



Skogens klimatnyttor

– en balansakt i prioritering (utökad utgåva)

CEC SYNTES NR 06 | 2021 | LUNDS UNIVERSITET



Skogens klimatnyttor

– en balansakt i prioritering
(utökad utgåva)

Markku Rummukainen



LUNDS
UNIVERSITET

CEC Syntes Nr 06
Lunds universitet 2021



Denna syntes är ett bidrag till det strategiska forskningsområdet BECC.

Skogens klimatnyttor – en balansakt i prioritering (utökad utgåva)

Lunds universitet | 2021 | Denna rapport ingår som nr 6 i serien CEC Synteser.

Nyckelord: skog, klimat, kolsänka, klimatförändring, klimatnytta, bioenergi, substitution.

Citera som: Rummukainen, M. (2021) Skogens klimatnyttor – en balansakt i prioritering (utökad utgåva). CEC Rapport Nr 6. Centrum för miljö- och klimatvetenskap, Lunds universitet.

ISBN 978-91-984349-6-5

Beställ från:

Centrum för miljö- och klimatvetenskap

Sölvegatan 37

223 62 Lund

www.cec.lu.se/kontakt

Utgiven av Centrum för miljö- och klimatvetenskap, Lunds universitet

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden. Innehållet återspeglar inte nödvändigtvis Lunds universitets officiella ståndpunkt.

ISBN 978-91-984349-6-5

Omslagsbilder: Markku Rummukainen

Tryckt i Sverige av Media-Tryck, Lunds universitet, Lund 2021



Media-Tryck är ett svanenmärkt tryckeri. Läs mer om vårt miljöarbete på www.mediatryck.lu.se

MADE IN SWEDEN 

Innehåll

<i>Förord</i>	4
<i>Inledning</i>	4
1. Kol till och från skogen	6
1.1 Skogen tar upp och lagrar kol	6
1.2 Kol lämnar skogen vid uttag och användning av biomassa	8
1.2.1 Uttag av biomassa	8
1.2.2 Substitution	8
1.2.3 Biomassa för energi	9
2. Storleken av skogens klimatnyttor uppskattas olika	10
2.1 Nordiska siffror	10
2.2 En del av skogens kolsänkor är redan bortlovade i utsläppsminskningmålen	11
2.3 Olika sätt att räkna på utsläppen och upptagen.....	14
2.4 Vilka utsläpp är vems?	15
2.5 Även naturvård och hänsyn till sociala värden ger klimatnyttor.....	16
3. Att substituera eller inte substituera	17
4. Skogens klimatnyttor är en del av samhällets klimatomställning idag och framöver	19
5. Hur klimatneutral är biomassa från skogen?	21
6. Skogens klimatnyttor – en balansakt i prioritering.....	25
7. Andra aspekter än kol till och från skogen	28
8. Slutsatser	30
Referenser	32

Förord

Denna rapport är en uppdaterad version av Rummukainen (2021), med viss ytterligare litteratur samt vissa förtydliganden. Speciellt har avsnittet 5 vidareutvecklats. Mindre justeringar finns i en del andra avsnitt. Uppdateringen har inte föranlett några ändringar i slutsatserna.

Inledning

Skogen och skogsbruket har idag en stark närvaro i klimatdebatten. Det handlar inte minst om möjliga klimatlösningar förknippade med skogen, men föranleds också av att skogen är en del av klimatsystemet. Förändringar i skogar och i skogsbruket påverkar klimatet, och klimatförändringen påverkar skogens och skogsbrukets förutsättningar. I denna syntes ligger fokus på hur skogen på olika sätt kan bidra till klimatlösningar. Det handlar dels om upptag och lagring av koldioxid från atmosfären, dels om att ersätta fossila bränslen och fossilintensiva material med biobaserade produkter i samhällets klimatomställning. Syntesen fokuserar på svenska förhållanden och frågeställningar.

Det finns en generell enighet om att skogen och skogsförvaltningen har stor betydelse för klimatfrågan, men samtidigt finns också olika syn på vilka klimatnyttorna kan vara och hur de förhåller sig till andra mål som berör skogen eller som skogen kan bidra till (t ex Lundmark 2020, KSLA 2018, KSLA 2020, SOU 2020:73¹, Mather-Gratton m fl 2021). I de senaste tunga utredningarna som handlar om skogen och klimatet har frågan om skogens klimatnyttor inte behandlats i någon större omfattning (SOU 2020:4², SOU 2020:73³). Det måste också framhållas att skogen är en begränsad resurs – den räcker inte till allt som vi på ett teoretiskt plan hade önskat. Avvägningar och

¹ Se t ex utredningens sammanfattning, som lyfter fram ”en uttalad konflikt mellan olika intressenter” och ”behov att ta Sverige ur den destruktiva spiral där dialog ersatts av debatt.”

² Klimatpolitiska vägvalsutredningen lyfte fram åtgärder för ökade kolsänkor, men i sina åtgärdsförslag fokuserade man endast på åtgärder på jordbruksmark och återvätning av vissa skogs- och jordbruksmarker. Tillväxthöjande åtgärder, kolinlagring genom mer avsättning av skog, och kolinlagring i produkter nämndes endast kortfattat.

³ ”Vidare anges att utredningen ska analysera den framtida ökande efterfrågan av skogsråvara och utifrån denna analys föreslå de åtgärder som behövs för att kunna följa internationella åtaganden om biologisk mångfald och klimat... Att hitta sådana lösningar är en av vår tids största utmaningar och utredningen har endast kunnat visa på förslag som kan vara ett steg på vägen.” (SOU 2020:73, s.59). Utredningen har ”lagt särskilt fokus på förslag till lösning av de frågor som bedömts problematiska ur ett äganderättsperspektiv.” Vad gäller klimataspekter diskuteras i utredningen i olika långa ordalagor, bland annat ökad tillväxt, bioekonomi, kolinlagring, nationella miljömål och Sveriges internationella åtaganden.

prioriteringar angående olika mål är oundvikliga. Vilken kombination av lösningar som i slutänden väljs beror, utöver på själva klimatfrågeställningen, också på hur värden och mål kopplade till ekonomisk avkastning, biologisk mångfald och ekosystemtjänster, och skogens olika sociala värden⁴ vägs in, samt hur behov av och möjligheter gällande produkter och energi från skogsråvara utvecklas, inom ramen för samhällets hela klimatomställning. I den här rapporten ligger fokus på klimatnyttor från skogsmarken⁵.

⁴ Bland annat natur- och kulturmiljövärden och friluftsliv, vilka också anges i miljökvalitetsmålet Levande skogar. Det finns även värden som berör sysselsättning och landsbygdsutveckling.

⁵ Med "skogsmarken" avses här både marken, träden och annan biomassa.

1. Kol till och från skogen

1.1 Skogen tar upp och lagrar kol

Skogen är en del av kolets övergripande kretslopp. Växande skog tar upp koldioxid genom fotosyntesen. Drygt hälften av det upptagna kolet återförs till atmosfären genom cellandning (så kallad autotrof respiration). Av resterande kol (så kallad nettoprimärproduktion) stannar en del i levande träd och en del (barr, grenar, rötter och hela träd) dör och bildar förna. Förnan bryts i sin tur ned (heterotrof respiration) varvid även kolet i förnan successivt återgår till atmosfären. Upptaget i ett skogsbestånd varierar över dess livstid, men den resulterande kolinlagringen kan kvarstå under en lång tid även efter att skogen har vuxit till sig bortom de idag vanliga avverkningsåldrarna. Skogens upptag av koldioxid och klimatutsläpp handlar därför om en balans mellan tillväxt, avverkning, naturlig nedbrytning och naturliga avgångar genom självgallring och mortalitet vid störningar som stormar, bränder och insektsangrepp. Vid avverkning ökar nettoutsläppen från marken, utöver de utsläpp som hänger ihop med hur den uttagna skogsråvaran kommer att användas. Klimatutsläpp sker kontinuerligt även från dränerade organogena jordar (torvmarker) som används för skogsbruk, motsvarande drygt en tredjedel av kolupptaget i skogliga mineraljordar.

I den senaste skogliga konsekvensanalysen (Skogsstyrelsen 2015a) anges den årliga avverkningen av skog i Sverige till cirka 91 miljoner skogskubikmeter och den årliga tillväxten till cirka 122 miljoner skogskubikmeter, varav cirka 115 miljoner skogskubikmeter på produktiv skogsmark och 7 miljoner skogskubikmeter på annan mark. Både tillväxten och avgången har ökat i den svenska skogen under de senaste årtiondena, vilket gett ett ganska stabilt nettoupptag (tillväxt minus avgång genom avverkning och naturlig nedbrytning) i kolpooler på skogsmarken, dels som markkol, dels i levande biomassa. Samma trend gäller genomgående för hela Europa – både skogen och mängden kol i biomassan har ökat (Forest Europe 2015). Detta hänger i första hand ihop med hur skogen har förvaltats, dels den resulterande åldersstrukturen (t ex Besnard m fl 2018, Pugh m fl 2019), dels att avsatta och skyddade skogar har fått växa till. En mindre del av den ökade tillväxten kan bero på koldioxidhaltens ökning i atmosfären och den globala uppvärmningen (Hyvönen m fl 2007, Kellomäki m fl

2008, Hall m fl 2013, Haverd m fl 2020). Samtidigt finns det forskning som tyder på att snabbare växande träd i högre grad drabbas av träd mortalitet, vilket i så fall kan ta udden av en del av en tillväxtökning. Mortaliteten skulle kunna hänga ihop med att trädens livscykel accelererar eller att trädens snabbare tillväxt tar resurser från deras motståndskraft mot störningar (Brienen m fl 2020, Bugmann och Biegler 2010). De allra senaste åren har den årliga totala tillväxten minskat i den svenska skogen (SLU 2020). Orsakerna bakom detta är inte klarlagda än, men både ökad avverkning och effekten av störningar som torka tros ligga bakom (SLU 2020, s. 96, s. 134).

Att skogen växer och binder kol är ett ingående antagande vid sättandet av utsläppsminskningsmål. De antropogena koldioxidutsläppen kommer i huvudsak från användningen av kol, olja och naturgas, förändrad markanvändning och cementtillverkning. En ökad halt i atmosfären gör att mer koldioxid dels löses upp i havet, dels tas upp i ekosystem, vilket gör att cirka hälften av de antropogena koldioxidutsläppen snabbt lämnar atmosfären. I globala koldioxidbudgetar (t ex Matthews m fl 2009, Rogelj m fl 2018a, Rogelj m fl 2018b) för olika klimatmål beaktas dessa upptag. Därmed är de också avräknade i utsläppsminskningssbanor som avser klimatmål, såsom Parisavtalets mål att ”hålla ökningen i den globala medeltemperaturen långt under 2°C över förindustriell nivå samt göra ansträngningar för att begränsa temperaturökningen till 1,5°C över förindustriell nivå”. Hållbart förvaltande av skogar och skydd och förstärkande av kolsänkor, inklusive skogar, har dessutom en överenskommen dimension i det globala klimatarbetet, som återspeglas i Parisavtalets §5⁶. Utöver den kolsänka som ekosystemen redan tillhandahåller behöver utsläppen förknippade med förändrad markanvändning minskas och markrelaterad kolinlagring säkras och ökas. Det kan bland annat handla om minskad avskogning i världen och ökad återbeskogning och beskogning, samt genomgående ett mer hållbart förvaltande av skogen – allt detta som ett viktigt led för att kunna genomföra klimatomställningen (IPCC 2019b). Skogarna kan också behöva bidra till de så kallade ”negativa utsläpp” som krävs för att kompensera för en för långsam utsläppsminskning under första halvan av 2000-talet och/eller kvarvarande utsläpp på längre sikt inom sektorer som saknar potential till nollutsläpp (IPCC 2018). I Sveriges klimatpolitiska

⁶ Parterna bör vidta åtgärder för att, i förekommande fall, bevara och förbättra sådana sänkor och reservoarer för växthusgaser som avses i artikel 4.1 d i konventionen, inbegripet skogar. 2. Parterna uppmanas att vidta åtgärder för att genomföra och stödja, bl.a. genom resultatbaserade betalningar, det befintliga ramverk som fastställts i relevanta riktlinjer och beslut enligt konventionen för: politiska ansatser och positiva incitament för aktiviteter som rör minskning av utsläpp från avskogning och utarmning av skogar och vikten av bevarande av skogar, hållbart skogsbruk och förbättring av skogens koldioxidinlagring i utvecklingsländer samt alternativa politiska ansatser, såsom de för kombinerade utsläpps begränsnings- och anpassningsåtgärder för integrerat och hållbart skogsbruk, samtidigt som man bekräftar vikten av att främja nyttor som inte rör koldioxid i anknytning till sådana ansatser när så är lämpligt.

ramverk från 2017 ingår ökat upptag av koldioxid i skog och mark utöver referensnivå som en av möjliga ”kompletterande åtgärder” i de beslutade utsläppsminskningmålen.

Klimatpåverkan från förändrad markanvändning har varierat över tid, men det finns olika möjliga åtgärder för att minska relaterade utsläpp och till och med möjliga åtgärder för negativa utsläpp. Markrelaterade åtgärder är också väsentliga i världens länders nationella klimatplaner som föranleds av Parisavtalet, även om det finns osäkerhet om hur effektiva dessa åtgärder kommer att vara (t ex Grassi m fl 2017). Hur skogsbruket bedrivs, inklusive politiska styrmedel och socioekonomiska drivkrafter, är en central påverkansbar faktor som kan underlätta ökning eller driva minskningar av klimatnyttor från skogen.

1.2 Kol lämnar skogen vid uttag och användning av biomassa

1.2.1 Uttag av biomassa

Uttag av biomassa minskar kollagren i skogen. Vid en avverkning tas fraktioner (stam och ofta även grenar och toppar) ut för att användas i olika produkter, inklusive bioenergi. Kvarvarande fraktion lämnas kvar och bryts ned över tid. Hur stor nettoeffekten på lagringen av kol och utsläppen blir i samband med uttag beror på hur mycket biomassa som förs bort, hur den från skogen bortförda biomassan används och hur snabbt ny skog etableras. Avverkning kan också störa marken och leda till förluster av markkol och därmed leda till ökade klimatutsläpp.

1.2.2 Substitution

Kolinlagring kan bestå över tid i långlivade träprodukter. Därtill kan en så kallad ”substitutionsnytta” uppstå om biomassan ersätter material eller bränslen baserade på fossila råvaror med ett stort klimatavtryck, exempelvis cement eller stål. Substitutionsnyttan är komplex att beräkna eftersom den bland annat beror på vad som ersätts, hur den totala konsumtionen av råvaror, material och färdiga produkter utvecklas, vad som händer efter att den substituerade produkten använts klart, och eventuella fortsatta användningsområden av det som en gång har lagts in i produkten/kretsloppet. Virke samt andra avverkade träprodukter som används för substitution kan orsaka utsläpp i ett senare skede, till exempel när de eldas upp vid energiutvinning. Biobränslets utsläpp räknas som en del av markanvändningen i det

land biomassan kommer ifrån, i stället för att relateras till energisektorn i det land där biomassan utnyttjas.

1.2.3 Biomassa för energi

Vid skörd av biomassa för energiändamål återförs kolet till atmosfären när biomassan förbränns. Utsläppen vid förbränningen motsvarar den naturliga nedbrytning som annars hade skett i skogen, dock med skillnaden att den naturliga nedbrytningen sker under mycket längre tid. Den klimatnytta som förknippas med biomassa handlar om att biomassan ersätter kol, olja eller naturgas för utvinning av energi. För att en verklig klimatnytta ska existera krävs dock att kolinlagring motsvarande det som släpps ut vid förbränning, sker i ny biomassa (detta diskuteras vidare i avsnitt 5). Att utvinna biomassa för energi kan också medföra olika markanvändningsrelaterade klimat-, miljö- och socioekonomiska effekter (t ex Berndes m fl 2013) utöver det som direkt sker i skogen och vid förbränningen.

För att jämföra klimatteffekten av energiförsörjning med ett fossilt bränsle med bränsle från skogen finns det två växthusgasflöden som spelar störst roll. Det första flödet handlar om utsläppen vid förbränningen, vilket blir högre vid nyttjande av biobränsle eftersom det har generellt högre koldioxidutsläpp per producerad energienhet än fossila bränslen⁷. Eftersom det tar tid för ny skog att växa fram och binda kol innebär detta nettoutsläpp, som klingar av med tiden. Det andra flödet handlar om koldioxidavgångar från biomassan som hade ägt rum om den inte skulle ha skördats för biobränsle, utan istället lämnats kvar i skogen. Den hade då brutits ned med ett exponentiellt avtagande förlopp över en viss tid, som framförallt beror på typen av biomassa men också på klimatet (temperatur och fuktighet). För skogsbrukets restprodukter, som grenar och toppar (grot), kan det handla om ett tidsförlopp på ett par decennier, och något längre för stubbar. Om något av stamveden används för bioenergi tar det betydligt längre tid, i princip motsvarande hur gammalt virket som avverkades var, innan utsläppen från den utvunna energin kan sägas ha tagits upp i skogen på nytt (till exempel McKechnie m fl 2011).

⁷ Hur stora skillnaderna är beror på vilken typ av biomassa respektive vilken sorts kol eller olja det handlar om, tekniken som används och huruvida uppströmseffekter tas hänsyn till. Speciellt biomassa har dessutom vissa metan- och lustgasutsläpp jämfört med kol, olja och naturgas. Utsläppen kopplade till biobränslen överstiger utsläppen från användningen av naturgas och kol, men kan ligga närmare kolets och/eller kan vara jämförbara. Se avsnitt 5 för en mer detaljerad diskussion.

2. Storleken av skogens klimatnyttor uppskattas olika

2.1 Nordiska siffror

Fungerande kolsänkor är en förutsättning för att nå klimatmålen, och redan in-tecknade i satta klimatmål och beräknade utsläppsbanor. Upptag av kol på skogsmark sker dels i den levande biomassan, dels i mineraljorden. Långlivade träprodukter från skogen anses också vara en kolsänka, i meningen att kolet som ingår i biomassan följer med träprodukterna. Utsläppen räknas först vid eventuell förbränning. Skogsmarkens utsläpp kommer dels från dränerade organogena jordar (torvmarker) som används för skogsbruk, dels från naturlig nedbrytning och vissa andra faktorer.

I Sveriges nationella utsläppsinventeringar är skogen en stor sänka som trots viss mellanårsvariabilitet har legat på ganska stabil nivå under en längre tid⁸. Nettoupptaget på skogsmark 1990-2019 har varit cirka 38 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år. I genomsnitt har ytterligare 7 miljoner ton koldioxidekvivalenter hamnat i avverkade träprodukter. Siffrorna kan variera något mellan åren, speciellt om det inträffar kraftiga stormar som följs av ökade uttag av biomassa från skogen, samtidigt som mängden träprodukter som också ses som kolsänkor då blir större. (Naturvårdsverket 2020a.) För att ge ett exempel var nettoupptaget på skogsmark knappt 38 miljoner ton koldioxidekvivalenter år 2019⁹. I det nettot (avverkning har räknats av) ingår 34 miljoner ton som tagits upp i levande biomassa och drygt 13 miljoner ton som lagrats i mineraljorden. Samma år hamnade ytterligare 5,5 miljoner ton i avverkade träprodukter. Avgångarna fördelades i sin tur mellan drygt 6 miljoner ton från dränerade organogena jordar som används för skogsbruk, 3 miljoner ton från naturlig

⁸ www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-utslapp-och-upptag-fran-markanvandning/

⁹ www.slu.se/institutioner/mark-miljo/miljoanalys/Klimatrapporteringen/; I SCB:s statistik (www.statistikdatabasen.scb.se) och Naturvårdsverkets presentation ingår i kategorin dränerade organogena jordar enbart endast utsläpp från koldioxid, medan lustgas och metan från dikade marker läggs under "övrigt". I SLU:s statistik ingår alla tre utsläppen, lustgas, metan och koldioxid, från dränerade organogena jordar i den förstnämnda kategorin.

nedbrytning och en mindre mängd från bland annat gödsling och bränder. Nettoinlagringen på skogsmark och i träprodukter blev därmed sammantaget uppemot 43 miljoner ton det året.

Uppskattningar av skogens nuvarande klimatnytta i form av en kolsänka i någon form, eller genom substitution av fossilintensiva material och fossila bränslen, varierar en hel del. Delvis handlar det om sektorsgränser (vilka utsläpp som tillskrivs vilka sektorer) och vilka nyttor som inkluderas, delvis återspeglar det de val av antaganden som görs, vid kvantifieringen, liksom osäkerheter. Detta har förstås stor betydelse för hur resultaten kan tolkas.

Vetenskaplig litteratur som fokuserar på nordiska förhållanden inkluderar till exempel Lundmark m fl (2014), vilka kom fram till att den svenska skogens globala klimatnytta för närvarande handlar om ett upptag om 60 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år i Sverige, med potential för ytterligare 40 miljoner ton per år. I motsats till dessa resultat kom Soimakallio m fl (2016) för den finska skogens del i beräkningar för innevarande sekel fram till att även om substitution ledde till betydande klimatnyttor, åts de upp av inte minst minskad kolsänka på skogsmark, men också av utsläpp relaterade till insatsvaror för produktion och importerad biomassa. Sammantaget var resultatet att nettoutsläppen inte nämnvärt skulle minska vid användning av biomassa i landet. Skillnader mellan Lundmark m fl och Soimakallio m fl handlade bland annat om hur kolsänkan på skogsmark beaktades.

Skogsindustrierna (2019) presenterar å sin sida en beräkning om att näringsens sammanlagda klimatnytta är drygt 90 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år. I summan ingår skogens kolbindning (55 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år i beräkningen) och en substitutionseffekt av att skogsbaserad biomassa ersätter fossilbaserade produkter (42 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år i beräkningen), med avräkning för skogsindustrins egna utsläpp från processer, transporter och insatsvaror (4 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år i beräkningen). Dessa delar adresseras även i Skogsnäringsens ”färdplan för fossilfri konkurrenskraft” (Skogsindustrierna och Fossilfritt Sverige 2018).

2.2 En del av skogens kolsänkor är redan bortlovade i utsläppsminskningsmålen

Som nämnts ovan innehåller ”utsläppsbudgetar” och nationella klimatmål redan antaganden om markrelaterade kolsänkor idag och framöver, inklusive förväntade tillväxtförändringar som hänger ihop med mer koldioxid i luften och

klimatförändringen. Att tillväxten påverkas av koldioxidhaltens och klimatets förändring har därmed tagits med i fastställandet av vilka utsläppsminskningar som behövs (jfr Matthews m fl 2009, Rogelj m fl 2018a, Rogelj m fl 2018b). I många beräkningar anges dessutom ytterligare ökade skogsarealer i världen som ett sätt att åstadkomma negativa utsläpp som kan kompensera för en alltför långsam utsläppsminskningstakt eller kvarvarande utsläpp på sikt. Även i det svenska klimatpolitiska ramverket påtalas ökat nettoupptag av växthusgaser i skog och mark som en möjlig så kallad kompletterande åtgärd som kan behövas om det visar sig ogörligt att minska utsläppen i linje med klimatmålen. Kompletterande åtgärder behövs i det svenska klimatpolitiska ramverket även för att åstadkomma så kallade nettonegativa utsläpp efter 2045. Hur stora förväntningar som fås vid skogen, vad gäller negativa utsläpp, har än så länge inte utretts närmare (SOU 2020:4).

Osäkerheter och svårigheter när det gäller att mäta markrelaterade koluttag och kolavgångar gör att i både internationella räkenskaper och inom EU (Europaparlamentet och rådet 2018, Miljödepartementet 2019) kan bara en del av nettosänkan, efter avräkning av så kallade nationella referensbanor (EU 2018/841), räknas in som utsläppsminskning som bidrar till att uppfylla åtaganden mot klimatmålen. Dessa referensbanor har baserats på skogsbruket under 2000-2009, men hänsyn har också tagits till särskilda nationella förutsättningar, till exempel relaterade till skogars åldersstruktur. Dessutom förutsätts att en långsiktig kolsänka i skogen säkerställs. Det finns därtill bestämmelser för hur effekten av större naturliga störningar ska tas hänsyn till.

Sveriges referensnivå för perioden 2021-2025 är 38,7 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år (34,3 miljoner ton nettoinbindning på skogsmark [levande biomassa, mineraljord, dränerade organogena jordar] plus 4,4 miljoner ton i långlivade träprodukter, se Miljödepartementet 2019). För nästa period, 2026-2030, ska nya referensbanor tas fram. Det kan vara relevant att notera att referensnivån gäller för kolsänkan, inte avverkningsnivåer (Nabuurs m fl 2018).

Skogsbruket är en del av den bredare sektorn för markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk, LULUCF¹⁰ (Europaparlamentet och rådet 2018), som utöver skogsmark och träprodukter även omfattar åkermark, betesmark, bebyggd mark och våtmark. Utsläpp från andra sektorer hanteras inom ramen för ansvarsfördelningsförordningen, ESR ("Effort Sharing Regulation", som inkluderar t ex transporter), eller ingår i EU:s utsläppshandelssystem, ETS ("Emissions Trading

¹⁰"Land Use, Land-Use Change and Forestry" (LULUCF) är en egen sektor i nationell och internationell klimatrapportering.¹¹ Av överskott relaterade till skogsmark kan maximalt en mängd motsvarande 3,5 procent av landets utsläpp under basåret 1990 användas.

System”, till exempel stora industrianläggningar). LULUCF, ESR och ETS har olika regelverk, men det finns även kopplingar mellan dem. Om ett land inte förmår minska den del av sina utsläpp som hanteras inom ESR, finns det möjlighet att balansera sådana underskott med eventuella överskott från LULUCF, med vissa begränsningar. Även EU-direktivet om förnybar energi (RED II, Europaparlamentet och rådet 2018) är relevant i sammanhanget. Sammantaget är styrningen som på olika sätt berör frågan om klimatnyttor från skogen komplex (jfr Camia et al. 2021). För närvarande (2021) har revisionsarbete gällande både LULUCF-förordningen och RED II-direktivet inletts. EU har alldeles nyligen beslutat om en klimatlag med ökade utsläppsminskningmål, vilket rimligen kommer att även påverka ESR. Styrningen inom ETS kommer att fortsätta utvecklas. EU arbetar också med att ta fram en ny skogsstrategi, tillika andra strategier med relevans för skogen, däribland en för biologisk mångfald. EU:s nya taxonomi med hållbarhetskriterier för investeringar, med ett öga på bland annat klimat och biologisk mångfald, har också fått uppmärksamhet vad gäller biomassa från skogen och hur den ska klassificeras. Sammantaget kan man vänta sig fortsatt utveckling av gemensam styrning gällande mycket av det som berör förvaltningen av skogen. I Sverige planeras i sin tur bland annat en bioekonomistategi och både Klimatpolitiska vägvalsutredningen och skogsutredningen har nyligen lagts fram.

Idag, ifall kolsänkor inom LULUCF visar nettoupptag eller nettoavgångar i ett land, finns det möjlighet att jämka med andra medlemsländer som har motsatt balans. Specifikt för skogsbruk finns dessutom möjlighet för hantering av både överskott och underskott jämfört med den skogliga referensbanan, dock med vissa begränsningar¹¹ och viss flexibilitet¹². Hela LULUCF har dessutom ett lägstakrav, att sektorns utsläpp i varje medlemsland ska vara balanserade med minst lika stora upptag, sett över hela perioden 2021-2025 (och därefter under perioden 2026-2030).

Hur hela EU:s upptag och utsläpp inom sektorn LULUCF utvecklas framöver beror på vilka strategier och åtgärder som väljs. EU-kommissionen redogör i ett arbetsdokument för olika möjliga utvecklingar med både ökning och minskningar av nettosänkan (EC 2020). EU:s gröna giv öppnar för att kolsänkor inklusive skogar utökas som en del av klimatarbetet (EC 2019).

¹¹ Av överskott relaterade till skogsmark kan maximalt en mängd motsvarande 3,5 procent av landets utsläpp under basåret 1990 användas.

¹² Ifall den faktiska sänkan visar sig ligga under referensnivån under perioden, kan sänkor som ligger under referensnivån då räknas som nollsänkor upp till en fastställd flexibilitetsnivå, givet vissa förutsättningar.

Att skogen fångar in en del av de antropogena utsläppen har, som sagt, redan tagits hänsyn till vid framtagandet av kvantifierade klimatmål om utsläppsminskningar. Cirka hälften av de globala utsläppen tas ju snabbt upp i naturliga kolsänkor i havet och terrestra ekosystem, resten samlas i atmosfären och driver på klimatförändringen. Det är *tillkommande* upptag utöver dessa sänkor i havet och ekosystem på land som bidrar till de utsläppsminskningar som beräknas som nödvändiga för målen om att hejda klimatförändringen.

2.3 Olika sätt att räkna på utsläppen och upptagen

Det gängse sättet att räkna och jämföra nationella utsläpp av växthusgaser avser territoriella utsläpp och baseras på framtagna metodriktlinjer från FN:s klimatpanel, IPCC (Rypdal m fl 2006, IPCC 2019a). Dessa riktlinjer tillämpas även i Sverige och EU, samt i andra länder i deras rapportering till FN:s klimatkonvention inklusive inom ramen för Parisavtalet. Avverkning räknas som omedelbara utsläpp (bortsett från när skogsråvaran används för långlivade träprodukter. Kolinlagringen i träprodukter antas ha generella halveringstider¹³, för papper och kartong är den 2 år, skivor 25 år och sågvirke 35 år, IPCC 2019a, kap 12). De utsläpp som sker senare när samma biomassa används för energi har därmed redan bokförts. Inom klimatvetenskap används däremot särskilda bokföringsmodeller och globala vegetationsmodeller (t ex Le Quéré m fl 2018, avsnitt 2.2). De två räknesätten ger ganska olika resultat för nettokolinbindning i markbaserade system inklusive skogen.

Resultaten är likartade vad gäller sådana direkta mänskliga effekter som avskogning och beskogning, men skiljer sig åt när det kommer till brukad skog. Skillnaderna beror främst på att i globala modeller avses med brukad skog de skogar där avverkning i någon form sker. Dessutom räknas effekten av tillväxt på grund av högre koldioxidhalt och högre temperatur, liksom luftföroreningar och förändringar i naturliga störningar, som återkopplingar inom klimatsystemet. I nationella inventeringar räknas däremot även andra typer av förvaltd skog in. I Sverige ingår all produktionsskog och även avsatt skog, dock inte obrukad fjällskog högt upp. På denna större areal av skog bokförs även de indirekta och naturliga effekter som i globala modeller räknas som återkopplingar, som mänskliga upptag eller utsläpp.

¹³ Med halveringstid menas ”antal år det tar för det kol som lagras i produkten att minska till halva sin ursprungliga mängd”. En halveringstid karakteriserar en hel produktkategori, inom den förekommer kortare och längre halveringstider.

Den globala storleksordningen av respektive sätt att räkna kan illustreras med att för perioden 2005-2014 uppgick summan av marksektorns nettoutsläpp i nationella inventeringar till $0,1 \pm 1,0$ miljarder ton koldioxid per år, medan nettoutsläppen i globala modeller uppgick till $5,1 \pm 2,6$ miljarder ton koldioxid per år (IPCC 2019b). Var man räknar in klimateffekter har alltså stor betydelse för vilken klimatnytta som tillskrivs markförvaltningen inklusive skog, samt förståelsen för hur genomförda åtgärder förhåller sig till klimatmålen krav.

2.4 Vilka utsläpp är vems?

Det finns även andra beräkningsmetoder än den territoriella, till exempel att mellan länder omfördela de utsläpp som hänger ihop med konsumtion och produktion av varor som korsar nationella gränser. Vad gäller de sammanlagda avverkade träprodukterna hamnar enligt Peters m fl (2012) 40 procent i internationell handel¹⁴ (motsvarande 140 miljoner ton kol, vilket är samma som 504 miljoner ton koldioxid). Bedömningen av var en substitutionsnytta ska tillgodoräknas kan alltså skilja sig åt beroende på valet av räknesätt, men de totala globala utsläppen är förstås desamma i en konsumtionsbaserad fördelning som i en summering av de territoriella utsläppen, men hur de fördelas mellan länder skiljer sig åt.

I utsläppsinventeringar räknas, som tidigare påpekats, inga utsläpp från bioenergi vid förbränning in under energisektorn, inklusive transporter. Dessa utsläpp hanteras istället inom sektorn markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk (LULUCF), i det land som biomassan kommer från. Det innebär att när biomassa för bioenergi importeras bokförs utsläppen i det exporterande landet, och bioenergin bokförs som utsläppsfri i det importerande landet. Detta motiveras till exempel med att ett system som skulle spåra tillbaka den biomassa som förbränns till skogen skulle bli svårhanterligt, delvis på grund av tiden som gått mellan skörd och förbränning. Ett argument som också lagts fram är att eftersom biomassa förbränning orsakar större utsläpp per energienhet än fossila bränslen så skulle en tillskrivning av dessa utsläpp till energisektorn kunna motverka användningen av bioenergi (Camia m fl 2021).

Bioenergi är alltså inte utsläppsfritt, men dess utsläpp räknas in som en del av LULUCF, inte energisektorn. Vad gäller utsläpp från industriprocesser, transporter och insatsvaror inom skogsindustrier (bortsett från bioenergi för dessa), inkluderas de i utsläppsinventeringar inom andra sektorer än LULUCF.

¹⁴ Studien betraktade världsregioner och till exempel Europa behandlades som en region. Handel inom Europa ingår inte i mängderna.

I princip är förstås andra sektorsgränser än de etablerade tänkbara, men en full omräkning skulle kräva en total översyn. Någon förändring i den internationella rapporteringen är knappast möjlig, så troligen skulle man hamna i en situation med flera system om man vidtog förändringar, exempelvis nationellt. Exempelvis skulle produktion av biobränslen kunna anses generera klimatnytta (kolinbindning, inga utsläpp när biomassan skördas), och klimatpåverkan skulle istället kunna förknippas med användning (utsläpp). Detta skulle ge plus på en sektor och minus på en annan jämfört med att bioenergirelaterade utsläpp räknas in som en del av LULUCF som de görs idag. Andra systemgränser skulle, utöver att ändra bokföringen mellan olika sektorer, också kunna ge upphov till nya styrmedel. Att tänka i termer av system och nya styrmedel i stället för sektorer kan dessutom i sig skapa insikter om var både problem och möjligheter finns. Men, till exempel ett system i vilket utsläpp relaterade till biomassa för energi tillskrevs energi- och transportsektorn, skulle dock medföra metodrelaterade svårigheter vad gäller spårning mellan råvara, dess förädling och slutanvändning (Camia m fl 2021). Styrmedel som kompenserar för eventuella ekonomiska förluster i samband med ökad och långsiktig kolinlagring i skogen kan vid behov rimligen utvecklas även inom ramen för dagens sektorsindelning.

2.5 Även naturvård och hänsyn till sociala värden ger klimatnyttor

En del av koluptionen i skogen sker utanför den produktiva skogsmarken. Åtgärder som i sak handlar om naturvård eller hänsyn till sociala värden som friluftsliv kan ge klimatplus när skog får stå kvar och utsläpp relaterade till avverkning inte uppstår. En mer bestående ökad kolinbindning blir till på grund av sådana åtgärder. Åtgärdsalternativ som avsättning av skog (mindre utsläpp eftersom avverkning uteblir) och återvätning av dikade torvmarker (minskar pågående klimatutsläpp, vilket nämns t ex i SOU 2020:4, kap 6) kan därmed både leda till klimatnyttor från skogen, gynna biologisk mångfald och i många fall även aktiviteter som friluftsliv, naturbaserad turism och renskötsel. På samma sätt kan åtgärder som till exempel förlängd omloppstid och kontinuitetsskogsbruk också leda till både direkta nyttor för naturvård och sociala värden och samtidigt viss ökad klimatnytta, jämfört med gängse skogsskötselssystem.

3. Att substituera eller inte substituera

Substitutionseffekten kopplad till produkter kan vara betydande, men den varierar också stort mellan olika produkter och är svår att uppskatta. Antaganden och metoder varierar en hel del mellan befintliga studier, vilket påverkar möjligheterna att få en representativ helhetsbild av kunskapsläget.

En analys av 21 studier av substitutionsfaktorer, främst gällande material inom byggsektorn (Sathre och O'Connor 2010), visade på ett spann för substitutionseffekt på -2,3 till 15 kg kol per kg kol (dvs. användning av trämaterial med ett kolinnehåll på 1 kilo leder till mellan 2,3 kg utsläppsökning och 15 kg utsläppsminskning). Medelvärde var 2,1 och för de flesta varierade värdena mellan 1 och 3. Resultaten var inte alltid konsistenta mellan olika studier. Sammanfattade resultat för 433 olika substitutionsfaktorer från 51 studier (Leskinen m fl 2018) visade i sin tur att de flesta värden (95%) varierade mellan en substitutionseffekt på mellan -0,7 och 5,1 kg kol per kg kol (dvs. användning av trämaterial med ett kolinnehåll på 1 kilo leder till mellan 0,7 kg utsläppsökning och 5,1 kg utsläppsminskning). Spannet berodde dels på olika antaganden och metoder, dels på att substitutionsfaktorer för olika material ingick i studierna. Det som substituerades spände över bland annat cement, betong, stål, aluminium, och plaster. I genomsnitt visade sig substitutionseffekten vara 1,2, vilket betyder viss utsläppsminskning jämfört med utan någon substitution. De flesta substitutionsfaktorer i studien av Leskinen m fl gällde också för byggsektorn. Däremot fanns få studier om sådana träbaserade produkters substitutionseffekt gällande textilier och biobaserade kemikalier. I studien påpekades också att utöver kunskap kring substitutionsfaktorer finns det ytterligare aspekter som behöver beaktas i tillämpningen av substitutionsfaktorer i beräkningar av klimatnyttor, däribland hur kolsänkor på skogsmarken utvecklas, liksom hur träprodukter fungerar som kolsänkor över tid.

Många beräkningar av substitutionseffekten kritiserar också för att de inte hanterar problematiken kring tiden det tar för ny biomassa att leverera utsläppsneutralitet, förändringar i konsumtion, och hur klimatnyttan från substitution minskar när mindre fossilintensiva processer och produkter ersätter det som substitueras (Harmon 2019, Seppälä m fl 2019, Leturcq 2020). Inbakat i antagandena i många beräkningar är dessutom att uttag av biomassa inte påverkar kolinlagringen. Ett sådant antagande kan

vara mindre giltigt vid ökad avverkning eller för tidshorisonter upp till några årtionden (se avsnitt 5). Seppälä m fl (2019) introducerar en ”required displacement factor, RDF” med anledning till detta. Den ger ett mått på hur stor substitutionsfaktorn *borde* vara för att klimatnyttan från substitution och effekten på kolsänkan av uttaget av biomassa ska kompensera för varandra vid ökade biomassauttag från skogen. Generellt visade RDF:s sig vara högre än sedvanliga substitutionsfaktorer, det vill säga att substitutionseffekten skulle behöva öka för att kompensera för minskat kolupptag på skogsmark.

En betydande del av substitutionseffekten hamnar utanför Sveriges gränser i exporterade produkter. Importerade biobränslen i sin tur (se avsnitt 2.4) beräknas som klimatneutrala i Sverige vid användning, men redovisas som utsläpp i det exporterade landets utsläppsstatistik. Detta innebär alltså att effekterna av substitution ibland bokförs inom ett land, och ibland utanför landet, beroende på produkt och export och import, vilket också kan göra beräkningar och överskådlighet svårare.

4. Skogens klimatnyttor är en del av samhällets klimatomställning idag och framöver

Den centrala frågan är förstas hur klimatnyttan från skogen kan maximeras och hur skogen ska förvaltas, som en del av hela klimatomställningen i samhället, tvärs över alla sektors- och aktörsgränser, och med ett öga på sidonyttor och målkonflikter. Klimatnyttan av exempelvis en hög substitutionseffekt urholkas om den totala konsumtionen ökar, jämfört med motsvarande substitutionseffekt vid en mer hållbar konsumtion. Effektivare återvinning med större bibehållet materialvärde och resurseffektivare och kretsloppsanpassade produkter behövs som hävstång för klimatomställningen även vid substitution. Skogens klimatnytta hänger därmed egentligen alltid ihop med samhällets klimatomställning i stort. Till exempel beror behovet av flytande bibränslen på transportsystemets utveckling, inom vilket klimatnytta kan uppnås genom olika kombinationer av bibränslen, elektrifiering och effektivisering av transportarbetet.

Substitutionsfaktorn är vidare i praktiken dynamisk med tanke på att produktionen av det material som ersätts förändras över tid. Om fossilintensiteten i material som i någon omfattning ersätts genom substitution minskar genom nya tillverkningsmetoder, minskar också substitutionsfaktorn. Substitutionseffekten kan i sin tur ändras när en produkts livscykel utvecklas, i framtida värdekedjor eller värdecirklar (t ex genom återvinning eller återanvändning) (t ex Leskinen m fl 2018). Utöver frågor som ”Hur mycket av cement, stål, plast och fossila bränslen kan ersättas med material och energi från skogsråvara?” finns även frågor som ”Vilken förbränningsteknik används?”, ”Finns tillgång till avskiljning och lagring av koldioxid?”, ”Hur produceras cement, stål och plast i framtiden?”, ”Hur fortgår effektiviseringarna av energi- och materialanvändning?” och ”Hur mycket bibränslen behövs för transportsystemets omställning när även elektrifiering och effektivare transportarbete i högre grad kommer till stånd?” (Klimatpolitiska rådet 2019). Därtill spelar det in hur efterfrågesidan och

konsumtionsmönstren utvecklas – vilka produkter kommer efterfrågas och i vilken omfattning?

Det finns också det större sammanhanget, där maximering av en viss typ av klimatnytta kan innebära kompromisser gällande andra samhällsmål, till exempel kan prioritering av tillväxthöjande åtgärder och ökad avverkning å ena sidan slå mot naturvård å andra sidan (t ex Nordström m fl 2016).

Det råder ingen tvekan om att skogen – genom kolinlagring i marken, levande biomassa, och långlivade produkter, liksom genom biomassa för energi och substitution av fossilintensiva material – ger klimatnyttor. Hur skogens klimatnyttor beskrivs, värderas och kvantifieras varierar dock som sagt, vilket komplicerar både jämförelser mellan olika ansatser, och svar på frågan om vilka klimatnyttor skogen ska leverera. Olika beräkningar och beskrivningar hyser olika antaganden, olika val av systemgränser, olika tidshorisonter och olika förhållningsätt till det större sammanhanget när det gäller praktik och styrning.

5. Hur klimatneutral är biomassa från skogen?

Uttag av biomassa minskar kollagen på skogsmark både genom bortförel av kol i form av virke och avverkningsrester och genom ökade utsläpp från hyggen. Kolet kan omsättas i bioenergi, eller hamna i träprodukter som i sin tur kan vara kolsänkor under en kortare eller en längre tid (se avsnitt 3). När ny kolinlagring genom nyplantering och tillväxt har skett motsvarande nettoutsläppen, kan den uttagna biomassan tänkas vara klimatneutral (eller kolneutral) (t ex Berndes m fl 2016, EASAC 2017)¹⁵. Beräkningar vad gäller klimatneutralitet för bioenergi från skogen, kortlivade produkter från biomassa, och även kolinlagring i långlivade träprodukter, är dock känsliga för en rad antaganden. Även här finns frågeställningar kring systemavgränsningar – till exempel huruvida beräkningar även ska ta hänsyn till klimatavtryck från utvinning av råvara, insatsvaror, transporter, samt saker som torkning (biobränsle), dikning och andra skogsbruksaktiviteter som medför utsläpp. Tidsaspekten är också central (t ex Berndes m fl 2013) – i ett kortare tidsperspektiv kan utsläppen förknippade med bioenergi överstiga utsläppen från motsvarande fossilbränsleanvändning (t ex Schulze m fl 2012). Uppskattningar av den tid det tar att gå från biomassauttag till klimatneutralitet varierar en hel del och spänner från tiotals till ett par hundra år (jfr Bentsen 2017).

Utsläppen från bioenergi är generellt högre vid förbränning än utsläppen från fossila bränslen, detta gäller särskilt naturgas och olja. I jämförelse med kol varierar uppskattningarna från något högre utsläpp från bioenergi till att utsläppen är jämförbara. Resultatet vid en jämförelse beror bland annat på vilken typ av biobränsle respektive sort av kol eller olja som det är frågan om (t ex Mäkipää m fl 2015), huruvida uppströmseffekter inkluderas (utsläpp förknippade med kedjan från utvinning av råvaran till förbränning), den aktuella tekniken vid förbränningen, och till viss del även

¹⁵ Sådan klimatneutralitet diskuteras ofta med avsikt på landskapsnivå med avverkning och tillväxt på olika arealer, vilket berörs längre ner i texten. Klimatneutralitet kan också avse att biobränslen betraktas som utsläppsneutrala i EU inom energisektorn, se avsnitt 2.4.

om jämförelsen avser endast koldioxidutsläpp eller även utsläpp av metan och lustgas (jfr t ex Zetterberg och Chen 2015, Leturcq 2014).

IPCC:s riktlinjer för utsläppsinventarier utgör grund för nationell uppföljning av utsläpp och klimatrapportering. I den senaste uppdateringen för energisektorn (IPCC 2016) specificeras grundvärden för utsläppsfaktorer. För råolja ligger värdet på 73 ton koldioxid per TJ (spann 71-76), 56 ton/TJ för naturgas (54-58), 112 ton/TJ för träbaserad biomassa ("wood/wood waste" 95-132), 95 ton/TJ för stenkol (90-100) och 101 ton/TJ (91-115) för brunkol. Enligt ovan är utsläppen från biomassa omkring det dubbla jämfört med naturgas, 50 procent större än från olja och cirka 15 procent högre än från kol. Spansen överlappar varandra till viss del och jämförelser mellan olika bränslen kan också, som redan påpekats, skilja sig åt beroende på den exakta typen av biomassa och fossilt bränsle. Utsläppsfaktorer för metan- och lustgasutsläpp är generellt större för biomassa än kol, olja och naturgas.

Riktlinjerna tillåter även användning av nationella utsläppsfaktorer som tar hänsyn till exempelvis vilka specifika tekniker som används vid förbränning. Olika uppströmsutsläpp är inte medräknade. I den senaste svenska nationalrapporteringen till FN:s klimatkonvention är svenska utsläppsfaktorer liknande IPCC:s grundvärden när det gäller naturgas, men något lägre för olja, och biomassa och kol visar jämförbara nivåer (Naturvårdsverket 2020b). Naturvårdsverkets vägledning för att beräkna direkta utsläpp¹⁶ specificerar utsläppsfaktorer med 96 ton koldioxid per TJ för träbränsle, 105 ton/TJ för torv, ca 75 ton/TJ för eldningsolja, 57 ton/TJ för stadsgas, 93 ton/TJ för stenkol, och 103 ton/TJ för koks. Dessa värden återspeglar punktutsläppen vid förbränningen, inte utsläpp i ett livscykelperspektiv. Hur värden ser ut varierar en del mellan olika länder. I exempelvis Tyskland, där kolet utgör en större del av energiförsörjningen, ligger biomassans utsläpp/energienhet nära eller något över kolets¹⁷.

Som tidigare anförts är tidsaspekten central vid diskussioner om klimatnyttor relaterade till skogen. Att klimatneutralitet vid förbränning/uttag av biomassa för energiändamål kan ta lång tid att uppnå (Lindroth m fl 2009, Amiro m fl 2010, McKechnie m fl 2011, Besnard m fl 2018) beror på att nyetablerad skog, även om den börjar binda kol efter plantering, behöver växa en tid innan den hunnit ta upp lika mycket kol som det fanns i den skog som avverksats. Till detta bidrar flera förändringar vid en avverkning som

¹⁶ <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i-miljoarbetet/Vagledning/Luft-och-klimat/Berakna-din-klimatutslapp/Berakna-direkta-utslapp-fran-forbranning/>

¹⁷ Dvs. cirka 95 ton koldioxid /TJ för stenkol, 100-110 ton/TJ för brunkol, och 108 ton/TJ för "waste wood and wood scraps"). Värdena är från Tysklands National Inventory Report 2020, se <https://unfccc.int/documents/226313>

påverkar dels fotosyntesen, dels respirationen. När löv- och barrytan minskar eller försvinner, minskar fotosyntesen och cellandningen påverkas. Nedbrytningen av organiskt material i marken fortsätter, samtidigt som produktionen av förna minskar. Utan trädens skuggande effekt kommer mer solinstrålning markytan till godo och temperaturen lokalt ökar, vilket kan bidra till ökad nedbrytning. Dessutom finns mer material som utsätts för nedbrytning, i och med kvarlämnande av avverkningsrester, kvarvarande fin- och grovrötter och stubbar. Avverkning stör också marken (Dean m fl 2017, Vestin m fl 2020), vilket kan påverka markkolet under flera årtionden, inte minst nära jordytan och speciellt när avverkningsrester tas till vara. Befintliga studier är färre gällande hur markkolet påverkas i djupare jordlager (Achat m fl 2015, Clarke m fl 2015, James och Harrison 2016, Gross m fl 2018). Den viktiga mykorrhizan som verkar i kolcykeln (Clemmensen m fl 2013) och innehåller organiskt material påverkas också, men effekten ter sig än så länge som ganska osäker (Jones m fl 2003, Varenius m fl 2016, Varenius m fl 2017). Sammantaget byts en positiv kolbalans före avverkning ut mot en negativ kolbalans efter en avverkning (Buchmann och Schultze, 1999, Amiro m fl 2010, Paul-Limoges m fl 2015, Besnard m fl 2018). Hur snabbt kolbalansen på de berörda skogsmarken åter blir positiv varierar med bestånd, men det kan handla om upp till 10-20 år.

Tiden det tar innan klimatneutralitet/klimatnytta erhålls för biobränsle (eller olika långlivade träprodukter) från skogen beror alltså på skillnaden i utsläpp vid förbränning jämfört med bränslen som annars hade använts (jfr utsläppsfaktorerna ovan) (vid materialsubstitution handlar det om vilket material som ersätts och hur det tagits fram). Vilken fraktion som tas ut spelar också roll, samt hur snabbt ny skog etableras, och hur nettoutsläpp från hygget utvecklas. Även om grenar och toppar skulle brytas ner ganska snabbt om de lämnades i skogen – när det handlar om stubbar skulle det dock ta årtionden och ännu längre tid för hela träd – är den naturliga nedbrytningstiden längre än när biomassan används för bioenergi. Skörd av biomassa för bioenergi tidigarelägger alltså utsläpp jämfört med de naturliga nedbrytningstiderna i skogen.

En viktig aspekt när det kommer till biomassa och dess klimatneutralitet är generellt vad som ska jämföras med vad och hur skogen hade utvecklats om ingen avverkning ägt rum (t ex Birdsey m fl 2018). Det återspeglas i de skilda innebörderna av begrepp som ”carbon debt” (summan av minskad kolinlagring vid uttag av biomassa och större utsläpp från bioenergi jämfört med fossila bränslen) och ”carbon debt payback time” – tiden det tar att fånga in motsvarande mängd kol i ny biomassa (Buchholz m fl 2015), samt ”parity” – tiden det tar för ny tillväxt att ta upp koldioxid motsvarande kolskulden plus de upptag som hade skett om avverkning inte ägt rum (t ex Nabuurs m fl 2017). Att uppnå denna senare paritet tar längre tid än att betala en kolskuld.

En yta på vilken äldre skog ersätts med yngre skog, ligger alltså i obalans när det gäller utsläpp och upptag jämfört med hur situationen såg ut innan avverkning. Enstaka jämnåldriga bestånd ligger förstås också i obalans med antingen nettoupptag eller avgång. I ett landskapsperspektiv kan bestånd av olika åldrar tänkas kompensera för varandra vad gäller summan av kolavgångar och kolupptag vid varje given tid (t ex Berndes m fl 2013). Vid en sådan balans kan också långlivade träprodukter innebära en viss kolsänka, men på bekostnad av större möjlig nettokolinlagring på skogsmark (Ter-Mikaelian m fl 2015, Pukkala 2016).

Sammantaget är ”klimatneutralitet” ett begrepp som svårligen kan användas generaliserande, då det rymmer flera olika aspekter och variabler som måste beaktas (Berndes m fl 2016, EASAC 2017, Nabuurs m fl 2017, Cania m fl 2021). Hur nära klimatneutralitet man kan komma och när beror på vilken fraktion av biomassa som används och för vad, hur snabbt ny kolinlagring uppstår, och vad man jämför med, vilket anförts i tidigare stycken.

Värt att beakta i sammanhanget är att EU-direktivet om förnybar energi (RED II, Europaparlamentet och rådet 2018) anger hållbarhetskriterier, inklusive skydd av mark med stora kollager, för energi från biodrivmedel, flytande biobränslen och biomassabränslen. Råvarorna får generellt inte komma från mark med stort värde för den biologiska mångfalden (t ex naturskog, marker utsedda för naturskydd), och inte heller från mark med stora kollager (t ex våtmarker) och/eller torvmarker. Användningen av energi från biodrivmedel, flytande biobränslen och biomassabränslen måste också minska utsläppen med en viss mängd jämfört med fossila bränslen. Kriterierna gäller både för inhemska och importerade råvaror. Det finns också än fler aspekter att ta hänsyn till. Till exempel Black-Samuelsson, m fl (2017) lyfter fram kriterier som bland annat avser vatten, urfolks och lokalsamhällens möjligheter och rättigheter, och att skadliga utsläpp, till exempel av partiklar, tungmetaller, svavel- och kväveoxider, inte ska ske. Att diskutera hållbarhetskriterier mer genomgående ligger utanför denna rapports fokus, men ovan nämnda aspekter påminner om att frågan om skogens klimatnyttor behöver samsas om uppmärksamheten med andra viktiga frågeställningar rörande skogen och dess roll i samhället.

6. Skogens klimatnyttor – en balansakt i prioritering

En viss lösnings klimatnytta beror på vilken tidsperiod man tittar på – det vill säga vilken tidsperiod som prioriteras. Tidsaspekten är central för att kunna diskutera klimatnytta i relation till om skogen ska stå kvar och binda kol, eller om biomassa från skogen ska användas för substitution (material och energi). I det sistnämnda fallet spelar det roll vad skogsråvaran substituerar, vilken livscykel produkterna har, och hur substitutionsnyttor påverkas av samhällets hela klimatomställning. Huruvida klimatnyttan ska ingå i territoriella räkenskaper eller globalt kan också ha betydelse för resultat för beräkningen av substitutionseffekten (Lundmark m fl 2014). Det kan också finnas olika synsätt kring sektorsgränser, vad som ska inkluderas i räkenskaperna, och hur bokföring av utsläpp och utsläppsminskningar ska fungera vid en viss styrning.

Den övergripande debatten i dagsläget definieras därmed av två ytterligheter (KSLA 2018):

1. Skogen ska stå kvar och lagra kol.
2. Skogen ska användas till produkter som via substitution minskar andra utsläpp och samtidigt kan lagra kol. Här inkluderas även bioenergi som substituerar fossila bränslen, men utan kolinlagring.

Att låta skogen stå – eller att i alla fall begränsa avverkningen – och samtidigt använda en större andel biomassa för långlivade träprodukter snarare än kortlivade sådana, skulle i närtid ge maximalt av skogsrelaterade kollager och därmed ge en större bromsning av koldioxidhaltens ökning i atmosfären jämfört med nuvarande eller en mer omfattande avverkning (t ex Pukkala 2018). Detta hänger ihop med att det tar tid för nyetablerade träd att ta upp samma mängd kol som den avverkade äldre skogen hade hanterat om den fått stå kvar. Och även om trädens kolupptag minskar i åldrande bestånd när den respirerande biomassan ökar (t ex Pugh m fl 2019), hade den avverkade skogen ändå fortsatt att lagra ytterligare kol om den fått stå. Dessutom orsakar avverkning på kort sikt nettoutsläpp från hyggen, som påpekats tidigare. När det gäller långlivade respektive kortlivade produkter, orsakar också kortlivade sådana, som biomassa för

energi och pappersmassa, nettoutsläpp på kort sikt. Skogar som får stå kvar består som kollager under lång tid, till skillnad från flertalet produkter. Till och med gamla skogar kan fortsätta att utgöra en viss kolsänka, till och med under flera hundra år (Luyssaert m fl 2008, Gundersen m fl 2021, Luyssaert m fl 2021).

Ett viktigt argument för att satsa på största möjliga kolinbindning, i synnerhet under de närmaste årtiondena, skulle vara att "köpa tid" för samhällets klimatomställning, under vilken man tar fram utsläppsfria eller lågkols-tillverkningsprocesser och mindre fossilintensiva material och fossilfria energislag, samtidigt som man gör resurs- och energieffektiviseringar. Detta sammantaget – största möjliga kolinbindning, i kombination med en klimatomställning – skulle kunna bidra till att begränsa de kumulativa koldioxidutsläppen, vilket är avgörande för att begränsa klimatförändringens omfattning (t ex Matthews m fl 2009). En sådan strategis långsiktiga effekt skulle bero inte minst på hur samhällets klimatomställning mot fossilfrihet fortskred under den tiden som koluttaget i skogen tilläts överskrida klimatnyttan via substitution.

Hur olika typer av väder- och klimatrelaterade störningar utvecklas framöver har också viss betydelse för frågan, med tanke på de skador störningar kan orsaka på träd och mark (t ex Jönsson m fl 2007, Blennow m fl 2010, Langvall 2011, Nabuurs m fl 2013, Granath m fl 2020). Uppbyggda kollager på skogsmark påverkas vid exempelvis torka, stormar, skogsbränder och insektsangrepp. Vid störningar som exempelvis stormar kan det fällda virket ändå skördas, och därmed motsvarande avverkningar utebli på andra arealer, vilket kan kompensera för störningens effekt på kolförråden. I den senaste Skogliga konsekvensanalysen SKA15 (Skogsstyrelsen 2015b) bedöms att skadenivåerna generellt kommer att öka med klimatförändringen, men det understryks också att "skadenivåerna måste bli betydligt högre än idag för att påtagligt sänka tillväxten", vilket innebär att störningarna inte kommer ha en betydande effekt. Risken för klimatrelaterade biotiska och abiotiska skador kan också påverkas av val av skogsbruksmetoder, inklusive åtgärder som avser anpassning till klimatförändringen (Skogsstyrelsen 2019, kapitel 5-6). Frågan om klimatsäkring av skogsförvaltningen är relevant, oavsett om huvudmålet är ekonomisk avkastning eller ökade kollager.

Skogens omsättning i produkter innebär vissa växthusgasutsläpp från skogen/skogsbruket, samtidigt som utsläppen från fossil energi och tillverkningen av fossilintensiva material kan, med viss fördröjning, minska genom substitution. Utveckling och uppskalning av nyttjandet av biobaserade produkter och lösningar kan således bidra till samhällets klimatomställning över tid, även om de orsakar nettoutsläpp under de närmaste årtiondena. Av den biomassa som årligen lämnar den svenska skogen blir cirka hälften bioenergi, resten fördelas förhållandevis jämnt mellan dels sågverken, dels massa- och pappersindustrin. Bioenergin som dels består av avverkningsrester, dels

restprodukter från skogsindustrin (sämre stamved, sågspån, bark, svartlut, träspill, tallolja) omsätts i skogsindustrins tillverkningsprocesser samt i fjärrvärme och till mindre del elproduktion (IRENA 2019).

Eftersom klimatnyttan av material- och energisubstitution varierar stort mellan olika användningar (Leskinen m fl 2018), spelar det roll vad biomassan används till. Nya processer som påverkar fossilintensiteten i de material och energi som substitueras, och hur samhällets klimatomställning på bred front fortskrider, är rimligen av betydelse vad gäller investeringar i olika användningar av biomassa. Detsamma gäller efterfrågans utveckling – om biobaserade lösningar lades ovanpå de fossila, skulle den totala konsumtionen öka, vilket skulle motverka klimatomställningen.

Det är givetvis fullt möjligt att samtidigt satsa på bestående kolinlagring i skogen och uttag av biomassa för substitution (t ex Bellassen och Luysaert 2014). Det är dock inte vetenskapligt givet hur en balans i en sådan strategi skulle se ut. Olika studier av vilka avvägningar som skulle krävas ger olika resultat vilket beror på val av tidshorisonter, metoder, systemgränser och antaganden. Svaret påverkas även av andra samhällsmål förknippade med skogen, såsom hänsyn till biologisk mångfald, sociala värden och ekonomisk avkastning (t ex Heinonen m fl 2017, Baul m fl 2017, Lundmark m fl 2018, Pingoud m fl 2018, Peura m fl 2018, Zanchi och Brady 2019). Olika viktningar kan leda till olika skogsförvaltningsstrategier. Denna balansakt mellan olika mål kan också se olika ut från en region till en annan eftersom olika regioner och skogar skiljer sig åt i biofysiska och samhällsliga förutsättningar. Klimateffekterna kan också slå olika och vilka aspekter som anses väga tyngst kan variera.

Valet av skogsbruksmetod (Noormets m fl 2015), som kontinuitetsskogsbruk (t ex Lindroth m fl 2018) eller intensiv skogsbruk (Lundmark m fl 2016), men också val angående omloppstid, gallring och trädslagsval (t ex Lundmark m fl 2018, Subramanian m fl 2019, Felton m fl 2020), har betydelse för möjligheten att främja de nyttor som man önskar få av skogen, så som effekter på produktion, ökad eller minskad sårbarhet i relation till klimatförändringen, biologisk mångfald och andra värden som skogen tillhandahåller. Utöver relaterade synergier och målkonflikter behöver frågan om klimatlösningar från skogen dessutom, som nämnts tidigare, behandlas i en större kontext som omfattar utvecklingen av energisystem, konsumtionsmönster, materialanvändning och internationella marknader (t ex Cintas m fl 2017, Börjesson m fl 2017). Även i den bästa av världar räcker skogen inte till för alla klimatlösningar, och i den omfattning som den teoretiskt skulle kunna bidra till (se May m fl 2020).

7. Andra aspekter än kol till och från skogen

Utöver effekten på upptag och utsläpp av växthusgaser samt förvaltandet av kolbalansen på skogsmark och i produkter kan skogens utveckling och skogsbruket påverka klimatet även på andra sätt, i första hand på lokala skalor (t ex Devaraju m fl 2015, Bonan 2016, Alkama och Cescatti 2016). Detta lyfts ibland fram i debatten och sådana effekter kan också vara relevanta att ta hänsyn till vid bedömningar av klimatnyttan kopplad till beslut om skogen.

Skogen och atmosfären kopplas ihop genom biogeofysiska och biogeokemiska mekanismer (Ellison m fl 2017, Bonan 2016). Mängden och/eller typen av skog eller annan marktäckning kan påverka hur mycket av inkommande solstrålning som reflekteras bort (albedo), vattenbalansen och ytans skrovlighet. Det sistnämnda handlar förstås om att träd är högre än buskar, gräs och grödor, vilket påverkar vindklimatet och utbyten av bland annat koldioxid mellan markytan och atmosfären. Förändringar i skogen kan öka eller minska utsläppen av flyktiga kolväten och därmed kylande aerosoler som bildas vid sådana utsläpp (t ex Kulmala m fl 2014, Kalliokoski m fl 2020). Avdunstningen, som också innebär energiutbyte mellan marken och atmosfären, påverkas också av förändringar i marktäckningen. Träd har stora avdunstande och regnfångande ytor i och med grenverk med löv eller barr, och ju djupare rötter, desto bättre åtkomst har träden till markvatten.

Förändringar i energibalansen, strålningsdrivningen och hydrologin kan få genomslag i temperatur eller nederbörd, vilket i vissa fall kan vara relevant att begrunda (Alkama och Cescatti 2016). Ett viktigt exempel är att mer skog leder till minskat albedo i snörika klimat, vilket har en uppvärmande effekt under snöiga årstider (Betts 2004). Mer skog kan samtidigt också ha en avkylande effekt andra årstider eller i andra regioner om det leder till större utsläpp av flyktiga kolväten. Ökad avdunstning har också en avkylande effekt och minskad avdunstning en uppvärmande effekt (Zhang m fl 2018).

På samma sätt som skogen kan generera olika klimatnyttor kan alltså olika skogsförvaltningsstrategier påverka klimatet lokalt och vissa fall regionalt på olika sätt. Strikt taget kan det vara ogörligt att optimera en strategi till att ge önskad effekt på var

och en av kolsänkan, strålningsdrivningen, temperaturen och nederbörden (Luyssaert m fl 2018). Men även om alla dessa aspekter har betydelse är frågan om hur kolpooler, upptag och utsläpp förvaltas trots allt det avgörande när det gäller skogens klimatnyttor.

8. Slutsatser

Frågan om vilken kombination av klimatnyttor man bör sikta på vad gäller förvaltningen av skog är debatterad och har flera dimensioner. Det är inte möjligt att samtidigt använda skogen både för maximal kolinlagring i mark och stående träd och för största möjliga utnyttjande av biomassa för substitution. Ingen av de två ytterligheterna skulle nödvändigtvis heller leverera den optimala klimatnyttan, utan frågan handlar snarare om vilken balans som ska eftersträvas mellan de två. Ett bra svar ska dessutom rimligen även ta hänsyn till andra samhällsnyttor förknippade med skogen, såsom virkesproduktion, biologisk mångfald och en rad sociala värden.

Vetenskapen kan inte ge ett definitivt svar på hur den optimala balansen och avvägningen mellan olika nyttor skulle se ut, men däremot belysa olika alternativ och deras respektive fördelar och nackdelar, synergier, målkonflikter och osäkerheter. Antalet vetenskapliga och andra studier och andra verk inom området är stort, men samtidigt är kunskapsläget något svåröverblickbart eftersom metoder, antaganden och tidshorisonter skiljer sig åt.

Sammantaget gäller det att navigera sig fram till bästa möjliga balans mellan kolinlagring på skogsmarken å ena sidan och nyttjandet av produkter från skogen för substitution av fossilintensiva material och fossila bränslen å den andra. Samtidigt måste detta ske inom ramen för samhällets hela klimatomställning, och med hänsyn tagna till andra samhällsmål. I detta sammanhang är det viktigt att påminna om de befintliga system för industri och energiproduktion som Sverige har idag, där biomassa är en viktig del – det är orealistiskt att tänka sig att all denna biomassa/bioenergi plötsligt skulle ersättas av något annat. Frågan om skogens klimatnyttor bör därför handla om framåtsyftande val och genomföranden: vad ska vi ha mer av, vad kan bli mer hållbart och ge större nytta, och vad kan avvecklas?

Tidshorizonten är genomgående en särskilt viktig faktor att beakta när man gör olika avvägningar, speciellt eftersom beslutade internationella och nationella klimatmål förutsätter både snabba utsläppsminskningar i närtid och bestämda och bestående utsläppsminskningssbanor på lång sikt för att uppnå ett hållbart och fossilfritt samhälle. Den rumsliga skalan kan också vara en viktig parameter eftersom det knappast går att eftersträva eller nå alla mål överallt.

Det är vidare viktigt att i den debatt som pågår och i beslutsfattande rörande klimatnyttor från skogen, sträva efter att använda sig av hela den befintliga kunskapsbasen inom området, och att vara transparent angående ingående antaganden. Tydlighet gällande hur och vad man prioriterar, liksom varför man gör dessa prioriteringar, är också viktigt, liksom tydlighet gällande vad man samtidigt eventuellt väljer bort. Eventuella synergier måste vägas in och målkonflikter hanteras. Skogens klimatnyttor behöver ses i ett bredare sammanhang och balanseras mot andra samhällsmål. I verkligheten kan andra frågeställningar ställa tydligare ramar för beslut kring skogen än den teoretiskt bästa möjliga klimatnyttan, speciellt om skillnaden i klimatnytta inte är alltför stor mellan olika alternativ.

Referenser

- Achat, D.L. 2015, Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports (Nature)* 5, 15991.
- Alkama, R. och Cescatti, C. 2016, Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover, *Science* 351, 600-604.
- Amiro, B.D. m fl 2010, Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbances in forests of North America. *Journal of Geophysical Research* 115, G00K02.
- Baul, T.K. m fl 2017, Climate change mitigation potential in boreal forests: Impacts of management, harvest intensity and use of forest biomass to substitute fossil resources. *Forests* 8, 455.
- Bentsen, N.S. 2017, Carbon debt and payback time – Lost in the forest? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 1211-1217.
- Bellassen, V. och Luysaert, S. 2014, Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature* 536, 153-155.
- Berndes G. m fl. 2013, Bioenergy and land use change—state of the art. *WIREs Energy Environment* 2, 282-303
- Berndes, G. m fl 2016, Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation. *From Science to policy* 3. European Forest Institute, 28 s.
- Besnard, S. m fl 2018, Quantifying the effect of forest age in annual net forest carbon balance. *Environmental Research Letters* 13, 124018.
- Betts, R.A. 2000, Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408, 187-190.
- Birdsey m fl 2018, Climate, economic, and environmental impacts of producing wood for bioenergy. *Environmental Research Letters* 13, 050201.
- Black-Samuelsson, S. m fl 2017, Bioenergi på rätt sätt – om hållbar bioenergi i Sverige och andra länder. Rapport av Skogsstyrelsen, Energimyndigheten, Jordbruksverket och Naturvårdsverket. Rapport 10, Skogsstyrelsen.
- Blennow, K. m fl 2010, Climate change and the probability of wind damage in two Swedish forests. *Forest Ecology and Management* 259:4, 818-830.
- Bonan, G.B. 2016, Forests, Climate, and Public Policy: A 500-Year Interdisciplinary Odyssey. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 47, 97-121.

- Brienen, R.J. m fl 2020, Forest carbon sink neutralized by pervasive growth-lifespan trade-offs. *Nature Communications* 11, 4241.
- Buchholz, T. m fl 2016, A global meta-analysis of forest bioenergy greenhouse gas emission accounting studies. *GCB Bioenergy* 8, 281-289.
- Bugmann, H. och Bigler, C. 2011, Will the CO₂ fertilization effect in forests be offset by reduced tree longevity? *Oecologia* 165, 533-544.
- Buchmann, N. och Schultze, E.-D. 1999, Net CO₂ and H₂O fluxes of terrestrial ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* 13:3, 751-760.
- Börjesson, P. m fl 2017, Future demand for forest-based biomass for energy purposes in Sweden. *Forest Ecology and Management* 383, 17-26.
- Camia, A. m fl 2021, The use of woody biomass for energy purposes in the EU. EUR 30548 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-27867-2, JRC122719
- Cintas, O. m fl 2017, The potential role of forest management in Swedish scenarios towards climate neutrality by mid century, *Forest Ecology and Management* 383, 73-84.
- Clarke, N. m fl 2015, Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 351, 9-19.
- Clemmensen, K.E. m fl 2013, Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science* 339, 1615-1618.
- Dean, C. m fl 2017, Conventional intensive logging promotes loss of organic carbon from the mineral soil. *Global Change Biology* 23, 1-11.
- Devaraju, N. m fl 2015, Modelling the influence of land-use changes on biophysical and biochemical interactions at regional and global scales. *Plant, Cell & Environment* 39, 1931-1946.
- EASAC 2017, Multi-functionality and sustainability in the European Union's forests. EASAC policy report 32, 44 s.
- EC, 2019, The European Green Deal, COM(2019) 640.
- EC, 2020. Impact Assessment, Accompanying the document Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Commission staff working document, SWD/2020/176 final.
- Ellison, D. m fl 2017, Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* 43, 51-61.
- Europaparlamentet och rådet 2018, Förordning (EU) 2018/841 om inbegripande av utsläpp och upptag av växthusgaser från markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk i ramen för klimat- och energipolitiken fram till 2030 och om ändring av förordning (EU) nr 525/2013 och beslut nr 529/2013/EU.

- Felton, A. m fl 2020, The tree species matters: Biodiversity and ecosystem service implications of replacing Scots pine production stands with Norway spruce. *Ambio* 49, 1035-1049.
- Forest Europe 2015, State of Europe's Forests 2015, 314 s.
- Granath, G. m fl 2020, The impact of wildfire on biogeochemical fluxes and water quality on boreal catchments. *Biogeosciences Discussions* (i granskning, <https://doi.org/10.5194/bg-2020-363>)
- Grassi, G. m fl 2017, The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change* 7, 220-226.
- Gross, C.D. m fl 2018, Thinning Treatments Reduce Deep Soil Carbon and Nitrogen Stocks in a Coastal Pacific Northwest Forest. *Forests* 9:5, 238.
- Gundersen, P m fl. 2021, Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature* 591, E21-E23.
- Hall, M. m fl 2013, Which are the most important parameters for modelling carbon assimilation in boreal Norway spruce under elevated CO₂ and temperature conditions? *Tree Physiology* 33, 1156-1176.
- Harmon, M. 2019, Have product substitution carbon benefits been overestimated? A sensitivity analysis of key assumptions. *Environmental Research Letters* 14, 065008.
- Haverd, V. m fl 2020, Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. *Global Change Biology* 26, 2390-2402.
- Heinonen, T. m fl 2017, Scenario analyses for the effects of harvesting intensity on development of forest resources, timber supply, carbon balance and biodiversity of Finnish forestry. *Forest Policy and Economics* 80, 80-98.
- Hyvönen, R. m fl 2007, The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173, 463-480.
- IPCC 2018, Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, [Masson-Delmotte, V. m fl (red.)].* I tryck.
- IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. och Tanabe K. (reds). IGES, Japan.
- IPCC 2019a, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., m fl (reds). IPCC, Switzerland.
- IPCC 2019b, Summary for Policymakers. I: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, m fl (red.)].* I tryck.

- IRENA 2019, Bioenergy from boreal forests: Swedish approach to sustainable wood use, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- James, J. och Harrison, R. 2016, The Effect of Harvest on Forest Soil Carbon: A Meta-Analysis. *Forests* 7, 308.
- Jönsson, A.M. m fl 2007, Impact of climate change on the population dynamics of *Ips typographus* in southern Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology* 146:1-2, 70-81.
- Kalliokoski, T. m fl 2020, Mitigation Impact of Different Harvest Scenarios of Finnish Forests That Account for Albedo, Aerosols, and Trade-Offs of Carbon Sequestration and Avoided Emissions. *Frontiers in Forests and Global Change* 3 (online, 06 October 2020).
- Kellomäki, S. m fl 2008, Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363, 2341-2351.
- Klimatpolitiska rådet, 2019, Årsrapport 2019, Rapport nr 2, 88 s.
- KSLA 2018, Forests and the climate. Manage for maximum wood production of leave the forest as a carbon sink? *KSLAT* 6, 47 pp.
- Kulmala, M. m fl 2014, CO₂-induced terrestrial climate feedback mechanism: From carbon sink to aerosol source and back. *Boreal Environment Research* 19, 122-131.
- Langvall, O. 2011, Impact of climate change, seedling type and provenance on the risk of damage to Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings in Sweden due to early summer frosts. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26:S11, 56-63.
- Le Quéré, C. m fl 2018, Global Carbon Budget 2017. *Earth Syst. Sci. Data* 10, 405-448.
- Leskinen, P. m fl 2018, Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *From Science to Policy* 7. European Forest Institute.
- Leturcq, P. 2013, Wood preservation (carbon sequestration) or wood burning (fossil-fuel substitution), which is better for mitigating climate change? *Annals of Forest Science* 71, 117-124
- Leturcq, P. 2020, GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution, *Scientific Reports (Nature)* 10:20752.
- Lindroth, A. m fl 2009, Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink, *Global Change Biology* 15, 346-355.
- Lindroth, A. m fl 2018, Effects of low thinning on carbon dioxide fluxes in a mixed hemiboreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 262, 59-70.
- Lundmark, T. 2020, Skogen räcker inte – hur ska vi prioritera. *Future Forests Rapportserie* 2020:4, 23 s.
- Lundmark, T. m fl 2014, Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation. *Forests* 5, 557-578.
- Lundmark, T. m fl 2016, Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden. *Ambio* 45(Suppl. 2), S203-S213.

- Lundmark, T. m fl 2018, Carbon balance in production forestry in relation to rotation length. *Canadian Journal of Forestry Research* 48:6, 672-678.
- Luyssaert, S. m fl 2008, Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213-215.
- Luyssaert, S. m fl 2018, Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature* 562, 259-262.
- Luyssaert, S. m fl 2021, Reply to: Old-growth forest carbon sinks overestimated, *Nature* 591, E24-E25.
- Mather-Gratton, Z.J. m fl 2021, Understanding the sustainability debate on forest biomass for energy in Europe: A discourse analysis. *PLoS ONE* 16:2, e0246873.
- Matthews, H.D. m fl 2009, The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature* 459, 829-832.
- May, W. m fl 2020, The importance of land-atmosphere biophysical interactions for regional climate and terrestrial ecosystem change: Improved understanding to inform Swedish national climate action. CEC Synthesis Report No. 5. Centrum för miljö- och klimatforskning, Lunds universitet.
- McKechnie, J. m fl 2011, Forest Bioenergy or Forest Carbon? Assessing Trade-Offs in Greenhouse Gas Mitigation with Wood-Based Fuels. *Environmental Science & Technology* 45, 789-795.
- Miljödepartementet 2019, Reviderad nationell bokföringsplan för skogsbruket för perioden 2021–2025 enligt LULUCF-förordningen M2019/00180/Kl.
- Mäkipää, R. m fl 2015, Mitigation of climate change with biomass harvesting in Norway spruce stands: are harvesting practices carbon neutral? *Canadian Journal of Forest Research* 45, 217-225.
- Nabuurs, G.-J. m fl 2013, First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3, 792-796.
- Nabuurs, G.-J. m fl 2017, European forests show no carbon debt, only a long parity effect. *Forest Policy and Economics* 75, 120-125.
- Nabuurs, G.-J. m fl 2018, Understanding the implications of the EU-LULUCF regulation for the wood supply from EU forests to the EU. *Carbon Balance and Management* 13, 18.
- Naturvårdsverket 2020a, Fördjupad analys av den svenska klimatomställningen 2020. Rapport 6945.
- Naturvårdsverket 2020b, National Inventory Report Sweden 2020. Greenhouse Gas Emission Inventories 1990-2018.
- Noormets, A. m fl 2015, Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management* 355, 124-140.
- Nordström, E.-M. 2016, Impacts of global climate change mitigation scenarios on forests and harvesting in Sweden. *Canadian Journal Forestry Research* 46, 1427-1438.
- Paul-Limoges, E. m fl 2015, Effect of clearcut harvesting on the carbon balance of a Douglas-fir Forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 203, 30-42.

- Peters, G.P. m fl 2012, A synthesis of carbon in international trade. *Biogeosciences* 9, 3247-3276.
- Peura, M. m fl 2018, Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in Fennoscandia. *Biological Conservation* 217, 104-112.
- Pingoud, K. m fl 2018, Trade-offs between forest carbon stocks and harvests in a steady state – A multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management* 210, 96-103.
- Pugh, T.A.M. m fl 2019, Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *PNAS* 116:10, 4382-4387.
- Pukkala, T. 2017, Does management improve the carbon balance of forestry? *Forestry* 90, 125-135.
- Pukkala, T. 2018. Carbon forestry is surprising. *Forest Ecosystems* 5:11, 11 s.
- Rogelj, J. m fl 2018a, Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C. *Nature Climate Change* 8, 325-332.
- Rogelj, J. m fl 2018b, Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V. m fl (red.)]. I tryck.
- Rummukainen, M. 2021, Skogens klimatnyttor – en balansakt i prioritering. CEC Rapport Nr 6. Centrum för miljö- och klimatvetenskap, Lunds universitet. ISBN 978-91-984349-5-8
- Rypdal, K. m fl 2006, Introduction to the 2006 Guidelines. I: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Eggleston, S., m fl. /reds), Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Hayama, Kanagawa, Japan, 2006.
- Sathre, R. och O'Connor, J. 2010, Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy* 13, 104-114.
- Schulze, E.-D. m fl 2012, Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *GCB Bioenergy* 4:6, 611-616.
- Seppälä, J. m fl 2019, Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of Environmental Management* 247, 580-587.
- Skogsindustrierna 2019, Rapport: Så stort är skogsnäringens bidrag i klimatarbetet, se <https://www.skogsindustrierna.se/aktuellt/nyheter/2019/062/skogsnaringen-spelar-en-avgorande-roll-i-klimatarbetet/>
- Skogsindustrierna och Fossilfritt Sverige 2018, Skogsnäringens färdplan för fossilfri konkurrenskraft, www.skogsindustrierna.se/siteassets/dokument/nyheter/fardplan-for-fossilfri-konkurrenskraft-skogsnaringen.pdf

- Skogsstyrelsen 2015a, Skogliga konsekvensanalyser 2015 – SKA-15, Rapport 10:2015.
- Skogsstyrelsen 2015b, Skogliga konsekvensanalyser 2015 – SKA-15, Rapport 12:2015.
- Skogsstyrelsen 2019, Skogsskötsel med nya möjligheter, Rapport 2019/24.
- SLU 2020, Skogsdata 2020 Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från SLU Riksskogstaxeringen. Tema: Den döda veden. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning. 158 s.
- Soimakallio, S. m fl 2016, Climate Change Mitigation Challenge for Wood Utilization—The Case of Finland. *Environmental Science and Technology* 50, 5127-5134.
- SOU 2020:4, Vägen till en klimatpositiv framtid, Betänkande av Klimatpolitiska vägvalsutredningen. Statens offentliga utredningar.
- SOU 2020:73, 2020, Stärkt äganderätt, flexibla skyddsformer och naturvård i skogen, Betänkande av Skogsutredningen 2019. Statens offentliga utredningar.
- Subramanian, N. 2019, Impacts of climate change, weather extremes and alternative strategies in managed forests. *Ecoscience* 26:1, 53-70.
- Ter-Mikaelian, M.T. m fl 2015, The Burning Question: Does Forest Bioenergy Reduce Carbon Emissions? A Review of Common Misconceptions about Forest Carbon Accounting. *Journal of Forestry* 113:1, 57-68.
- Varenius, K. m fl 2016, Long-term effects of tree harvesting on ectomycorrhizal fungal communities in boreal Scots pine forests. *Forest Ecology and Management* 380, 41-49.
- Varenius, K. m fl 2017, Retention of seed trees fails to lifeboat ectomycorrhizal fungal diversity in harvested Scots pine forests, *FEMS Microbiology Ecology* 93:9, fix105.
- Vestin, P. m fl 2020, Impacts of Clear-Cutting of a Boreal Forest on Carbon Dioxide, Methane and Nitrous Oxide Fluxes. *Forests* 11, 961.
- Zanchi, G. och Brady, M.V. 2019, Evaluating the contribution of forest ecosystem services to societal welfare through linking dynamic ecosystem modelling with economic evaluation. *Ecosystem Services* 39, 101011.
- Zetterberg, L och Chen, D. 2015, The time aspect of bioenergy – climate impacts of solid biofuels due to carbon dynamics. *GCB Bioenergy* 7, 785-796.
- Zhang, W. m fl 2018, Self-amplifying feedbacks accelerate greening and warming of the Arctic. *Geophysical Research Letters* 45, 7102-7111.

Skogens klimatnyttor

Skogen och skogsbruket har idag en stark närvaro i klimatdebatten. Det finns bred enighet om att skogen har stor betydelse för klimatfrågan, men olika syn på vilka dessa klimatnyttor kan vara. Antalet studier inom området är omfattande och relevant styrning utvecklas över tid. Kunskapsläget är dock svåröverblickbart, vilket beror på att olika metoder, antaganden och tidshorisonter använts i olika studier. Utmaningen, för att uppnå bästa möjliga klimatnytta gällande skogen, består i att med hjälp av befintlig kunskap navigera sig fram till bästa möjliga balans mellan kolinlagring på skogsmarken å ena sidan och substitution av fossilintensiva material och fossila bränslen med biomassa från skogen å den andra. Tidshorizonten är genomgående en särskilt viktig faktor att beakta. Hänsyn måste också tas andra samhällsnyttor förknippade med skogen, såsom virkesproduktion, biologisk mångfald och en rad sociala värden.



LUNDS
UNIVERSITET

Centrum för miljö- och klimatvetenskap
Lunds universitet

CEC Syntes Nr 06
ISBN 978-91-984349-6-5



434965

788198

9