad m. fl. 2009).

Bruka eller låta växa?

Det finns en betydande potential hos våra brukade skogar att lagra kol om de får stå kvar och växa, långt förbi den normala slutavverkningsåldern (Olsson, M 2010). Å andra sidan kan skördat virke användas för att ersätta fossila bränslen och därigenom minska utsläppen av växthusgaser.

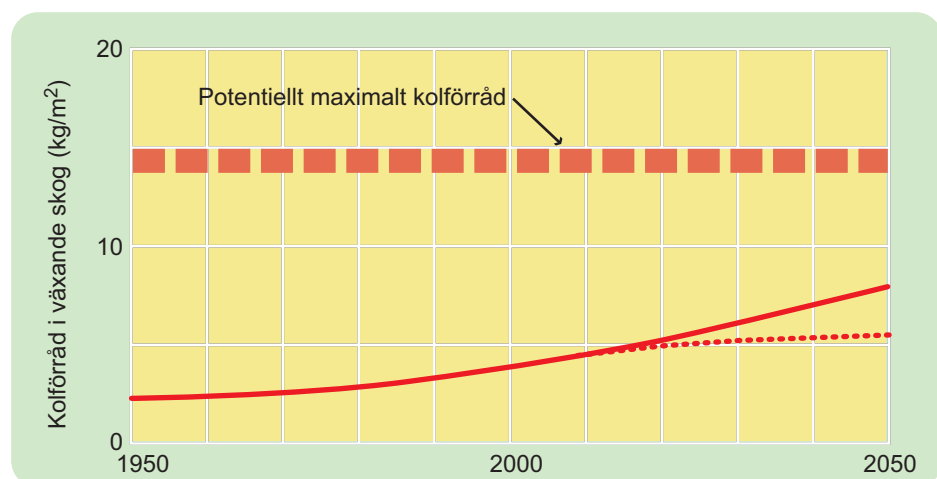
I modellstudier har man jämfört kolbalanserna för två handlingsalternativ i svensk skog. I det ena alternativet får skogen växa utan åtgärder i 200 år. I det andra röjs skogen efter tio år, gallras vid 30 och 60 år och slutavverkas när den är 100 år gammal. Därefter följer en ny omloppstid med samma skötsel. Efter 200 år innehåller den obrukade skogen 13 kg kol per m², medan den brukade innehåller 11 kg. Därtill kommer dock det kol som tagits ut ur den brukade skogen genom gallringar och en slutavverkning, totalt 11,9 kg. Den brukade skogen har alltså bundit totalt 22,9 kg kol under 200-årsperioden. Enligt modellstudien innehåller skogsmarken i den obrukade skogen 0,2 kg kol mer per m² efter 200 år, vilket alltså är marginellt i förhållande till kolbindningen i trädbiomassan (Olsson, M 2010).

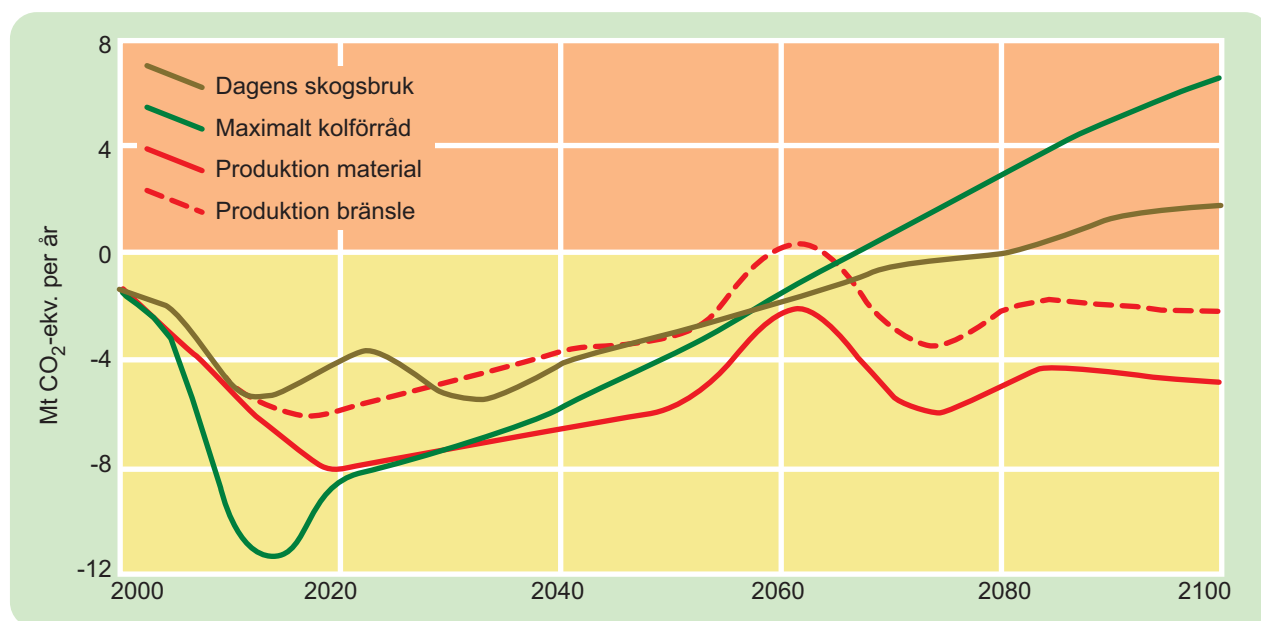
När man jämför de båda alternativen från klimatsynpunkt måste man ta hänsyn till vad som sker med den skördade biomassan. I ett strikt ekosystemperspektiv – det vill säga om man antar att det kol som lämnar systemet omedelbart återgår till atmosfären – är det klimatmässigt bättre att låta skogen stå kvar. Om man däremot utgår från att det skördade virket används för att ersätta fossila bränslen och/eller energikrävande byggnadsmaterial som stål och betong blir bilden en annan. Vi återkommer till detta i följande avsnitt.

Det beskrivna exemplet utgår från två nyanlagda skogsbestånd, som behandlas på olika sätt i framtiden. I dagens situation står valet snarare mellan att låta en gammal skog stå kvar och växa vidare, eller att avverka den och anlägga ny. Som tidigare visats blir nettoeffekten på kolbalansen på 50-100 års sikt positiv (nettofrisättning av kol till atmosfären) när naturskogar avverkas och ersätts med brukad skog. (Se avsnitt 5.)

Att enbart fokusera på att öka kolförrådet genom att låta skogen växa är en klimatstrategi som har sina begränsningar eftersom det inte går att lagra hur mycket skog som helst i skogen, men den kan vara verkningsfull på kort sikt (Lundmark 2010). Europas

Figur 8. Hittillsvarande och framtida kollagring i Europas skogar 1950-2050. Fram till 2010 bygger kurvan på mätdata. Den heldragna linjen är en enkel trendframskrivning, den streckade är en modellberäkning baserad på måttligt virkesuttag, men utan några effekter av högre koldioxidhalt, varmare klimat eller kvävedeposition. Den tjocka streckade linjen markerar potentiellt maximalt kolförråd i Europas skogar, beräknat med utgångspunkt från äldre skogsdata. Figuren visar att det finns en betydande potential att öka kolförråden i Europas skogar. (Efter Ciais m.fl. 2008.)





Figur 9. Effekter på växthusgasbalansen för fyra skogsskötselstrategier i schweiziskt skogsbruk 2000 - 2100. Värdet över nollstrecket betyder att skogen är en kolkälla.

Dagens skogsbruk innebär en fortsättning med nuvarande metoder och intensitet i skogsbruket.

Maximalt kolförråd innebär en skogsskötsel med starkt reducerat virkesuttag och inriktning på att bygga upp största möjliga kolförråd i skogen.

Produktion material innebär ett intensivare skogsbruk med inriktning på maximal substitution av material.

Produktion bränsle innebär ett intensivare skogsbruk med inriktning på maximal substitution av fossila bränslen.

Modellstudien inkluderar inte substitutionseffekter av massaved och papper. Enligt diagrammet blir de skogar som lämnas att växa vidare en kolkälla

inom ca 50 år. Det beror på antagandet att nedbrytningen av den ökade mängden dött organiskt material i de oskötta skogarna ger upphov till större utsläpp av växthusgaser än vad den växande skogen binder.* Detta gäller tempererade skogar, där nedbrytningen av dött material sker snabbare än i boreala skogar, och där kolförrådet i marken är mindre. För boreala skogar skulle bilden sannolikt bli en annan – skog som lämnas för fri utveckling skulle förbli en kolsänka under längre tid än vad grafen visar. (Efter Werner m. fl. 2010)

*) Dr Frank Werner, personlig kommunikation

skogar har potential att fortsätta att bygga upp sitt kolförråd under många decennier framåt, förutsatt att avverkningsandelen av tillväxten inte ökar. Skogarnas kolsänka kan därigenom spela en viktig roll för att i ett klimatpolitiskt perspektiv vinna tid (Ciais m. fl. 2008).

En studie av olika strategier för skötsel och användning av skogen i Schweiz i ett hundraårsperspektiv visar, att det klimatmässigt bästa alternativet är att upprätthålla hög tillväxt och att fortlöpande avverka på högsta uthålliga nivå (se figur 9). Virket bör i första hand användas som konstruktionsmaterial under så lång tid som möjligt, och därefter brännas som substitution för fossila bränslen. Skogsavfall som inte kan användas för andra ändamål bör utnyttjas som bränsle. Däremot är det inte optimalt att inrikta skogsskötseln på att producera mer bränsle (Werner m. fl. 2010).

Den strategi som ger störst kolbindning på kort sikt är kraftigt minskad avverkning. Trots att virkesuttaget reduceras med 45 procent (jämfört med business-as-usual) och därmed substitutionseffekterna lika mycket, är det alltså den mest effektiva strategin i ett klimatperspektiv under flera decennier (Werner m. fl. 2010).

Studien avser som nämnts skogen i Schweiz, det vill säga i det tempererade området, och resultaten kan därför inte utan vidare appliceras på borealt skogsbruk. Bland annat skiljer sig förhållandena åt vad gäller nedbrytningshastigheten av organiskt material och kolförråden i marken. Principiellt är studien ändå intressant eftersom den ger en bild av



7. Lagring av kol i skogsprodukter

I analyser av växthusgasbalansen i skogsekosystem betraktas ofta all avverkning som utsläpp. Man antar att kolet i den trädbiomassa som skördas återgår till atmosfären omedelbart. I verkligheten lagras en del av kolet in i träprodukter, vilket innebär att utsläppen fördröjs. Hur lång fördröjningen är varierar kraftigt. För papper kan det röra sig om några år, för virke som används i byggnader om många decennier eller till och med sekler (Lundblad m. fl. 2009).

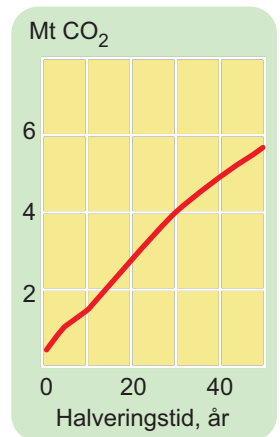
Ländernas rapportering av växthusgasutsläpp under Kyotoprotokollet har hittills inte inkluderat kolinnehållet i skördade skogsprodukter, men möjligheter att göra detta är nu föremål för förhandlingar. Det väcker frågor kring hur export och import av skogsprodukter ska hanteras i redovisningarna, vilka beräkningsmetoder som ska användas och vilka antaganden som ska göras om olika skogsprodukters livslängd. Inte minst den senare faktorn är av avgörande betydelse.

Livslängden brukar anges som halveringstid, det vill säga hur lång tid det tar innan hälften av kolet i en viss mängd tillförd skogsprodukt (trävaror, bränsle eller papper) återgått till atmosfären. I de nordiska länderna har halveringstiderna för trävaror skattats till omkring 15–20 år. Vanliga halveringstider för papper är 1–2 år. Halveringstiden är en stor osäkerhetsfaktor vid beräkningarna. Som framgår av figur 10 ger olika antaganden om halveringstid (från 1 till 50 år) värden för de skördade skogsprodukternas kolsänka i Sverige mellan 0,5 och 6 Mton CO₂ per år (Lundblad m. fl. 2009).

I Sverige har inga inventeringar av mängden inbyggt trä i byggnader gjorts sedan 1996, då kolförrådet i byggnadsbeståndet skattades till 34 Mton C (Lundblad m. fl. 2009). Ökningen av detta kolförråd är dock sannolikt marginell eller obefintlig. Man river i ungefär samma takt som man bygger nytt (Eriksson 2008).

Det rundvirke som tagits ut ur Sveriges skogar under senare år motsvarar drygt 16 Mton kol per år. Dessutom importeras virke motsvarande 1,5 Mton. Drygt 80 procent av detta går till bränsle, pappersmassa eller spill, som i allmänhet förbränns inom något eller några år. Där sker alltså ingen nämnvärd inlagring i skogsprodukter. Återstående 20 procent används för tillverkning av sågade trävaror och träbaserade skivor. Ytterligare spill sker i förädlingsindustrin innan trävarorna byggs in i slutprodukter, varav en del, som formvirke och emballage, har kort livslängd. Det är alltså en liten del – avsevärt mindre än 20 procent – av den totala virkesskörden som till slut hamnar i produkter med lång livslängd, som hus eller möbler, och som således kan ha betydelse som kolsänka (Lundblad m. fl. 2009).

Även om det totala lagret av trä i hus skulle öka med 10 procent skulle kolbindningen inte motsvara mer än någon procent av Sveriges totala utsläpp (Eriksson 2008).



Figur 10. Halveringstidens betydelse för kolförrådet i skogsprodukter. Kurvan visar kolförrådet (medeltal 1990–2007) i den svenska produktionen av trävaror och träbaserade skivor under olika antaganden om halveringstiden. (Efter Lundblad m. fl. 2009.)



8. Substitution

Trädbiomassa kan användas som bränsle för att ersätta fossil energi. Trä kan användas för att ersätta material (exempelvis plast, betong och stål) som ger upphov till växthusgasutsläpp vid tillverkningen, både direkt och genom att tillverkningen kräver energi som produceras med fossila bränslen. Bränsle- och materialsubstitution är av avgörande betydelse för skogens och skogssektorn totala påverkan på flödena av växthusgaser, i synnerhet på lång sikt, eftersom vinsten av lägre koldioxidutsläpp ackumuleras över tid.

För att beräkna substitutionseffekter av biomassa måste man ta hänsyn till alla flöden av växthusgaser som är kopplade till en produkt, exempelvis växthusgasutsläpp i samband med transporter av virke och tillverkning av produkter. Effekten är också beroende av vilka alternativa produkter man jämför med, exempelvis kol eller naturgas när det gäller bränslen, respektive betong eller stål när det gäller material (Olsson, M 2010). Ersättnings- eller substitutionsfaktorn anger hur mycket fossilt kol som ersätts av en viss mängd kol i skördat virke. Om 1 kg kol i trä ersätter 1 kg kol i fossila bränslen är alltså substitutionsfaktorn 1. Substitutionsfaktorn för det totala biomassauttaget ur skogen beräknas vanligen vara mindre än 1, vilket innebär att substitution på kort sikt inte kompenserar för kolförlusterna i skogen till följd av virkesuttag (Pingoud m. fl. 2010).

De studier som gjorts av substitutionseffekter av olika skogsskötsel- och avverkningsstrategier räknar i allmänhet med att ett ökat uttag av virke används antingen för att ersätta fossila bränslen eller byggnadsmaterial, eller en kombination av båda. Det motsvarar inte den faktiska situationen i dagens skogsbruk, där en stor del av virkesuttaget är massaved för papperstillverkning. Som vi ska se har pappersproduktionen stor betydelse för skogssektorns totala substitutionseffekt.

Substitution av bränslen

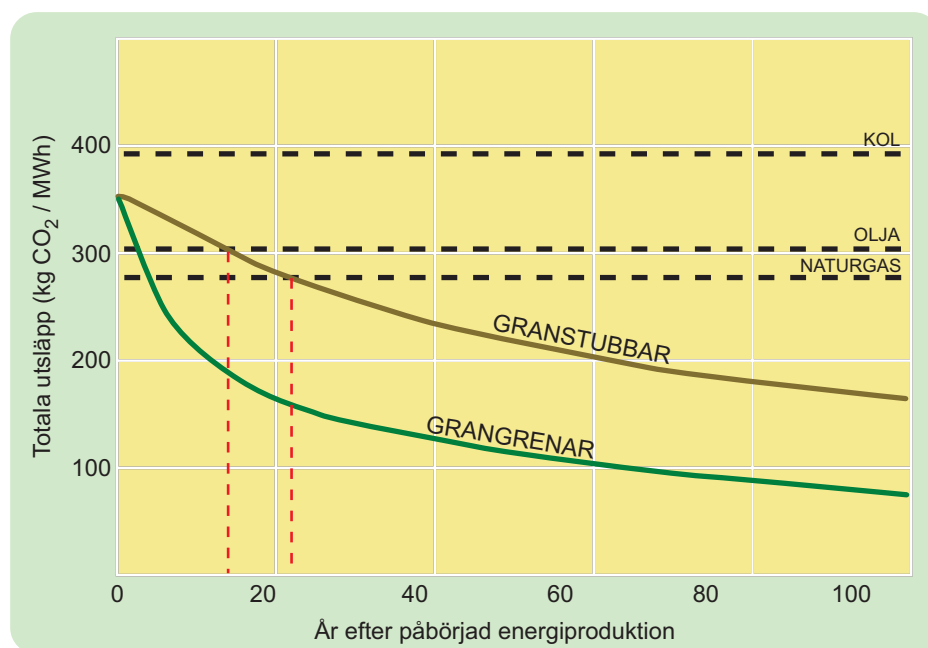
När skogsbränslen ersätter fossila bränslen i energiproduktion släpps koldioxid ut till atmosfären, men den koldioxid som frigörs skulle ändå ha avgetts när trädet dör och bryts ned. Om skogen återplanteras efter avverkning tar den växande biomassan så småningom upp samma mängd koldioxid som avgavs vid förbränningen (Bergkvist & Olsson 2008). Det innebär dock inte att skogsbränsle är koldioxidneutralt. Klimatnyttan med att använda skogsbränslen beror på balansen mellan å ena sidan utsläppen från de fossila bränslen som ersätts av skogsbränsle och å andra sidan:

- nedbrytningshastigheten hos bränslet om det lämnats i skogen.
- växthusgasutsläpp från störningar av marken till följd av bränsleskörden.
- effekter på skogens tillväxt till följd av bränsleskörden.
- utsläpp från maskiner i samband med skörd och transporter.

	Substitutionsfaktor fossilbränsle	
	Kol	Naturgas
Sågtimmer (konstruktionsvirke för flervåningshus, Sverige)	2,05	1,52
Sågtimmer (konstruktionsvirke för flervåningshus, Finland)	1,31	0,91
Skogsbränsle	0,89	0,50

Tabell 3. Substitutionsfaktorer för sågtimmer och skogsbränsle. Tabellen anger substitutionsfaktorer på marginalen – det vill säga för ett ytterligare tillskott av skogsråvara. Substitutionsfaktorn anger hur mycket kol i fossilt bränsle som kan ersättas av skogsråvara med ett visst kolinnehåll. Substitutionsfaktor 1 innebär alltså att trä innehållande 1 kg kol kan substituera lika mycket kol i fossilt bränsle. Substitutionsfaktorer under 1 innebär att de kolförluster i skogen som uppstår genom avverkning inte kortsiktigt kompenseras av substitutionseffekten. (Pingoud m. fl. 2010).

Figur 11. Klimateffekter av substitution av fossila bränslen med grenar och stubbar. Effekten blir positiv där kurvorna skär linjen för respektive fossilbränsle. Stubbar ger alltså klimatnytta efter 14 år jämfört med olja och 22 år jämfört med naturgas. Efter 100 år ger stubbar fortfarande inte mer än 40 procent klimatnytta. Med andra antaganden om stubbarernas nedbrytningstid eller kolavgång från marken vid stubbrytning förskjuts kurvan uppåt, vilket innebär att det tar längre tid innan man uppnår klimatnytta. (Efter Repo m.fl. 2010.)



Andra faktorer som kan bidra signifikant till de totala utsläppen av växthusgaser vid produktion av skogsbränslen är markskötselmetoder (särskilt på dränerad torvmark) och gödsling (Bergkvist & Olsson 2008).

Skogsbränsleuttaget i Sverige är för närvarande 8-10 TWh per år. En ökning till 15 TWh år 2030 beräknas minska kolinlagringen i skogen med 4-6 procent. Minskningen uppvägs dock många gånger om av substitutionseffekten. Om man tog ut grenar och toppar från alla avverkningsanläggningar i Sveriges skogar under 150 år skulle kolförrådet minska med 0,34 Mton per år. Samtidigt skulle vi få ut 11 Mton kol som bränsle (Ågren & Hyvönen-Olsson 2006). Även om man räknar med en låg substitutionsfaktor på 0,5 skulle alltså klimateffekten bli mycket positiv (Bergkvist & Olsson 2008).

Ett problem med satsningar på skogsbränslen i det korta tidsperspektivet är att det tar viss tid innan de ger en positiv nettoeffekt. Det beror främst på att om avverkningsresterna lämnats kvar i skogen hade det tagit ett antal år innan de brutits ned, medan nedbrytningen vid förbränning sker omedelbart. Avverkningsrester (GROT) beräknas ge klimatnytta inom 4 - 20 år om man antar att de substituerar naturgas. Om det substituerade bränslet är olja eller kol blir denna "återbetalningstid" kortare (Repo m. fl. 2010).

För grövre material är denna fördröjningseffekt större och klimatnyttan därmed mindre. Det är särskilt tydligt för stubbar. Det tar minst 20-30 år innan användning av stubbar som bränsle ger positiv klimateffekt (om man antar att de ersätter naturgas) (Repo m. fl. 2010). Om effekterna av markstörningar och minskad tillväxt i nästa skogsgeneration räknas in tar det ännu längre tid innan klimateffekten blir positiv.

Det finns vitt skilda uppgifter om skogsbränslens klimatnytta över en beståndsalder. För avverkningsrester (GROT) anges den långsiktiga klimatnyttan till 70-90 procent. Det betyder alltså att 1 kg kol i skogsbränslet förhindrar utsläpp från fossila bränslen motsvarande 0,7-0,9 kg kol (Repo m. fl. 2010). För stubbar uppges den långsiktiga klimatnyttan vara från 40 (Repo m. fl. 2010) upp till 80-90 procent (Lindholm 2010).

Spännvidden i de nämnda siffrorna beror på att olika livscykelanalyser gör olika antaganden om nedbrytningshastighet och utsläpp vid bearbetning, transport och förbränning. Ingen av dem tar hänsyn till eventuella effekter på skogens tillväxt och växthusgasutsläpp på grund av markstörningar. Här är kunskapsunderlaget ännu bristfälligt, men som tidigare nämnts finns data som tyder på betydande tillväxtminskningar efter uttag av GROT (de Jong 2010).

Tidsfördröjningen innan skogsbränslen ger klimatnytta kan tyckas vara obetydlig. I ett läge där man överväger att kraftigt öka användningen av skogsbränslen samtidigt som det finns starka skäl att mycket snabbt minska utsläppen av växthusgaser är det dock en väsentlig aspekt. Om man inte tar hänsyn till den kommer man i det korta perspektivet att överskatta klimatnyttan av ökad biobränsleanvändning mer eller mindre kraftigt.

Substitution av material

Materialsstitution innebär att trä ersätter andra material, som tillverkas med hjälp av fossila bränslen. Den positiva klimateffekten består alltså av de utsläpp av växthusgaser som uteblir genom att tillverkningen av de ersatta materialen minskar. I de flesta substitutionsstudier är de material som ersätts stål eller betong.

I ett svenskt perspektiv har man främst analyserat klimateffekterna av att substituera betongstommar med trästommar i byggnader. Över tid visar sig sådan materialsstitution ge större klimatnytta än bränslesubstitution.

Om avverkad skog i största möjliga omfattning används som konstruktionsvirke i byggnader motsvarar biomassaproduktion av 1 ton kol i skogen en emissionsminskning med 1,04 ton kol. Det förutsätter att trädens grövre dimensioner används som konstruktionsvirke, samt att det blir bränsle av klenare dimensioner, avverkningsrester och trä från de uttjänta byggnaderna. Referensbränslet var stenkolk. Om jämförelsen istället gjordes mot naturgas blev de minskade emissionerna 0,76 ton kol (Olsson, M 2010). I detta fall minskar obrukad skog emissionerna med i medeltal 77 g kol per m² och år (i biomassa och mark), sett över två omloppstider. Den brukade skogen minskar emissionerna med i medeltal 95-130 g (beroende på om naturgas eller kol används som referensbränsle). I stort sett hela skillnaden mellan de båda alternativen, 18-53 g kol per m² och år, beror på substitutionseffekten (Olsson, M 2010). Jämförelsen förutsätter att den avverkade skogen ersätts med ny, som kan ta upp koldioxiden från den eldade biomassan.

En likartad svensk modellstudie jämför nettoeffekterna på växthusgasutsläppen vid ett antal alternativa scenarier för skogsskötsel och användning av de skördade skogsprodukterna. Störst reduktion av växthusgasutsläppen fick man med intensiv gödsling, uttag av avverkningsrester och stubbar samt användning av det skördade virket som konstruktionsmaterial. Den faktor som gav störst effekt på utfallet var hur det skördade virket användes, det vill säga om det användes som konstruktionsmaterial eller som bränsle (Eriksson m. fl. 2007).

För att kunna tolka resultaten av de båda refererade studierna måste man först och främst beakta att de analyserar utfallet över mycket lång tid, 200 respektive 300 år. Som framgår av figur 12 är det först över perioder på flera skogliga omloppstider som substitutionseffekten blir betydande.

Vidare är antaganden om i vilken typ av byggnader träet används av avgörande betydelse för utfallet av substitutionsstudier. Substitutionsfaktorer för trä som konstruktionsmaterial har skattats till 0,78 - 1,11 kg kol per m² bostadsyta och år i Finland och 0,38 - 0,51 kol per m² bostadsyta och år i Sverige. Det ger ett begrepp om osäkerheten i beräkningarna (Pingoud m. fl. 2010).

Den studie som redovisas i figur 12 utgår från att en stor del av virkesuttaget används för träprodukter. Man antar att allt rundvirke grövre än 12 cm i diameter blir konstruktionsvirke för byggnader, och att livslängden på detta virke i genomsnitt är 100 år (Eriksson m. fl. 2007). Båda dessa antaganden ligger mycket långt från de verkliga förhållandena. Som nämnts tidigare blir mindre än 20 procent av det totala virkesuttaget konstruktionsvirke med lång livslängd, och halveringstider för skördade träprodukter anges ofta till 15-20 år. Dessutom sätter naturligtvis byggnadsbeståndet och nybyggnadstakten gränser för hur mycket byggmaterial som kan ersättas med trä.

Världens skogsindustri och klimatet

Den globala skogsindustrin använder omkring 1 700 miljoner m³ rundvirke varje år. En del av virkesuttagets kolinnehåll binds i pappersprodukter eller virke under kortare eller längre tid. IPCC har angett halveringstiden (den tid det tar för hälften av kolinnehållet att återgå till atmosfären) till två år för papper och 30 år för träprodukter. Utgår man från dessa värden är den globala användningen av papper och trävaror en kolsänka på 20 respektive 243 Mt CO₂-ekvivalenter per år (baserat på 2007 års produktion). Till detta ska läggas den kolbindning som sker genom att en del skogsprodukter inte bränns efter att de använts, utan hamnar på soptippar. En studie från FN:s skogs- och jordbruksorgan FAO (Miner m. fl. 2010) ställer denna kolbindning mot de utsläpp av växthusgaser som tillverkning, användning och slutdeponering av skogsprodukter ger upphov till. Slutsatsen är att utsläppen är betydligt större än kolbindningen, och

att flödet av skogsprodukter i världen totalt är en kolkälla på närmare 500 Mt CO₂-ekvivalenter per år. Det motsvarar 0,15 Gt kol. Om man tar hänsyn till substitutionseffekten av trä som ersättning för mer energikrävande byggnadsmaterial blir dock skogsindustrin och skogsprodukterna en liten kolsänka (se tabellen).

En slutsats som kan dras med utgångspunkt från FAO-studien är att produktion och användning av papper skulle förbli en växthusgaskälla även om alla pappersprodukter användes för att ersätta fossilbränslen efter användning. Kolkällan skulle bli minst 0,09 Gt per år (se tabellen). Det finns alltså goda skäl att hålla isär papper och trävaror när man diskuterar skogssektorns effekter på flöden av växthusgaser.

Tabell 4. Den globala skogindustrins påverkan på växthusgasflöden, miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år. + betyder källa, - står för sänka.

1) Omräknat till koldioxid-ekvivalenter

2) bedöms inte vara möjlig att kvantifiera p g a stora nationella skillnader.

	Kolbindning	TOTALT
Skogsbruk	+36,9	
Direkta utsläpp från tillverkning	+297	
Utsläpp från produktion av inköpt el	+193	
Insatsvaror inkl fossilenergi	+92,4	
Transporter	+51,2	+670,5
Kolbindning i använda pappersprodukter	-20	
Kolbindning i använda träprodukter	-243	
Förbränning av använda skogsprodukter	-3	+404,5
Metanutsläpp från deponerade skogsprodukter ¹⁾	+234,6	+639,1
Kollagring i deponerade skogsprodukter	-160,6	+478,5
Skogsindustrins produktion av el ²⁾	???	
Substitution av fossila bränslen	- 25,8	+452,7
Substitution av byggnadsmaterial	- 483	-30,3

Tabell 5. Den globala pappersanvändningens påverkan på växthusgasflöden, miljoner ton CO₂-ekvivalenter per år.

1) Fördelat 50/50 mellan papper och trävaror.

2) Hela potentialen för substitution av fossila bränslen, även den del som avser sågade trävaror, ingår här.

	Kolbindning	TOTALT
Skogsbruk	+18 ¹⁾	
Direkta utsläpp från tillverkning	+231	
Utsläpp från produktion av inköpt el	+106	
Insatsvaror inkl fossilenergi	+57,4	
Transporter	+25,5 ¹⁾	+437,9
Kolbindning i använda pappersprodukter	-20	
Substitution av fossila bränslen	-135 ²⁾	+282,9

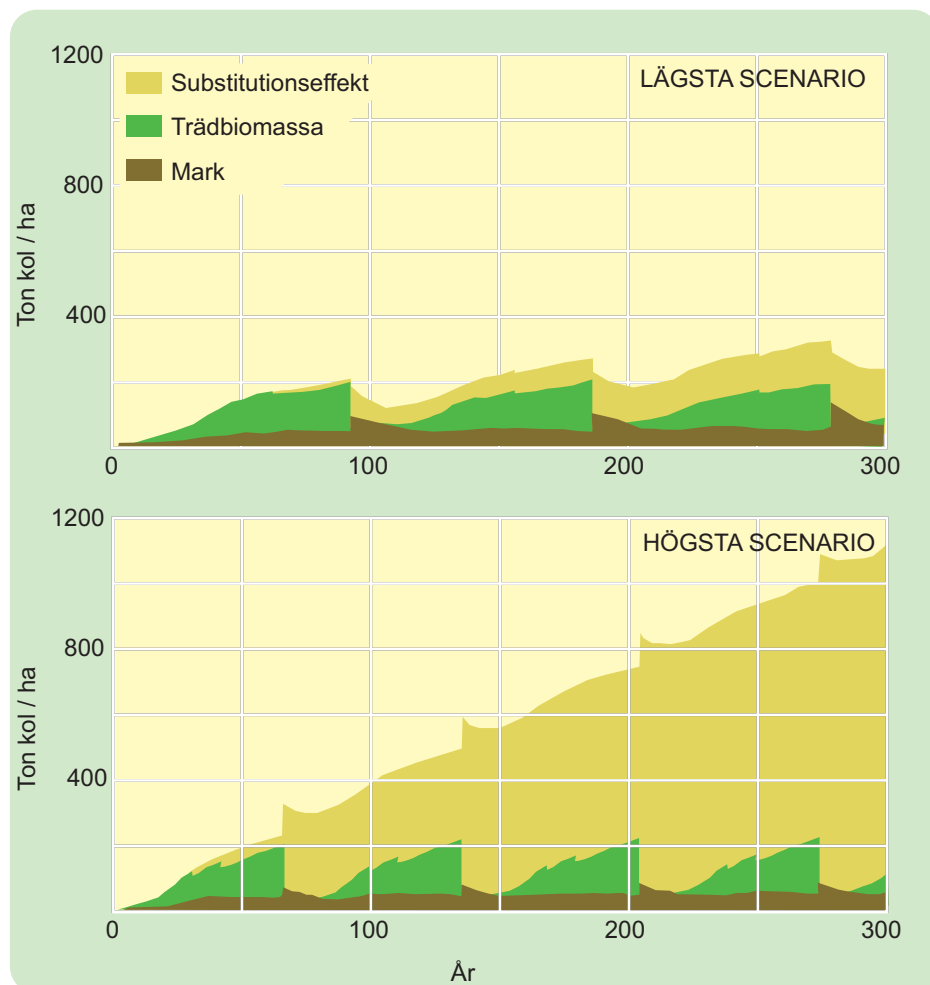
Vidare utgår den refererade studien från att den virkesråvara som inte blir konstruktionsvirke används som bränsle. Man räknar alltså inte med någon produktion av pappersmassa och papper. Även detta avviker starkt från det verkliga förhållandet i svenskt skogsbruk, där omkring hälften av rundvirkesuttaget är massaved (Skogsstyrelsen 2010).

Om man utgår från en realistisk bild av hur skogsråvaran används blir utfallet helt annorlunda. En livscykelanalys av olika skötselalternativ för Sveriges skogar med denna utgångspunkt visar, att massa- och pappersproduktion totalt sett är negativ från klimatsynpunkt. Den effekten är så betydande att om den vägs in i kalkylen blir bränslesubstitution en större pluspost i skogsbrukets totala klimatpåverkan än materialsubstitution (Hofer m. fl. 2008). (Se figur 13.)

Studien jämför ett grundscenario, där skogsbruket och skogsindustrin fortsätter att utvecklas efter nuvarande trender fram till år 2035, med ett scenario där uttaget av bränsle ur skogen ökar kraftigt och ett intensivscenario, där skogsproduktionen ökas bland annat genom gödslig, växtförädling och intensivare skogsskötsel. Produktionen av rundved är i detta scenario nästan 40 procent större än i grundscenariet. Bränsleuttaget är lika stort som i bränslescenariet.

Man räknar med att de förändringar som görs i de olika scenarierna är genomförda år 2035. Därefter beräknar modellerna utvecklingen fram till år 2160 för att ge en bild av hur kolbalansen påverkas långsiktigt.

Grundscenariet ger långsiktigt en kolsänka på 16 Mton kol per år, biobränslescenariet 18 Mton per år och intensivscenario 28 Mton kol per år. I samtliga tre scenarier är det



Figur 12. Kolförrådets utveckling i trädbiomassa och mark samt ackumulerade effekter av materialsubstitution i två scenarier. Det övre, som ger minst positiv klimateffekt, bygger på dagens skogsbruk, inget uttag av stubbar eller avverkningsrester och naturgas som referensbränsle. Det undre, som ger störst positiv klimateffekt, bygger på intensivskogsbruk med stubbrytning, mycket omfattande materialsubstitution och kol som referensbränsle. (Efter Eriksson m. fl. 2007.)

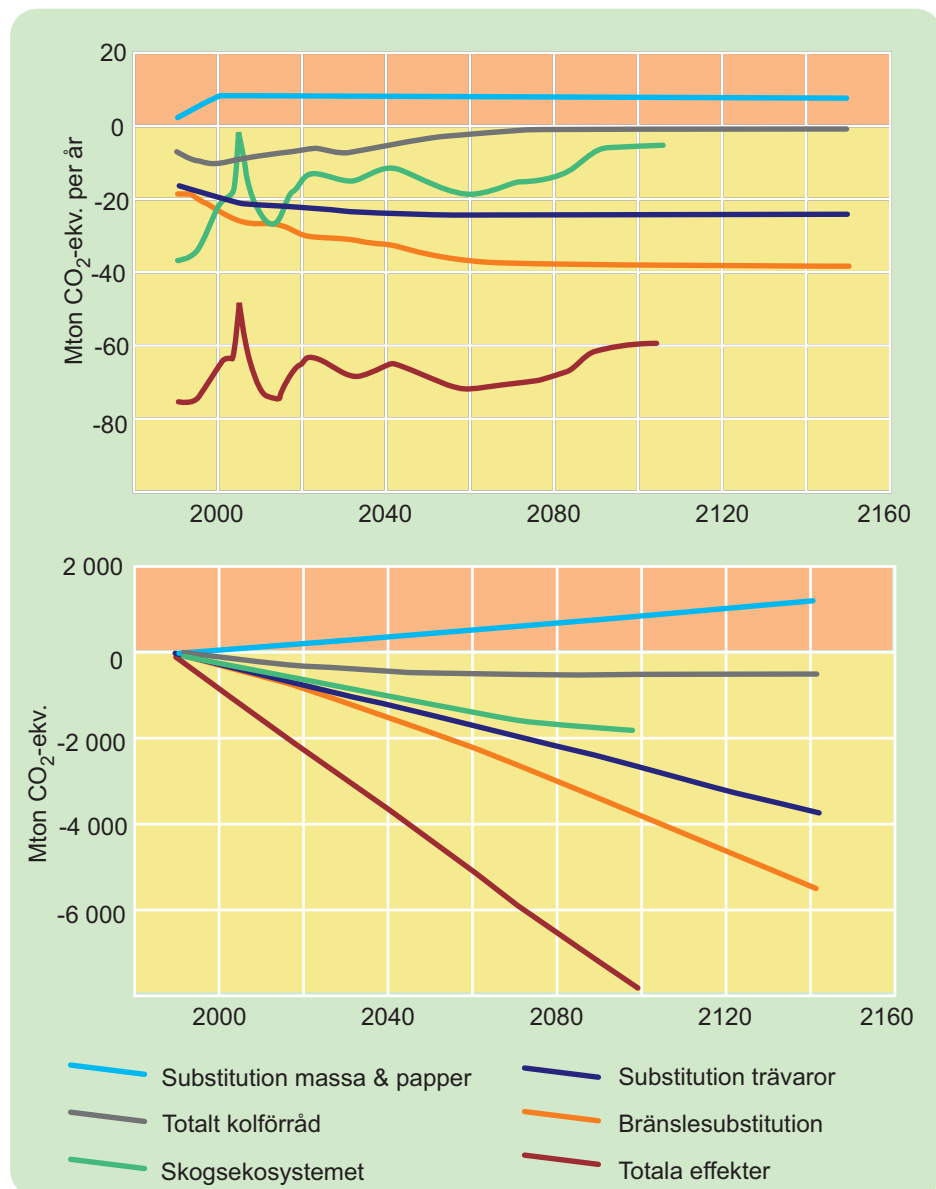
Högsta-scenariet förutsätter att allt rundvike över 12 cm diameter blir konstruktionsvirke i byggnader. Det är ett antagande som ligger mycket långt från dagens verklighet.

Figur 13. Effekter på kolflöden och kolförråd av svenskt skogsbruk i ett livscykelperspektiv. Övre diagrammet visar årliga förändringar och det nedre kumulativa förändringar enligt ett scenario där skogsbruk och skogsindustri utvecklas enligt nuvarande trender fram till år 2035. Därefter "läses" förutsättningarna för att visa de långsiktiga konsekvenserna fram till år 2160.

Värt att notera är den negativa effekten av massa och papper.

Studien tar hänsyn till effekterna av bränslesubstitution genom förbränning av använt papper, men däremot inte till materialsubstitution av papper, det vill säga att papper kan ersätta andra material i till exempel förpackningar.

De vassa topparna på kurvorna i det övre diagrammet är effekter av stormen Gudrun 2005. (Efter Hofer m. fl. 2008.)



energisubstitution som är den enskilt största faktorn. Materialsubstitution kommer på andra plats, vilket alltså beror på att man tar hänsyn till även flödena av massaved, massa och papper. De är totalt sett en så betydande kolkälla att de delvis förtar effekten av den materialsubstitution som trävarorna står för. Med de antaganden om ökad produktion som görs här skulle de fördubbla sina utsläpp av växthusgaser till år 2035.

Studien räknar inte med materialsubstitutionseffekter av papper, vilket naturligtvis är en begränsning. Papper kan tänkas ersätta exempelvis plast eller glas i förpackningar och därigenom ge positiva klimateffekter. Detta torde dock inte rubba studiens övergripande slutsats, nämligen att en förskjutning av konsumtionen av skogsprodukter mot större andel trävaror och skogsbränslen och mindre papper skulle ha positiva klimateffekter. Det skulle minska utsläppen i samband med produktion, och samtidigt öka substitutionseffekten. Dessutom ökar kolbindningen i skogen genom förlängda omloppstider och större virkesförråd (Hofer m. fl. 2008).

9. Skogen och klimatkonventionen

Utsläpp och upptag av växthusgaser från olika former av mark och markanvändning ingår som en del i FN:s klimatkonvention och Kyotoprotokollet. Det samlade begreppet för detta område är LULUCF – *Land-Use, Land Use Change and Forestry*. Mycket enkelt uttryckt kan länder ”kvitta” kolsänkor i markanvändningssektorn mot utsläpp från förbränning av fossila bränslen för att leva upp till sina åtaganden om utsläpps begränsningar. Ett land som exempelvis åtagit sig att begränsa sina emissioner av växthusgaser med 10 procent kan nå sitt mål genom att minska fossileldningen med 5 procent och öka kolsänkan i markanvändningssektorn med lika mycket, exempelvis genom att återbeskoga tidigare skoglös mark. Att minska kolbindningen i skogen genom att avverka mer än tillväxten kommer på motsvarande sätt att belasta landet som ett utsläpp. En tanke bakom att ta in markanvändningen i klimatkonventionen har just varit att skapa incitament för att bevara och sköta skog, inte minst med fokus på tropiska regnskogar.

Detta avsnitt bygger på
Macey, K m.fl.2010.

Enligt Kyotoprotokollets artikel 3.3. är staterna skyldiga att redovisa utsläpp och upptag av växthusgaser från plantering, avskogning och återbeskogning. Artikel 3.4. i protokollet ger därutöver möjlighet att ta in andra markanvändningsaktiviteter i sin rapportering, däribland skogsbruk. Sverige är ett av de länder som valt att utnyttja den möjligheten. Det innebär alltså att Sverige inte bara redovisar förändringar av utsläppen som har sin grund i ökad eller minskad skogsareal (förändringar som i Sveriges fall är mycket betydliga), utan också den växande skogens kolsänka och förändringar i den.

Den underliggande logiken är alltså enkel: ju mer kolbindning länderna kan tillgodoräkna sig i markanvändningssektorn, desto mindre blir behovet av att minska utsläppen från förbränning av fossila bränslen. Detta har skapat en förhandlingssituation där många länder har ett intresse av att maximera LULUCF-krediteringen. De försöker driva fram redovisningsregler som gynnar avdrag för kolsänkor snarare än redovisning av utsläpp. Regelverket för LULUCF kan ses som ett batteri av försök att minska osäkerheten i systemet och styra det i en riktning som gör minsta möjliga skada men som ändå kan accepteras av de stater som driver på för generösa kolsänkekrediter. Hittills är utfallet av denna process en uppsättning komplexa och ganska fragmenterade regler.

Det är viktigt att ha klart för sig att rapporteringsreglerna förhandlats fram på detta sätt. Även om redovisningen ska vila på vetenskaplig grund så har regelverket en klimatpolitisk dimension. De är resultatet av ett förhandlingsspel med syfte dels att skapa politiska incitament för olika åtgärder, dels att täppa till kryphål. Detta betyder, att utsläppsdata från ländernas officiella rapportering under klimatkonventionen inte utan vidare kan jämföras med vetenskapliga data för kolkällor eller kolsänkor i naturen. Dessutom är som nämnts tidigare det vetenskapliga underlaget för att beräkna kolförråd och kolflöden mycket bristfälligt i många länder (*se faktaruta sidan 18*).

Marrakesh-principerna

Vid det sjunde partsmötet (COP 7) under klimatkonventionen i Marakesh 2001, enades man om åtta principer för redovisningen av LULUCF-aktiviteter, i syfte att förhindra att Kyotoprotokollet undergrävs som miljöpolitiskt redskap (*se faktaruta*). Staterna har enats om att dessa principer ska gälla även för nästa åtagandeperiod (efter 2012), men

det återstår att se i vilken utsträckning de faktiskt kommer att tillämpas. Förhandlingar om LULUCF-reglerna har pågått sedan 2008 och blivit allt mer komplicerade i takt med att man försökt täta olika kryphål, samtidigt som det ställs krav på att inkludera allt fler markanvändningsaktiviteter. Det senaste partsmötet – COP 16 i Cancun i december 2010 – misslyckades med att nå en överenskommelse på detta område.

Förhandlingarna inför en andra åtagandeperiod pågår alltså alltjämt, och mycket pekar på att slagsidan mot sänkor snarare än faktiska utsläpp kommer att bestå. Det förefaller som om många stater inte bara vill öka utrymmet för tillgodoräknande av sänkor. Man vill också slippa redovisa vissa utsläpp. Man har fortsatt att föreslå olika lösningar för att gynna sina egna intressen, och några stater har kopplat sina mål för 2020 till sådana förhandlingsutspel. Ett exempel är Nya Zeeland, vars mål om 20-procentiga utsläppsminskningar uttryckligen är kopplat till vissa krav på LULUCF-reglerna. Det spann för utsläppsminskningar som Ryssland angett baseras på förutsättningen att LULUCF tillåts bidra till måluppfyllelsen.

Förslag till ändringar och tillägg

I april 2011 ligger en lång rad förslag till ändringar och tillägg av LULUCF-reglerna på förhandlingsbordet, däribland:

- tillägg av nya markanvändningsaktiviteter, som exempelvis degradering av skogar och omföring av våtmarker,
- effekter av skogsskötsel på växthusgasflöden
- effekter av naturliga störningar (exempelvis skogsbränder)
- tillgodoräknande av kolförråd i skogsprodukter.

För närvarande är omföring av skog till öppen mark inkluderad i LULUCF-redovisningen, medan reglerna inte tar hänsyn till degradering av skog – det vill säga minskad biomassa utan att marken blir helt avskogad. Om degradering togs med, något som föreslagits av den polynesiska staten Tuvalu, skulle det rätta till en obalans i systemet i synnerhet för de länder som valt att inkludera effekter av skogsskötsel i sin rapportering.

Marrakesh-principerna om LULUCF

- Hanteringen av dessa aktiviteter ska baseras på god vetenskap.
- Konsistent metodik över tid ska användas för uppskattning och rapportering.
- Det mål som slås fast i Kyotoprotokollets Artikel 3, punkt 1 ska inte förändras genom redovisning av LULUCF-aktiviteter.
- Förekomsten av kolförråd ska inte få tas in i redovisningen.
- Tillämpningen av LULUCF-aktiviteter ska bidra till bevarande av biologisk mångfald och hållbart utnyttjande av naturresurser.
- Tillgodoräknande av LULUCF-aktiviteter ska inte innebära att åtaganden överförs till en kommande period.
- Om effekterna av LULUCF-aktiviteter inte blir bestående ska detta redovisas utan förskjutning i tiden.
- Tillgodoräknande ska inte innefatta effekter av
 - förhöjda koldioxidhalter över den förindustriella nivån,
 - indirekt kvävedeposition
 - dynamiska effekter av åldersstrukturer som orsakats av verksamheter eller åtgärder före referensåret.

Skötsel av våtmarker har föreslagits som en ny LULUCF-aktivitet. Torrläggning av våtmarker är en betydande källa för växthusgasutsläpp, men det är tveksamt om utsläppen kan kvantifieras korrekt och rapporteras på ett sätt som är möjligt att kontrollera.

Inom ramen för Kyotoprotokollet har stater möjlighet att tillgodoräkna sig effekter av skogsskötsel, upp till ett tak som man enades om i det så kallade Marrakesh-ackordet. Några länder har föreslagit nya möjligheter i detta avseende för nästa åtagandeperiod, i syfte att stimulera fler stater att ta in skogsskötsel i sin redovisning. Några av de förslag som lagts skulle öka utrymmet för skogsskötselbaserad kreditering dramatiskt – och därmed minska kraven på utsläpps begränsningar i motsvarande omfattning.

Som framgått tidigare i denna rapport är utsläppen av koldioxid från störningar som skogsbränder och angrepp av skadegörare stora. Potentiellt kan de bli än större i framtiden, inte minst i boreala skogar. Vissa länder söker nu möjligheter att räkna bort dessa utsläpp från sin LULUCF-redovisning. I förhandlingarna kallas störningarna för ”force majeure”, trots att det alltså i själva verket handlar om effekter av en dynamik som är helt naturlig i en stor del av världens skogar.

Ett antal stater har föreslagit att kollagring i skogsprodukter (*harvested wood products* - HWP) ska inkluderas i LULUCF-redovisningen för nästa åtagandeperiod, något som andra stater motsätter sig. Förespråkarnas utgångspunkt är att en del av det kol som finns i skördat virke inte frigörs till atmosfären omgående, utan lagras i långlivade träprodukter (som till exempel trähus) eller i avfallsdeponier. Kritikerna hävdar att det saknas fungerande, konsekventa och tillförlitliga metoder att beräkna detta kolförråd. Om det blir möjligt att tillgodoräkna sig kollager i skördade skogsprodukter utan att samtidigt behöva redovisa utsläppen från den totala skogliga markanvändningen skapas dessutom enligt kritikerna incitament för ökad avverkning och därmed för ohållbart skogsbruk.

Åtaganden och referensnivåer

Ländernas åtaganden formuleras som förändringar av utsläppen i förhållande till ett basår. I Kyotoprotokollets första åtagandeperiod är basåret 1990 och målen ska vara uppnådda 2008-2012. Hur mål och basår för LULUCF sätts inför nästa åtagandeperiod är en viktig och komplex fråga som också är föremål för förhandlingar. Ett krav när det gäller avskogning är att åtaganden måste spegla faktiska minskningar av emissioner från avskogning och inte skapa incitament för att öka avverkningstakten innan åtagandeperioden börjar. Alla skogsekosystem i landet måste inkluderas, och såväl privatägd som statlig mark måste redovisas. Att ta fram en tillförlitlig bild av utgångsläget kommer sannolikt att bli svårt, eftersom faktaunderlaget är dåligt och miljöövervakningen bristfällig i många länder. En möjlighet är att sätta de gränser under vilka länder kan tillgodoräkna sig krediter för minskad avskogning försiktigt och med säkerhetsmarginaler. Det skulle kräva att länderna gör aktiva ansträngningar för att minska sina utsläpp innan de kan tillgodoräkna sig några krediter på detta område.

Det finns två principiellt olika sätt att lägga fast referensnivåer. Det ena bygger på att man utgår från historiska data om avskogningstakt, det andra på projektioner för framtiden. Tillförlitliga referensnivåer baserade på historiska data har den fördelen att de garanterar att rapporterade utsläppsminskningar faktiskt har skett. Referensnivåer baserad på projektioner innebär att länder skulle kunna tillgodoräkna sig krediter för utebliven avskogning, det vill säga avskogning som skulle ha skett i ett teoretiskt ”business-as-usual”-scenario.



10. Diskussion och slutsatser

Syftet med denna rapport är att översiktligt redovisa sambanden mellan skog, skogsbruk och klimat. Skog och skogsbruk i den boreala regionen diskuteras uteslutande i ett klimatperspektiv. En åtgärd eller en strategi som minskar utsläppen av växthusgaser beskrivs som positiv, oavsett vilka konsekvenser den kan ha i andra avseenden. Det betyder inte att klimatet anses vara överordnat andra aspekter, utan motiveras endast av strävan efter tydlighet. Först när man har en bild av klimateffekterna av olika handlingsalternativ kan de vägas mot konsekvenserna i andra avseenden, exempelvis ekonomiskt eller vad gäller effekter på skogens biologiska mångfald, andra miljövärden eller för dess sociala betydelse. Den diskussionen förs inte här.

En central utgångspunkt för analysen är bedömningen att 2 °C är en kritisk gräns för den globala uppvärmningen, och att det krävs drastiska begränsningar av utsläppen av växthusgaser under de närmaste decennierna för att den gränsen inte ska överskridas. Analysen av de boreala skogarnas betydelse för klimatet kan alltså inte bara inriktas på det långa tidsperspektivet, 100 år eller mer. Utvecklingen under de närmaste 30-40 åren är av avgörande betydelse.

Omkring 30 procent av allt kol i världens landekosystem finns i boreala skogar. Kolförrådet är större än i något annat landekosystem, och nästan dubbelt så stort som de tropiska skogarnas. Nästan 90 procent av kolet finns i skogsmarken. De enorma kolförråden gör boreala skogar till en nyckelfaktor för det framtida klimatet, i synnerhet som de kan förväntas vara särskilt känsliga för och reagera snabbt på stigande temperaturer.

Boreala naturskogar

Omkring hälften av världens boreala skogar är gamla naturskogar, helt eller nästan helt opåverkade av skogsbruk. De finns huvudsakligen i Alaska, Kanada och Sibirien. Sådana skogar kan fortsätta att fungera som kolsänkor även om de är många hundra år gamla, och de bygger över tid upp mycket stora lager av kol i marken. Här finns huvuddelen av de boreala skogarnas kolförråd. Även i ett globalt perspektiv är kolförrådet i marken i den norra delen av det boreala skogsbältet enormt, och det är av utomordentligt stor betydelse för framtidens klimat att detta kolförråd inte frisätts till atmosfären.

I ett varmare klimat kommer frekvensen av naturliga störningar – bränder och angrepp av insekter och andra skadegörare – att öka. Tendenser i den riktningen är redan synliga, och innebär att skogarnas kolbindning och kolförråd minskar. Om uppvärmningen överskrider en kritisk nivå kan också värmestress i kombination med vattenbrist orsaka omfattande skogsdöd i den boreala zonen. Stora delar av de boreala skogarnas kolförråd skulle då komma ut i atmosfären, vilket skulle driva på uppvärmningen ytterligare i en irreversibel och självförstärkande process. Som kritisk gräns för denna mekanism har föreslagits 3-5 graders höjning av den globala medeltemperaturen.

Med tanke på detta scenario kan man fråga sig om de boreala urskogarna gör störst nytta för klimatet om de får stå kvar, eller om det är bättre att avverka dem och utnyttja råvaran för att ersätta fossila bränslen och energikrävande byggmaterial, samtidigt som man anlägger ny skog? I ett internationellt perspektiv och på kort sikt är frågeställningen till stora delar irrelevant. Även om det vore önskvärt är det inte möjligt att omföra de enorma urskogsområdena i Sibirien och norra Kanada till produktionsskog inom lop-

pet av några decennier. Huvuddelen av dessa arealer kommer att förbli präglade av sin naturliga dynamik. Hur de kommer att påverka klimatet beror på hur snabba och omfattande förväntade förändringar av de naturliga störningsregimerna blir, vilket i sin tur avgörs av klimatförändringen.

Dessutom är klimateffekten av att omföra boreala naturskogar till produktionsskog negativ på kort och medellång sikt. Vid avverkning avgår delar av kolförrådet till atmosfären. Eftersom kollagren i såväl mark som biomassa är större än i en brukad skog blir också koldioxidavgången större. Det tar lång tid, sannolikt 100 år eller mer, för en ny skogsgeneration att binda motsvarande mängd kol, vilket alltså innebär att naturskogsavverkningar på kort sikt ökar den globala uppvärmningen ytterligare.

Brukade boreala skogar

I de brukade boreala skogarna har människan större möjligheter att påverka flödena av växthusgaser, både genom skogsskötsel och genom användning av den biomassa som skördas. När man analyserar konsekvenserna av olika handlingsalternativ är tidsperspektivet av stor betydelse. Åtgärder som ger stor positiv effekt på växthusgasutsläppen på lång sikt kan ge liten eller negativ effekt på kort sikt. Det som ter sig optimalt på 100 eller 200 år sikt kan vara kontraproduktivt i förhållande till vad som måste göras de närmaste decennierna.

En strategi som förordats är satsningar på ett intensivt skogsbruk, som dels ökar inbindningen av kol i den växande skogen, dels – och framför allt – ökar tillgången på vedråvara. Det finns studier som visar att potentialen för intensivskogsbruk med gödsling och användning av snabbväxande trädslag i Sverige är betydande. I ett klimatperspektiv är tanken bakom en sådan strategi att ju mer virke som kan skördas, desto mer skogsbränslen kan användas i energisektorn, och desto mer energikrävande material (stål och betong) kan ersättas med trä. I båda fallen skulle positiva klimateffekter uppstå genom att man undviker utsläpp av växthusgaser från användning av fossila bränslen.

Det finns dock flera tungt vägande invändningar mot ett sådant vägval. Riskerna är betydande. Angreppen av vissa skadegörare kan öka, vilket skulle innebära ökade utsläpp av koldioxid. Riskerna för ökad avgång av lustgas, en mycket kraftfull växthusgas, från skogsmarken ökar också. Kunskapen om vad som sker med de stora mängder kväve som bundits i skogsmarken vid avverkning av intensivt gödslade skogar är mycket begränsad. Detta gäller för övrigt också effekterna av den gödsling som bedrivs inom ramen för dagens skogsskötselmetoder.

Uttaget av skogsbränsle skulle kunna ökas kraftigt om man tar tillvara stubbarna efter avverkning, eftersom närmare 20 procent av trädets biomassa finns i stubben. Eftersom kolet i stubbarna kommer ut i atmosfären mycket snabbare om de bränns än om de bryts ner på plats i skogen tar det tid innan stubbrytning ger positiv klimateffekt. En studie anger omkring 15 år om man antar att det fossilbränsle som ersätts är olja. Om effekterna av markstörningar och minskad tillväxt i nästa skogsgeneration räknas in tar det ännu längre tid. En studie har visat att kolförlusten i ekosystemet var lika stor som kolinnehållet i de skördade stubbarna ännu 27 år efter stubbrytning, vilket alltså innebär att klimateffekten var klart negativ. Stubbrytning förekommer inte i nämnvärd utsträckning i svenskt skogsbruk i dag. Om det tar 30 år eller mer innan stubbrytning ger klimatnytta vore det således kontraproduktivt från klimatsynpunkt att börja använda den metoden, eftersom den under de närmaste kritiska decennierna skulle öka utsläppen av växthusgaser.

Skogsskötselstrategier som är inriktad på annat än att maximera produktion och virkesuttag har inte uppmärksamats mycket i diskussionen om skogen och klimatet. Här finns dock intressanta möjligheter, som bör studeras närmare.

Låt oss till att börja med konstatera att det finns en betydande potential hos de brukade skogar, såväl i Sverige som Europa, att fortsätta att lagra kol under många decennier om de får stå kvar och växa och om avverkningsmetoden inte ökar i takt med tillväxten. Skogarnas kolsänka kan därmed spela en viktig roll för att i ett klimatpolitiskt perspektiv vinna tid. Samtidigt bör det understrykas, att det finns risker med att lagra stora mängder kol i stående skog. Med tiden ökar risken för att kolet frisätts genom bränder, insektsangrepp eller stormar.

Skydd av skog för naturvårdsändamål innebär att kolförråden i dessa skogar kan fortsätta växa, men bevarande av biologisk mångfald och skydd av skogen som kolsänka går inte nödvändigtvis hand i hand. Att öka mängden död ved i skogslandskapet ökar exempelvis risken för bränder och därmed för frisättning av skog. De skogar som har högst naturvärden är inte nödvändigtvis samtidigt de som är effektivast som kolsänkor.

Om man vill lagra maximalt med kol i mark och träd kan senareläggning av avverkningar vara en bra åtgärd. Samtidigt innebär detta att virkesuttaget och därmed möjligheterna till bränsle- och materialsubstitution minskar. Det har dock visats att effekten av förlängda omloppstider med 20–40 år i skandinaviskt skogsbruk har positiva klimateffekter, i synnerhet i granskogar, även om man beaktar substitutionseffekterna (*se figur 7*). Det beror framför allt på att sågtimrets andel av virkesuttaget ökar.

Kalhyggesfritt skogsbruk skulle ha omedelbara och bestående positiva effekter vad gäller skogsbrukets påverkan på klimatet. Ett hygge är en kolkälla under upp till 15 år efter avverkning, och det tar den nya skogsgenerationen ett par decennier att kompensera för dessa utsläpp. Först 30–40 år efter kalhugningen är kolbalansen återställd. Vid kontinuerliga avverkningsmetoder, där man inte kalavverkar utan regelbundet tar ut små mängder virke ur skogen, sker inga stora kolförluster från marken och skogen förblir kontinuerligt en kolsänka. Det återstår att analysera hur en eventuellt minskad virkesproduktion i kalhyggesfritt skogsbruk långsiktigt påverkar substitutionseffekten och därmed den totala växthusgasbalansen.

I andra vågskålen ligger att såväl förlängda omloppstider som kontinuerliga avverkningsmetoder minskar tillgången till avverkningsrester (i det förstnämnda fallet dock endast tillfälligt) och därmed potentialen att ersätta fossila bränslen med skogsbränslen.

Substitution av bränsle och material

Substitutionseffekterna är av avgörande betydelse för de brukade skogarnas och skogsbrukets totala klimateffekt. Skogsprodukter kan ersätta fossila bränslen, både direkt genom förbränning och indirekt genom att ersätta energikrävande material, och därigenom minska utsläppen av växthusgaser.

Det är viktigt att hålla i minnet att substitutionseffekter i en mening är teoretiska. De bygger på antagandet att om en viss mängd träråvara tillförs marknaden så minskar användningen av andra råvaror eller material i motsvarande mån. I själva verket vore det fullt rimligt att anta att exempelvis ökad tillgång till skogsbränsle på marknaden påverkar prisbildningen på bränslen, vilket i sin tur ger lägre energipriser och därmed högre energikonsumtion, jämfört med om tillskottet inte skett. Annorlunda uttryckt kan en större eller mindre del av skogsbränslet komma att användas för ökad energikonsumtion istället för substituering av fossilbränslen. Inga av de substitutionsstudier som refereras i denna rapport tar hänsyn till sådana tänkbara marknads effekter eller analyserar effekterna av ökad tillförsel av skogsbränslen till ett system med ökande energianvändning.

Även om man bortser från eventuella marknads mekanismer tar det i allmänhet tid innan satsningar på ökad skogsproduktion ger mer betydande substitutionseffekter. Som framgått (*se figur 12*) ger även ett scenario med realistiskt stor materialsubstitution relativt

små effekter i det kortare tidsperspektivet, och skillnaden jämfört med ett alternativ med mycket begränsad substitution är liten. Över tid blir substitutionseffekterna stora eftersom de är kumulativa. De undvikta emissionerna adderas för varje skogsgeneration. Av flera skäl kan man ifrågasätta i vilken mån det är meningsfullt att beräkna substitutionseffekter över perioder på 200 eller 300 år. Klimatpolitikens bortre tidshorisont är knappt hundra år, och ingen torde kunna göra några sakligt grundande antaganden om vilka bränslen eller material som kan substitueras med trä om 300 år.

Hur det skördade virket faktiskt används är också av stor betydelse. I substitutionsstudier utgår man i allmänhet från att ökat virkesuttag används antingen för bränsle- eller materialsubstitution, eller till en kombination av båda. Detta avviker starkt från det faktiska förhållandet. Avsevärt mindre än 20 procent av det totala virkesuttaget bli konstruktionsvirke med lång livslängd. Tillverkning av papper och pappersprodukter förefaller generellt vara negativt från klimatsynpunkt, även om man utgår från att produkterna eldas och ersätter fossilbränslen efter användningen (*se figur 13*), eftersom tillverkningen är energikrävande. Det betyder alltså, att ökat virkesuttag minskar utsläppen av växthusgaser endast om det till större delen används för bränsle- och/eller materialsubstitution, inte för papperstillverkning.

En slutsats av detta är att minskad papperskonsumtion inom ramen för oförändrad avverkning skulle ha positiva klimateffekter genom att förskjuta produktionen i skogen och skogsindustrin mot större andel sågade trävaror och bränslen. Det skulle minska utsläppen i samband med produktionen och samtidigt öka substitutionseffekten. Dessutom ökar kolbindningen i skogen genom förlängda omloppstider och större virkesförråd. En reservation som bör göras är dock att det sannolikt är av betydelse hur en minskad papperskonsumtion sker, eftersom det troligen finns skillnader mellan olika pappersprodukter i klimathänseende. Pappersförpackningar som ersättning för platsförpackningar har sannolikt en effekt som skiljer sig från exempelvis tidningspapper. Några studier som belyser detta har dock inte gått att finna.

Referenser

- Aitken, S N m.fl. 2008:** Adaption, migration or extirpation: climate change outcome for tree populations. *Evolutionary applications*, vol 1:1, p. 95 -111.
- Balshi, M S m. fl. (in press):** Vulnerability of carbon storage in North American Boreal Forest to wildfire during the 21st century. *Global Change Biology*.
- Bergkvist, B & Olsson, M (red) 2008:** Kolet, klimatet och skogen - Så kan skogsbruket påverka. Information från LUSTRA.
- Bergkvist, B (red) 2007:** Kolet, klimatet och skogen. Skogsklädda, torvtäckta marker. Information från LUSTRA.
- Bernes C 2003:** En varmare värld? Monitor 18, Statens Naturvårdsverk.
- Blennow, K 2007:** Risk för vindfällning i skogsbruket. I "Alnarps forskare om klimatförändring", SLU.
- Bonan, G B 2008:** Forests and climate change: Forcings, feedbacks and climate benefits of forests. *Science*, vol. 320:5882, p. 1444-1449.
- Bond-Lamberty, B m. fl. 2007:** Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance. *Nature*, vol. 450:7166, p. 89-+.
- Bradshaw, C J A m. fl. 2009:** Urgent preservation of boreal carbon stocks and biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution*, vol 24, no 10, p. 541-548.
- Bryant, D m. fl. 1997:** The last frontier forests. World Resources Institute.
- Bäck, J & Hari, P 2009:** BVOC emissions from boreal forests. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. *Advances in Global Change Research*. Springer. (Kap 10).
- Cedergren, J 2008:** Kontinuitetsskogar och hyggesfritt skogsbruk. Skogsstyrelsens meddelande 2008:1.
- Ciais, P m. fl. 2003:** Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, vol. 437, p. 529-533.
- Ciais, P m. fl. 2008:** Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience* vol 1, p. 425-429.
- de Jong, J (red) 2010:** Konsekvenser av skogsbränsleuttag. Preliminär rapport. En syntes av Energimyndighetens forskningsprogram inom skogsbränsle och miljö 2005-2009.
- Eriksson, E m. fl. 2007:** Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 37, p. 671-681.
- Eriksson, H 2007 (red):** Svenskt skogsbruk möter klimatförändringar. Skogsstyrelsens rapport 8:2007.
- Eriksson, H 2008:** Skogens roll i klimatarbetet. PM 2008-05-30. Skogsstyrelsen.
- Eriksson 2011:** Muntlig uppgift Hillevi Eriksson, Skogsstyrelsen.
- EEA (European Environmental Agency) 2010:** European Union emission inventory report 1990-2008 under the UNECE convention on long-range transboundary air pollution (LRTAP). EEA technical report 7/2010.
- Fee, E (red.) 2011:** Scientific Perspectives after Copenhagen. Information Reference Document. European Union.
- Flannigan, M m. fl. 2009:** Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, vol. 15: 3, p. 549-560.
- Frieler, K m. fl. 2009:** High noon for +2°C. Fact sheet. Air Pollution and Climate Secretariat.
- Goetz, S J m. fl. 2007:** Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: observations and model results contrasting northern Eurasia and North America. *Env. Research letters*, vol. 2:4, #045031.
- Grelle, A 2010:** Skogens kolbalans bestäms av upptag och utsläpp. I "Sverige i nytt klimat - våtvarm utmaning." Formas Fokuserar 16.
- Hari, P & Kulmala, L (ed) 2008:** Boreal forest and climate change. *Advances in global change research* 27. Springer.
- Hari, P & Nikinmaa, E 2009:** The response of boreal forest to climate change. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. *Advances in Global Change Research*. Springer.
- Hari, P m. fl. 2009:** Evaluation of the Connections between Boreal Forests and Climate Change. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. *Advances in Global Change Research*. Springer.
- Hofer, P m. fl. 2008:** Forest and Carbon. Greenhouse gas dynamics of different management and wood use scenarios in Sweden. Geopartner AG, Zurich. Rapport för SLU. Opublicerad.
- IPCC 2007 a:** Fourth assessment report, Climate Change: Synthesis report.
- IPCC 2007 b:** Fourth assessment report, Climate change. Working group I report, chapter 11: Regional Climate Projections.
- IPCC 2007 c:** 4th assessment report, Climate Change Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 1: Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems.
- IPCC 2007 d:** Fourth assessment report, Climate change. Working group II report: Impact, adaptation and vulnerability, chapter 4: Ecosystems, their properties goods and services.
- Jacobson, S m. fl. 2000:** Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous forest stands. *Forest. Ecol. Management* 129, p. 41-51.
- Johnsson, M & Wardle, D 2010:** Inlagring och kolbalanser en åldrande skog. Presentation vid FSC-seminarium "Klimat,

- energi och skogsförvaltning” 2010-11-10: www.fsc-sverige.org/images/dokument/micael_johnson.pdf
- Jord- och skogsbruksministeriet, Finland 2010:** www.mmm.fi/sv/index/amnesomraden/pressmeddelanden/100824_suo_sv.htm
- Juday G m. fl. 2005:** Forests, land management and agriculture. Chapter 14 in “ACIA, Arctic Climate Impact Assessment”. Arctic Council.
- Kang, S m. fl. 2006 a (i Bradshaw, C J A m. fl. 2009):** Urgent preservation of boreal carbon stocks and biodiversity. Trends in ecology and evolution, Vol 24, no 10, p.541- 548.
- Kang, S m. fl. 2006:** Simulating effects of fire disturbance and climate change on boreal forest productivity and evapotranspiration. Science of the Total Environment, vol. 362: 1-3, p. 85-102.
- Kasischke, E S 2000:** Boreal ecosystems in the global carbon cycle. In Kasischke, E S m. fl. (eds): Fire, Climate Change and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Ecological Studies Series, Springer Verlag.
- Kasischke, E S m. fl. 1995:** Fire, global warming and the carbon balance of boreal forest. Ecological applications 5 (2) pp. 437 - 451.
- Kirilenko A P & Sedjo R A 2007:** Climate change impacts on forestry. PNAS, vol 104:50, p. 19697-19702.
- Kulmala, M m. fl. 2009:** Climatic Effects of Increasing Aerosols. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
- Kullman, L & Öberg L 2009:** Post Little-Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective. Journal of Ecology, vol. 97:3, p. 415-429.
- Kurz, W A m. fl. 1998:** Carbon budget implications of the transition from natural to managed disturbance regimes in forest landscapes. Mitigation and Adaption Strategies for Global Change. No 2, p.405-421.
- Kurz, W A m. fl. 2008 a:** Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. Nature vol. 452:7190, p. 987-990.
- Kurz, W A m. fl. 2008 b:** Risk of natural disturbances makes future contribution of Canada’s forests to the global carbon cycle highly uncertain. PNAS, vol 105:5, p. 1551-1555.
- Lagergren, F m. fl. 2006:** Current carbon balance of the forested area in Sweden and its sensitivity to global change as simulated by Biome-BGC. Ecosystems 9, p. 894-908.
- Larsson, S m. fl. 2009:** Möjligheter till intensivodling av skog. Slutrapport regeringsuppdrag Jo 2008/1885. SLU
- Lenton, T M m. fl. 2008:** Tipping elements in the Earth’s climate system. PNAS vol. 105:6, p 1786-1793.
- Lindholm, E 2010:** Energy use and Environmental impact of roundwood and forest fuel production in Sweden. Doctoral thesis, Dept of Energy and Technology, SLU.
- Lindner, M & Karjalainen, T 2007:** Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: a short review of recent progress. Eur. Forest Institute, Finland.
- Lindner m. fl. 2004 i Nabuurs, GJ m. fl. 2008:** Hotspots of the European carbon cycle. Forest Ecology and Management, vol 256, p- 194-200.
- Lindroth, A 2009:** Brev till Göran Persson, Sveaskog 2009-07-01.
- Lindroth, A m. fl. 2009:** Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. Global Change biology, vol. 15:2, p. 346-355.
- Lloyd A H 2005:** Ecological histories from Alaskan tree lines provide insight into future change. Ecology, vol. 86:7, p. 1687-1695.
- Lloyd, A H & Bunn A G 2007:** Responses of the boreal forest to 20th century climate variability. Environmental research letters, vol 2:4, #045013.
- Lundblad, M m. fl. 2009:** Flöden av växthusgaser från skog och annan markanvändning. Slutrapport regeringsuppdrag JO 2008/3958.
- Lundgren, C (odaterad) :** Fiberskog som vedråvara. Rapport från granprojektet, SLU, http://www-gran.slu.se/Webbok/PDFdokument/Ved_slutrapport.pdf
- Lundmark, T 2010:** Gödslad skog ger största klimatnyttan. I ”Sverige i nytt klimat - våtvarm utmaning”. Formas Fokuserar 16.
- Lundström, A m fl 2009:** Prognoser för markanvändningssektorn - 2030. I ”Flöden av växthusgaser från skog och annan markanvändning. Slutrapport av regeringsuppdrag Jo 2008/3958. SLU.
- Luyssaert, S m. fl. 2010:** The European carbon balance. Part 3: forests. Global Change Biology, vol 16: 1429-1450
- Luyssaert, S m fl 2008:** Old-growth forests as global carbon sinks. Nature 455, p. 213-215
- Macey, K m.fl. 2010:** ”LULUCF Briefing”. Underlagsmaterial framtaget av Climate Analytics för AirClim Secretariat.
- Magnani, F m. fl. 2007:** The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. Nature, vol. 447, p. 848-850.
- Malevsky-Malevich, S P m. fl. 2008:** An assessment of potential change in wildfire activity in the Russian boreal forest zone induced by climate warming during the 21st century. Climate Change, vol. 86:3-4, p. 463-474.
- Miner, R 2010:** Impact of the global Forest Industry on atmospheric Greenhouse gases. FAO Forestry Paper 159.
- Mjöfors, K & Strömberg, M:** Förändringar i skogens kolförråd - ett mått på stubbränslets klimatnytta. I ”Stubbskörd och miljöeffekter - en populärvetenskaplig lägesrapport, våren 2010”. SLU
- Moren, A-S & Olsson, M (red) 2007:** Kolet, klimatet och skogen - så funkar det. Information från LUSTRA 2007.
- Nabuurs, G J m. fl. 2008:** Hotspots of the European carbon cycle. Forest Ecology and Management, vol 256, p- 194-200.
- Naturvårdsverket 2011:** National Inventory Report Sweden 2011. Submitted under the UN Framework Convention on Climate Change and the Kyoto protocol. Swedish Environmental Protection Agency.
- Nordin, A m.fl. 2009:** Effekter av ett intensivare skogsbruk på skogslandskapets mark, vatten och växthusgaser. Faktunder-

- lag till MINT-utredningen. SLU.
- Olsson, M 2010:** Lagra eller använda skogen? I "Sverige i nytt klimat – en våtvarm utmaning". Formas Fokuserar 16. Formas.
- Olsson, R 2009:** Boreal Forest and Climate Change. AirClim report 23. Air Pollution and Climate Secretariat.
- Olsson, R 2010:** Boreal Forest and Climate Change – regional perspectives. AirClim Report 24. Air Pollution and Climate Secretariat.
- Pihlatie, M 2009:** CH₄ fluxes in Changing Climate. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
- Pihlatie, M, Pumpanen, J & Hari, P 2009:** N₂O emissions from Boreal Forests. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
- Pingoud, K, Pohjala, J & Valsta, L 2010:** Assessing the integrated Climatic Impacts of Forestry and Wood Products. Silva Fennica, vol. 44(1), p. 155-175.
- Repo, A m. fl. 2010:** Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. Global Change Biology – Bioenergy. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01065.
- Rummukainen, M & Källén, E 2009:** Ny klimatvetenskap 2006-2009. Kommissionen för hållbar utveckling.
- Rummukainen, M 2010:** Sveriges klimat i framtiden. I "Sverige i nytt klimat". Formas fokuserar 16. Formas.
- Räisänen, J & Smolander, S 2009:** Climatic Effects of Increased leaf Area: reduced surface albedo and Increased Transpiration. In Hari, P & Kulmala, L (ed.) 2009: Boreal Forest and Climate Change. Advances in Global Change Research. Springer.
- Sathre, R m. fl. 2010:** Primary energy and greenhouse gas implications of increasing biomass production through forest fertilization. Biomass and Bioenergy, vol. 34: p. 572-581.
- SCB 2009:** Skyddad natur 31 dec 2009. Statistiska meddelanden MI 41 SM 1001.
- Schellnhuber, H J 2009:** Tipping elements in the Earth system. PNAS 106:49, p. 20561-20563.
- Schellnhuber, H J m. fl. 2009:** WBGU Special report: Solving the climate dilemma – the budget approach. German Global Change Advisory Council, Berlin.
- Schlyter, F 2008 :** Granbarkborren- klimatförändringens vinare. I "Alnarps forskare om klimatförändringen", SLU.
- Scholes, R J 2004:** The Terrestrial Carbon Cycle. In Steffen, W m. fl. 2004: Global Change and the Earth System (chapter 2, p. 43.) Springer Verlag
- Skogsstyrelsen 2010:** Skogsstatistisk Årsbok 2010.
- Soja, A J m. fl. 2007:** Climate-induced boreal change: predictions versus current observations. Global and Planetary Change, vol 56. p. 274-296.
- Spracklen, D m. fl. 2008:** Boreal forests, aerosols and impacts on clouds and climate. Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 366:185, p. 4613-4626.
- Steffen, W m. fl. 2004:** Global Change and the Earth System. A planet under pressure. Springer Verlag.
- Stireman, J O m. fl. 2005:** Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: Implications of global warming. PNAS, vol. 102:48, p. 17384-17387.
- Tivy, J 1993:** Biogeography. A study of plants in the ecosphere. Longman Scientific & Technical, UK.
- UK Met Office 2009.** Map available at www.guardian.co.uk/environment/interactive/2009/oct/22/climate-change-carbon-emissions.
- Watson, R T m. fl. 2002:** IPCC special report on Land Use, Land Use Change and Forestry. IPCC 2002.
- Werner, F m. fl. 2010:** National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science & Policy, vol 13, p. 72-85.
- Witzell, J m. fl. 2009:** Skador på skog. Skogsskötselserien nr 12. Rapport, Skogsstyrelsen.
- Volney, W J A & Fleming, R A 2007:** Spruce budworm (*Choristoneura spp.*) biotype reactions to forest and climate characteristics. Global Change Biology, vol. 13: 8, p. 1630-1643.
- Woods Hole Research Center:** <http://whrc.org/global/highlatitude/index.html>.
- Ågren, G & Hyvönen-Olsson, R 2006:** Fungerar kretsloppen om vi använder mera biobränslen? Fakta Skog nr 3 / 2006. SLU.

