



Värmeverk i skogen. Foto: Fjellfotografen.se

RAPPORT SKOG

Skogen och klimatet – vad säger forskningen?

Forestry and climate – what does science tell?

Författare: Mats Hannerz, Lina Arnesson Ceder, Andreas Eriksson och Tomas Lundmark.
Inst. för skoglig resurshushållning Sveriges lantbruksuniversitet. Nr 1 | 2024

Rapport Skog 2024:1

Författare: Mats Hannerz, Lina Arnesson Ceder, Andreas Eriksson och Tomas Lundmark.

Vid citering uppge: Hannerz, M., Arnesson Ceder, L., Eriksson, A. & Lundmark, T. Skogen och klimatet - vad säger forskningen? Rapport Skog 2024:1. Ver. 2. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå. 56 sidor.
DOI: <https://doi.org/10.54612/a.5tsq9vkb4t>

Utgivningsår: 2024, Umeå.

Utgivare: Fakulteten för skogsvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU).

Ansvarig utgivare: Göran Ericsson, dekan, Fakulteten för skogsvetenskap, SLU.

Textredigering: Ylva Melin, SLU.

Layout: Grafisk service, SLU.

Grafisk form: Michael Kwick, SLU.

Omslagsfoto: Värmeverk i skogen.

Foto: Fjellfotografen.se.

DOI: <https://doi.org/10.54612/a.5tsq9vkb4t>

ISBN: (tryckt version) 978-91-8046-734-6

ISBN: (elektronisk version) 978-91-8046-735-3

Förord

Route to Paris är ett tvärvetenskapligt forskningsprojekt med syfte att undersöka och utveckla skogens roll i klimatomställningen. Projektet löper över åren 2022–2026 och är ett samarbete mellan forskare vid Sveriges lantbruksuniversitet, Södertörns högskola, Umeå universitet, Lunds universitet och Högskolan i Borås. Projektet är finansierat av Formas, och samverkar dessutom med stiftelsen World Forest Forum. Denna rapport är framtagen som ett delresultat från projektet med syftet att tillhandahålla ett kunskapsunderlag om var forskningen står i frågan om skogens roll i klimatomställningen. Rapporten gör inga anspråk på att vara en fullständig litteraturöversikt. I stället har studier och rapporter valts ut som illustrerar olika utgångspunkter och varför forskningen ibland leder till olika slutsatser.

Författarna riktar ett stort tack till alla de som bidragit synpunkter och material. Ingen nämnd och ingen glömd, men ett särskilt tack till Per-Erik Wikberg för genomläsning och kommentarer. Ett extra stort tack riktas också till Mattias Lundblad för sakgranskning av rapportens slutversion.

Mats Hannerz, Lina Arnesson Ceder, Andreas Eriksson och Tomas Lundmark.

Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	6
Summary	9
1. Inledning och syfte	12
2. Skogen – räddaren eller fördärvaren i klimatkampen?	14
2.1 En spoiler	15
3. Det handlar om systemgränser	17
3.1 Bestånd eller Landskap	17
3.2 Tidsperspektivet	18
3.3 Den stora skiljelinjen – bruka eller bevara	18
3.3.1 Så här tänker "brukarna"	18
3.3.2 Så här tänker "bevararna"	19
3.3.3 Så här tänker "bruka försiktigare"	19
4. Bruka eller bevara – vad säger forskningen?	20
4.1 Olika avverkningsnivåer	20
4.1.1 Klimatnyttan i fem landskap	20
4.1.2 Kolinbindning under 40 år i svensk skog	22
4.1.3 Intensivare brukande	23
4.2 "Facit" från nordiska skogen	24
4.2.1 De nordiska ländernas bidrag	24
4.2.2 Jämförelse mellan boreala länder	25
4.2.3 De boreala skogarna är viktigaste kolsänkan	26
4.3 Är hyggesfritt en lösning?	26
4.3.1 Troligen lägre tillväxt	26
4.3.2 Effekter på virkesförsörjning och kolbalans	27
4.3.3 Samma tillväxt ger samma klimatnytta	27
4.3.4 Omställningen ger förlorad tillväxt	28
4.4 Hur påverkas kolsänkan av ökad tillväxt?	28
4.4.1 Gödsling	28
4.4.2 Skogsbränsleuttag	30
4.4.3 Beskogning av jordbruksmark	31
4.4.4 Förlängd omloppstid	32
4.4.5 Vilken åtgärd ger störst kolsänka?	32
4.4.6 Andra skogliga åtgärders effekt på kolsänkan	33
4.5 Är den gamla skogen koldioxidneutral?	34
4.5.1 Är kolförråd och kolsänka större i naturskogen?	35
4.6 Markens kol	37
4.6.1 Minskar markkolet vid avverkning och markberedning?	38
4.7 Har skogens tillväxt slutat att öka?	38
4.8 Kostnaden för att lagra kol i skogen	39

5. Biobränsle	41
5.1 "Kolskulden"	41
5.2 Grenar och toppar	42
6. Dikade torvmarker släpper ut växthusgaser	43
6.1 Återvätning – en klimatpositiv åtgärd?	44
7. Substitution – ersättningsfaktorer	46
8. Skogsbrukets egna utsläpp	48
9. Läckageeffekter - minskad avverkning här kan öka avverkningen där	49
10. Diskussion och slutsatser	50
10.1 Skillnad i systemgränser	50
10.2 Utmaning för politiken	50
10.3 Osäkert hur klimatet påverkar skogen på sikt	51
10.4 Vi har den skog vi har	51
Referenser	52

Sammanfattning

Rapporten, framtagen inom det tvärvetenskapliga forskningsprojektet *Route to Paris*, sammanfattar var forskningen står i frågan om skogens roll i klimatomställningen. Syftet är att ge svar på vanliga frågor som cirkulerar i debatten och att försöka förklara varför olika forskningsrapporter kan leda till ibland helt skilda slutsatser. Skogsbruket gör klimatnytta på många sätt. I rapporten används begrepp som kolsänka, substitution och total klimatnytta. Kolsänka uppstår när ett kollager ökar, till exempel i skogen eller i skogsprodukter. Substitution innebär att skogsprodukter ersätter produkter som är sämre för klimatet, och där effekten blir att utsläpp av klimatskadlig koldioxid undviks. När man lägger samman klimatnyttan av kolsänkor och substitution talar vi om skogens totala klimatnytta.

Kapitel 2–3 ger en inledning till frågeställningen om skogen gör bäst total klimatnytta om den brukas eller bevaras. Många forskningsstudier har beräknat hur kolsänka, utsläpp från skogssektorn och totala klimatnytta påverkas av skogens användning på kort och lång sikt. Slutsatserna beror till stora delar på vilka systemgränser som används. Såväl tidsperspektivet (kort- eller lång sikt) som rumsperspektivet (enskilt bestånd, hela landskap eller nationen) påverkar studiernas resultat. En viktig faktor är också hur man ser på substitution – klimatnyttan av att klimatskadliga produkter ersätts med skogsråvaror. Trots att olika forskargrupper tvistar råder oftast samstämmighet om att minskad avverkning jämfört med dagens nivå ger störst kolsänka på kort sikt (något till några decennier). Detta förutsätter dock att dagens förbrukning av papper, trä och bioenergi också minskar, annars förflyttas bara uttagen av skogsråvara till andra platser (i Sverige eller utomlands). På längre sikt (flera decennier till något sekel) kommer kolsänkan i oskötta skogar att minska och till sist upphöra när träden åldras, dör eller brinner upp. En brukad skog med bibehållen eller ökad tillväxt fortsätter att binda kol samtidigt som skogsråvaror ersätter fossila råvaror, cement eller stål.

Kapitel 4 redovisar forskningsresultat koppel-

lade till frågan om skogens brukande. Scenarier med lägre avverkning än dagens nivå ger enligt Skytt m.fl. (2021) större total klimatnytta på 50 års sikt. Holmgren (2021) pekar på att virkesförrådet i svensk skog har ökat med 1 miljard skogskubikmeter under 40 år samtidigt som 3 miljarder kubikmeter har avverkat. Den totala klimatnyttan från det aktuella skogsbruket motsvarade 1,8–1,9 miljarder ton koldioxid under de 40 åren. Lundmark m.fl. (2014) beräknade att ett mer aktivt skogsbruk med ökad tillväxt och avverkning, skulle kunna öka den totala klimatnyttan med 40 miljoner ton CO₂e per år under en knappt 200-årig period.

Finland, Norge och Sverige bedriver alla ett aktivt skogsbruk. Kolsänkan i de tre länderna tillsammans har tredubblats under knappt 60 år, samtidigt som avverkningen har ökat med 40 % (Kauppi m.fl. 2022). De nordiska länderna har också jämförts med andra boreala länder med ett mindre aktivt skogsbruk. I Sverige, Norge och Finland har kolförrådet ökat med 35 % på drygt 25 år. I Ryssland och Kanada har kolförrådet inte förändrats, och i Alaska har det till och med minskat (Högberg m.fl. 2021). En förklaring är att skogen i de mer passivt brukade områdena brinner oftare, medan brand är ovanligt i de nordiska, brukade skogarna. Globalt sett verkar de boreala skogarna också vara den viktigaste kolsänkan. En analys baserad på satellitdata fann att boreala skogar stod för 0,37 miljarder ton av världens totalt ökade kolförråd på 0,5 miljarder ton kol per år (Yang m.fl. 2023).

Om hyggesfritt skogsbruk eller trakthyggesbruk är bäst för klimatet handlar mycket om systemgränser. Förespråkare för hyggesfria metoder hänvisar ofta till kolbalansen i ett bestånd, där kalhygget är en kolkälla under 10–15 år innan skogen har slutit sig (bl.a. Vestin 2020, Lindroth m.fl. 2009). Effekterna på landskaps- och regional nivå beror dock på skogslandskapets totala tillväxt. Det är svårt att fastställa hur den långsiktiga produktionen skiljer sig mellan skötselmetoderna, men flera studier pekar på att hyggesfria metoder har 10–20 %

lägre tillväxt jämfört med trakthyggesbruk (Lundqvist m.fl. 2013, Lundmark m.fl. 2016, Ekholm m.fl. 2023). På nationell nivå innebär hyggesfritt skogsbruk också att skogsbränsle inte kan utnyttjas på samma sätt som i trakthyggesbruket (Sonesson m.fl. 2017). Idag dominerar trakthyggesbruket i Sverige, och det saknas kunskap och analyser om vad en eventuell storskalig övergång till hyggesfria metoder skulle innebära för virkesförsörjning och kolbalans och hur lång en sådan omställningsperiod skulle bli.

Kolsänkan ökar med ökad tillväxt om avverkningsnivån är stabil. Gödsling på 100 000 hektar per år skulle kunna ge en ökad tillväxt på 1,5 miljoner skogskubikmeter, motsvarande 2,3 miljoner ton koldioxid (Gong m.fl. 2022). Ett ökat biobränsleuttag till 35 % av den tillgängliga groten (avverkningsrester – grenar och toppar) och 20 % av stubbarna skulle öka substitutionsnyttan med 10 miljoner ton CO₂e per år (Lundmark m.fl. 2014). Beskogning av åkermark har potential att öka kolsänkan med 5,5 miljoner ton CO₂e per år i biomassan och 0,2 miljoner ton i marken under cirka 20 år, förutsatt att 400 000 hektar beskogas med snabbväxande trädslag (Rytter 2012). Det trädslag som ger störst total klimatnytta på åkermark är lärk (Lutter m.fl. 2021).

En förlängd omloppstid med 10 år jämfört med idag ger en ökad kolsänka, men ytterligare förlängning kan leda till lägre tillväxt och lägre klimatnytta (Lundmark m.fl. 2018, Gong m.fl. 2022). Initialt leder dock förlängd omloppstid till minskad avverkning och substitution, vilket reducerar den positiva effekten av ökad kolinlagring i skogen (Lundström u.å.).

Trädens tillväxt kulminerar i medelåldern. Gammal skog kan ofta fortsätta att växa under en längre period än den ekonomiskt optimala omloppstiden (Stokland 2021), men på sikt ökar nedbrytningen så att skogen till slut blir koldioxidneutral. Rapporter om att 800-åriga skogar fortsätter att binda kol (Luyssaert m.fl. 2008) har ifrågasatts, och i stället är orörda gamla skogar ofta kolkällor (Gundersen m.fl. 2021). Formellt skyddade skogar i Sverige binder i genomsnitt mindre kol per hektar än brukade skogar, trots att cirka 1 % av dessa avverkas varje år (Lundblad m.fl. 2022).

Kolförrådet i den svenska skogsmarken är cirka 75 ton per hektar och i den stående skogen cirka 50 ton per hektar. Markens kolförråd ökar idag

med cirka 100 kilo kol per hektar och år, vilket motsvarar en kolsänka på knappt 400 kilo koldioxid per hektar eller en virkesförrådsökning på cirka 0,3 m³sk per hektar. Mängden markkol är ganska stabil över omloppstiden, och det sker ingen större relativ avgång i samband med kalhyggesfasen (Stendahl 2017). Markberedning bidrar inte till ökad kolavgång. På längre sikt bidrar markberedning i stället till ökad kolbindning eftersom den gynnar trädens tillväxt (Mjöfors m.fl. 2017).

Skogstillväxten i Sverige har avtagit under andra halvan av 2010-talet. En förklaring är väderförhållanden, framför allt torka (Fridman m.fl. 2022). Efter tillväxtsången 2022 rapporteras dock en ökad tillväxt igen (SLU 2023).

Den mest kostnadseffektiva åtgärden för att öka kollagringen är beskogning av jordbruksmark. Gödsling är mer kostnadseffektivt än att förlänga omloppstider och att skydda skog (Gong m.fl. 2022).

Kapitel 5 tar upp biobränsle och frågan om biobränsleuttag leder till en kolskuld på beståndsnivå. Det är återigen en fråga om systemavgränsning. En del forskare menar att eftersom kolförrådet fortsätter att öka i både biomassa och mark på landskapsnivå så har vi ingen kolskuld, varken på svensk eller europeisk nivå (Holmgren 2022, Nabuurs m.fl. 2017). Andra forskare hävdar att det uppstår en kolskuld när träd avverkas, och att den är återbetald först när lika mycket kol har inlagrats i det nya skogsbeståndet som förlorades i det tidigare (Holtsmark 2010, Mitchell m.fl. 2012).

Kapitel 6 berör dikning och återvätning. Dikade produktiva torvmarker beräknas släppa ut växthusgaser motsvarande 7 ton CO₂e per hektar och år varav 5,7 ton är koldioxid och 1,3 är metan och lustgas (Lundblad m.fl. 2022). Återvätning (höjt grundvatten) kan bidra till minskad koldioxidavgång men också en ökad avgång av metan. Skogsstyrelsen bedömer att återvätning av torv- och våtmarker är en effektiv klimatåtgärd, och att återvätning av 100 000 hektar fram till 2050 skulle minska nettoutsläppen med 1–9 ton CO₂e per hektar och år. Störst effekt har återvätning på näringsrik, väl-dränerad torvmark i södra Sverige (Drott & Eriksson 2021). Faktiska mätningar efter återvätning är ovanliga, men studier i norra Sverige har visat på en initial ökning av både koldioxid- och metanavgång (Laudon m.fl. 2023).

Kapitel 7 tar upp substitution, det vill säga att fossila råvaror och andra klimatpåverkande material byts ut (substitueras) mot trä och andra produkter baserade på biomassa. Hur substitution ska räknas är omdiskuterat, och får stor påverkan på slutsatserna om skogens totala klimatnytta. Spannet mellan de antagna substitutionsfaktorerna är stort, men ett riktvärde kan vara att för varje kilo kol som finns i träråvaran undviks ungefär 1 kilo fossilt kol att släppas ut i atmosfären.

Kapitel 8 rapporterar om skogsbrukets egna utsläpp. Skogsvård, terrängtransport, virkesbilar och väghållning uppskattas bidra med knappt 1 miljon ton CO₂e per år (Björheden 2019). Virkesbilarna står för nästan hälften av utsläppen.

Kapitel 9 diskuterar läckageeffekter, som kan uppstå om klimatförbättrande åtgärder på en plats leder till ökade utsläpp på en annan plats. Exempelvis kan lokalt minskad avverkning leda till ökad import, och därmed ökad avverkning i andra länder. En kunskapssammanställning av läckagestudier baserade på minskad avverkning visade ett genomsnittligt läckage på 52 % (Lundmark 2022). Det betyder att en minskad avverkning på 1 kubikmeter leder till att avverkningen ökar med 0,52 kubikmeter på en annan plats. För svenska förhållanden bedöms läckaget till 24–27 % för sågtimmer, 44–53 % för massaved och 26–72 % för bränsleved (Lundmark 2022).

Kapitel 10 innehåller diskussion och slutsatser. Där poängteras skillnaderna i tidsramar mellan olika studier. På kort sikt (ett par decennier) kan det vara mest effektivt att minska avverkningen, även när substitutionen vägs in. Detta innebär dock att vi under en period kommer att släppa ut mer fossil koldioxid i atmosfären med konsekvenser för framtida möjligheter att minska klimatpåverkan. På längre sikt pekar de flesta studier vi har analyserat på att en brukad skog med hög tillväxt ger störst total klimatnytta. Den rumsliga avgränsningen i olika studier har stor betydelse. I ett enskilt bestånd uppstår en kolavgång de första 10–15 åren efter avverkning, men därefter kompenseras avgången av kolupptag genom trädens tillväxt. I ett landskap med en blandning av unga och gamla bestånd är det den totala tillväxtökningen som avgör klimatnyttan. Det finns inga entydiga svar på frågan om trakthyggesbruk eller kontinuitetsskogsbruk gör störst klimatnytta. Frågan om en ökad kolsänka genom minskad avverkning är

snarare politisk än vetenskaplig, eftersom minskad avverkning också betyder minskat utbud av sågade trävaror, pappersmassa och skogsenergi. Om detta kompenseras av ökad import eller ökad konsumtion av fossila alternativ har ingen klimatnytta åstadkommit. Om konsumtionen av varor däremot minskas, så bidrar minskningen till klimatnytta. Omställning till alternativa brukningsformer, till exempel olika former av hyggesfria metoder, kan på sikt ge ett skogslandskap med fortsatt hög tillväxt. Omställningsfasen innebär dock minskad tillväxt och dessutom får den effekter på utbudet av skogsenergi och massaved. Detta är också en politisk fråga där klimatnyttan måste vägas mot andra samhällsnyttor, biologisk mångfald och övriga ekosystemtjänster.

Summary

This report, produced as part of the interdisciplinary research project *Route to Paris*, summarizes different researchers' standpoints on the role of forestry in mitigating climate change in Sweden. Its purpose is to provide answers to common questions that arise during debates on the issue of climate, and to try to explain why different research reports can sometimes lead to contradictory conclusions regarding the impact of forests.

The report uses terms such as carbon sink, substitution and total climate benefit. A carbon sink occurs when the carbon stock increases. A carbon sink occurs when the carbon stock increases in the forest or in forest products. Substitution means that forest products are used to replace other products, thus avoiding carbon dioxide emissions. Combining the climate benefits of carbon sinks and substitution provides a measure of the forest's total climate benefit.

Chapters 2 and 3 provide an introduction to the question of whether managed or preserved forest provides the best total climate benefit. Many research studies have calculated how carbon sinks, emissions from the forest sector and total climate benefit are affected by forest use in the short and long term. The conclusions drawn depend largely on system boundary assumptions. The perspectives of both time (short or long term) and space (individual stand, entire landscape or nationwide) affect the studies' results. Another important factor is how substitution is viewed: the climate benefit of replacing climate-damaging products with renewable forest materials. Although different groups of researchers may disagree, there is usually a consensus that reducing the level of harvest from the current levels produces the greatest carbon reduction in the short term (a few decades). However, this presupposes that today's consumption of paper, wood and bioenergy is also decreased, otherwise the forest harvests are simply moved to other locations (in Sweden or abroad). In the longer term (several decades to a few centuries), the carbon sink in unmanaged forests will decrease and eventually cease as the trees age, die

or burn. A managed forest with maintained or increased growth will continue to sequester carbon at the same time as forest raw materials are used to replace fossil raw materials, cement or steel.

Chapter 4 reports on research results linked to the issue of forest management. Scenarios with reduced felling than current levels provide a greater total climate benefit over a 50-year term according to Skytt et al. (2021). Holmgren (2021) points out that 3 billion cubic meters have been harvested in Swedish forests over 40 years, but the timber stock in the forest has at the same time increased by 1 billion cubic meters. The total climate benefit of the forestry in question corresponded to 1.8–1.9 billion tons of carbon dioxide over the 40 years. Lundmark et al. (2014) calculated that a more active forestry, with increased growth and felling, could increase the total climate benefits by 40 million tons of CO₂e per year over a period of just under 200 years.

Finland, Norway and Sweden all practice active forestry, and the carbon sink of these three countries combined has tripled in just under 60 years, while harvest has increased by 40% (Kauppi et al. 2022). Their carbon stocks have increased by 35 % in just over 25 years (Högberg et al. 2021). In boreal countries that practice less active forestry, carbon stocks has not changed (Russia and Canada), and in Alaska it has decreased (Högberg et al. 2021). One explanation for these differences is that more passively managed forest areas burn more often; wildfire is unusual in the managed Nordic forests. A global analysis based on satellite images found that boreal forests are the most important carbon sink, accounting for 0.37 billion tons of the world's total increased carbon stock of 0.5 billion tons of carbon per year (Yang et al. 2023).

Whether clear-cutting forestry or continuous-cover forestry is best for the climate depends much on the system boundaries. Proponents of continuous-cover methods often refer to the carbon balance in a stand, where a clear-cut is a source of carbon for 10–15 years before the canopy

closes (e.g. Lindroth et al. 2009, Vestin 2020). However, the effects at landscape and regional levels depend on the overall growth of the forest landscape. It is difficult to determine how long-term production differs between the management methods, but several studies indicate that continuous-cover forestry results in 10–20% lower growth compared with clear-cut forestry (Lundqvist et al. 2013, Lundmark et al. 2016, Ekholm et al. 2023). At a national level, continuous-cover forestry also means that bioenergy from forest residues cannot be used in the same way as with clear-cut forestry (Sonesson et al. 2017). Today, clear-cutting forestry dominates in Sweden, and there is a lack of knowledge and analysis about what a possible large-scale transition to continuous-cover forestry would mean for wood supply and carbon balance, and how long such a transition period would need to be.

The carbon sink increases with increased growth if the harvest level remains unchanged. Fertilization of 100,000 hectares per year could result in an increased growth of 1.5 million cubic meters per year, corresponding to 2.3 million tonnes CO₂e (Gong et al. 2022). An increased biofuel withdrawal to 35% of the available residues (branches and tops) and 20% of the stumps would increase the substitution by 10 million tons of CO₂e per year (Lundmark et al. 2014). Afforestation of abandoned farmland has the potential to increase the carbon sink by 5.5 million tons of CO₂e per year over a 20-year period, provided that 400,000 hectares are afforested with fast-growing tree species (Rytter 2012). The tree species that provides the greatest total climate benefit on arable land is larch (Lutter et al. 2021). An extended rotation period of 10 years compared to today would result in an increased carbon sink, but further extension could lead to lower growth and lower climate benefit (Lundmark et al. 2018, Gong et al. 2022). However, extended rotation with initially reduced logging and substitution, also reduces the positive effect of increased carbon storage in the forest (Lundström, n.d.).

A tree's growth culminates in middle age. Old forest can often continue to grow for a longer period than the economically optimal cycle time (Stokland 2021), but in the long run, the rate of decomposition increases such that the forest

eventually becomes carbon dioxide neutral.

Reports that 800-year-old forests continue to sequester carbon (Luyssaert et al. 2008) have been questioned, and instead pristine old forests are considered to often be carbon sources (Gundersen et al. 2021). Formally protected forests in Sweden sequester less carbon per hectare on average than managed forests, despite that 1 % of the managed forests are finally harvested each year (Lundblad et al. 2022). The carbon stock in the boreal forest soil is about 75 tons per hectare, and in the biomass above ground about 50 tons per hectare. The soil's carbon reserves are annually increasing by around 100 kilograms of carbon per hectare, which corresponds to a carbon sink of just under 400 kilograms of carbon dioxide per hectare, or an increase in wood storage of around 0.3 m³sk per hectare. The amount of soil carbon is relatively stable over the cycle, and there is no major departure in connection with the clear-cut phase (Stendahl 2017). Site preparation is not generally thought to contribute to increased carbon emissions. In the longer term, site preparation contributes to increased carbon sequestration because it favors tree growth (Mjöfors et al. 2017).

Forest growth in Sweden slowed during the second half of the 2010s. One explanation for this is weather conditions, especially drought (Fridman et al. 2022). Since the growing season 2022, however, increased growth has once again been reported (SLU 2023).

The most cost-effective measure for increasing carbon storage is afforestation of abandoned farmland, and fertilization is more cost-effective than extending rotation periods and protecting forests (Gong et al. 2022).

Chapter 5 addresses the role of bioenergy and whether bioenergy withdrawal leads to a carbon debt at a stand level. Once again it is a question of system boundary assumptions. Some researchers believe that, as the carbon stock continues to increase both above and below ground at a landscape level, there is no carbon debt, at either a Swedish or a European level (Holmgren 2022, Nabuurs et al. 2017). Others argue that a carbon debt arises when trees are felled, and that it is repaid only when as much carbon has been stored in the new forest stand as was lost in the previous one (Holtsmark 2010, Mitchell et al. 2012).

Chapter 6 discusses ditching and rewetting (raising the groundwater level). Ditched productive peatlands are estimated to emit greenhouse gases equivalent to 7 tons of CO₂e per hectare and year, of which 5.7 tons are carbon dioxide and 1.3 are methane and nitrous oxide (Lundblad et al. 2022). Rewetting can help reduce carbon dioxide emissions, but can also lead to a temporary increase in methane emissions. The Swedish Forestry Agency considers rewetting peatlands and wetlands to be an effective climate measure, and that rewetting 100,000 hectares by 2050 would reduce net emissions by 1–9 tons of CO₂e per hectare and year. Rewetting has the greatest effect on nutrient-rich, well-drained peatland in southern Sweden (Drott & Eriksson 2021). Empirical measurements after rewetting low-productive land in northern Sweden have shown an increase in both carbon dioxide and methane emissions (Laudon et al. 2023).

Chapter 7 addresses substitution: the exchange (substitution) of fossil raw materials and other climate-affecting materials for wood and other products based on biomass. How substitution should be calculated is debated, and has a major impact on the conclusions drawn about the forest's total climate benefit. The range of assumed substitution factors is large, but a rough estimate is that for every kilogram of carbon contained in the wood raw material, approximately 1 kilogram of fossil carbon is not released into the atmosphere.

Chapter 8 reports on forestry's own emissions. Forestry, off-road transport, timber trucks and road maintenance are estimated to contribute just under 1 million tons of CO₂e per year (Björheden 2019). Timber trucks account for almost half of these emissions.

Chapter 9 discusses leakage effects, which can occur if climate mitigation measures in one location lead to increased emissions in another location or increased use of fossil products. For example, reducing logging locally can lead to increased imports, and thus increased logging in other countries. A synthesis of leakage studies based on reduced harvesting revealed an average leakage of 52% (Lundmark 2022). This means that a local reduction in logging of 1 cubic meter leads to an increase in logging by 0.52 cubic meters in another location. Under Swedish conditions,

leakage is estimated at 24–27% for sawn timber, 44–53% for pulpwood and 26–72% for fuelwood (Lundmark 2022).

Chapter 10 presents the overall discussion and conclusions, and the differences in time frames between different studies are emphasized. In the short term (a couple of decades), it may be most effective to reduce logging, even when substitution is taken into account. However, this means that for a period we will release more fossil carbon dioxide into the atmosphere with consequences for future opportunities to reduce climate impact. In the longer term, most studies point to a managed forest with a higher growth rate providing the greatest total climate benefit. The spatial delimitation in different studies is also of great importance. In an individual stand, a carbon loss occurs in the first 10–15 years after felling, but thereafter the loss is compensated for by carbon sequestration through the growth of the trees. In a landscape comprising a mixture of young and old stands, it is the total increase in growth that determines the climate benefit. There are no clear answers regarding the question of if clear-cut forestry or continuous-cover forestry has the greatest climate benefits. The question of an increased carbon sink through reduced felling can be political, because reduced felling also means a reduced supply of sawn timber, paper pulp and forest energy. If this is compensated for by increased imports or increased use of fossil alternatives, no climate benefit has been achieved. If, however, the consumption of goods is reduced, the reduction contributes to climate benefits. Switching to alternative forms of management, for example different types of continuous-cover forestry, can in the long run provide a forest landscape with continued high growth. However, the transition phase will represent reduced growth and, in addition, will affect the supply of forest energy and pulpwood. It is also a political issue when any climate benefit has to be weighed against biological diversity and other ecosystem services social benefits.

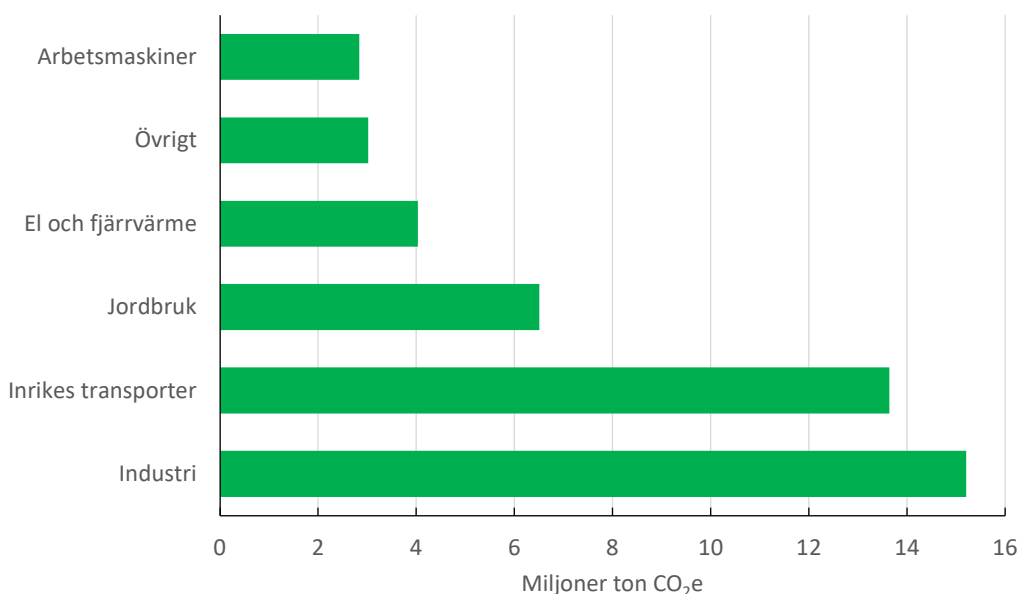
1. Inledning och syfte

Skogens roll i klimatfrågan har debatterats livligt under senare år. Det beror inte enbart på de inomvetenskapliga frågorna om hur man mäter och beräknar koldioxidupptag och kollager utan framför allt på att skogens roll fått ökad betydelse i klimatpolitiken. Därmed har det blivit en angelägenhet för hela samhället.

Under resans gång från inrättandet av FN:s klimatkonvention (UNFCCC) via Kyotoprotokollet till det nu gällande Parisavtalet har klimatförändringarna blivit allt allvarligare vilket lett till skärpta politiska mål och styrmedel. Parisavtalet strävar som bekant mot att begränsa den globala medeltemperaturökningen till 1,5°C. Idag råder en konsensus om att mänskliga utsläpp är en starkt bidragande orsak till temperaturhöjningen (IPCC 2023). Klimatpolitiken handlar om att begränsa halten av växthusgaser i atmosfären och därmed hålla uppvärmningen till en hanterbar nivå. Denna reglering kan ske genom att minska utsläppen och öka upptagen och det finns mål och styrmedel för båda dessa kranar.

Inom EU hanteras klimatpolitiken numera via Fit for 55 som är ett lagpaket som syftar mot att minska EU:s nettoutsläpp med minst 55 % fram till 2030 jämfört med 1990. I EU:s klimatpolitiska ramverk finns tre huvudkomponenter. Ett utsläppshandelssystem (EU ETS) som med hjälp av begränsade utsläppsrätter och handel med dessa ska prissätta växthusgasutsläpp i en ökande takt så att utsläppen minskar, samt ett system för den icke-handlande sektorn (ESR). Slutligen finns ett system med bindande mål på medlemsstatsnivå för upptag i markanvändningssektorn där skogsbruk ingår (LULUCF) som innebär ett svenskt åtagande att öka kolsänkan med ca 4 miljoner ton CO₂e till 2030 jämfört med perioden 2016–2018. Mellan dessa tre system finns viss möjlighet till överföring så att överkompensation gentemot målet i ett system kan tillgodoräknas i ett annat system.

Sveriges utsläpp av växthusgaser uppgick 2022 till 45,2 miljoner ton koldioxidekvivalenter (CO₂e) exklusive LULUCF, fördelat enligt figur 1.



Figur 1. Sveriges territoriella klimatutsläpp uppgrädd 2022 till 45,2 miljoner ton koldioxidekvivalenter
Data från naturvardsverket.se.

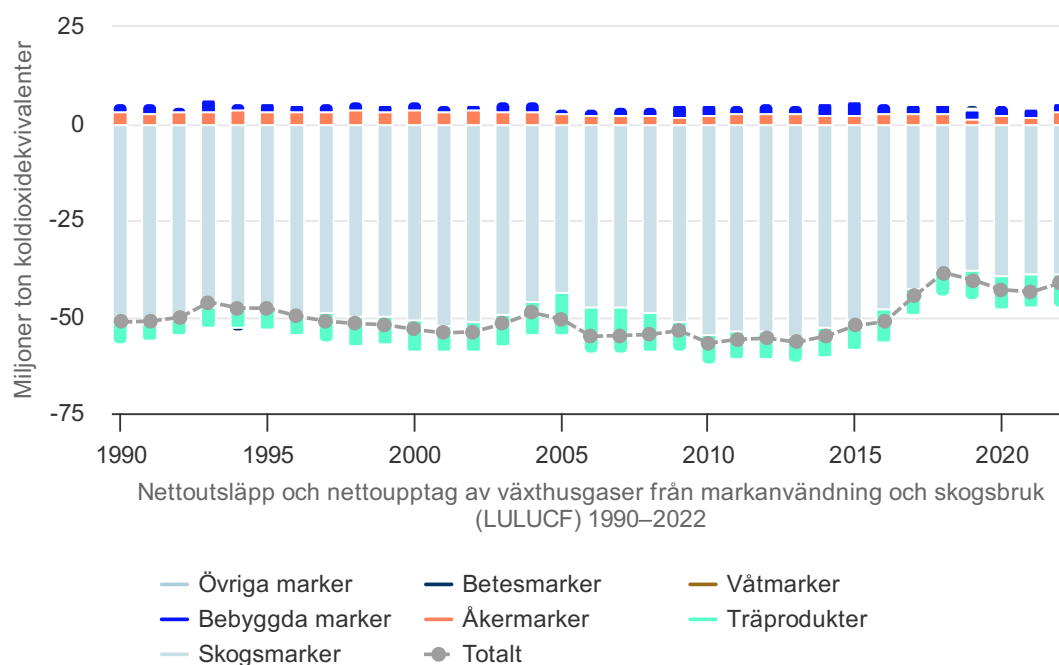
Inom markanvändningssektorn LULUCF står skogen och skogsprodukterna för en kolsänka medan annan markanvändning är en kolkälla. Nettoupptaget var 2022 cirka 41,2 miljoner ton CO₂e (figur 2). Det innebär att skogens upptag var nästan lika stort som de sammanlagda territoriella utsläppen i Sverige.

I det klimatpolitiska ramverket finns alltså inbyggda systemgränser i hur skogens roll i klimatarbetet ska redovisas och vilka tidshorisonter som hanteras. Men målsättningen för de olika systemen kan påverkas av vilken roll man vill och tror att skogen kan ha vilket i sin tur ställer stora krav på den forskning som beskriver skogens klimatnytta.

Route to Paris är ett tvärvetenskapligt forskningsprojekt med syfte att undersöka och utveckla skogens roll i klimatomställningen. Mer specifikt är målet att införliva klimatsmarta åtgärder inom ramen för en hållbar skogsanvändning för att på så sätt nå målen i Parisavtalet. Hur kan skogen samtidigt säkerställa en hög kolsänka och bidra till en grön omställning av samhället? I projektet, som

löper över tiden 2022–2026, samarbetar forskare från Umeå universitet, Sveriges lantbruksuniversitet, Södertörns högskola, Högskolan i Borås och Lunds universitet.

Denna rapport sammanfattar var forskningen står i frågan om skogens roll i klimatomställningen, och inte minst konsekvenserna av att bruka eller bevara skogen. Syftet är att ge svar på några av de vanliga frågor som cirkulerar i debatten och att ge exempel på resultat från forskningen. Rapporten gör inte anspråk på att klassas som en fullständig litteraturöversikt. I stället har vi valt ut studier och rapporter som illustrerar olika ståndpunkter och som förklarar varför forskning kan leda till olika slutsatser. Den som önskar lättillgängliga och aktuella översikter om skogen och klimatet kan läsa till exempel Eriksson (2007), Hannerz m.fl. (red. 2017), Björheden (2019), Bergh m.fl. (2020), Rummukainen (2021), Konjunkturinstitutet (2021), Lundblad m.fl. (2022), Petersson m.fl. (2022) och Lundmark (2023).



2. Skogen – räddaren eller fördärvaren i klimatkampen?

Skogen har en nyckelroll i klimatomställningen, så långt är i stort sett alla överens. Skogen lyfts också upp som en avgörande faktor i Parisöverenskommelsen och i EU:s klimatpolitik. Med fotosyntesens hjälp tar träden upp koldioxid. När tillväxten i skogen överstiger avverkningen och den naturliga avgången kommer skogen att ta upp mer koldioxid än den avger – skogen utgör en kolsänka. Avverkningen i sin tur skapar produkter som kan ersätta klimatskadliga produkter som olja och cement. Men vilken skog och vilken typ av utnyttjande är bäst ur klimatsynpunkt?

Olika skolor brukar landa någonstans på en skala från att lämna skogen som den är för att bygga upp ett kollager, till att skogen ska brukas intensivt för att både öka kolinbindningen och för att skogens produkter ska ersätta fossila och andra klimatskadliga råvaror. Längs denna skala finns alla mellanlägen, till exempel att dra ner avverkningarna eller att inte tillåta trakthyggesbruk men ändå bedriva ett visst skogsbruk.

Genom att välja bland tillgängliga forskningsstudier går det att ”bevisa” att alla slutsatser är rätt. Det beror bland annat på att resultaten varierar beroende på vilka antaganden som har gjorts i olika studier. Det gör det inte lättare för beslutsfattare, och för den delen inte heller för forskare. I den här skriften gör vi ett försök att förklara varför forskare kommer till olika resultat. Det finns några grundförutsättningar som kan bidra till de olika slutsatserna:

- Tittar man på skogen i ett beståndsperspektiv eller summan av skogsbestånden i ett helt landskap? Det får väldigt stor betydelse om kolbalansen beräknas för ett enskilt kalhygge, eller om skogen ses som ett system där unga, medelålders och äldre skogar tillsammans utgör helheten.
- Är climateffekten på lång sikt det viktiga, eller de närmaste årtiondena? Vi har ju bråttom att klara 1,5-gradersmålet med dagens utsläpp, om det inte redan har inträffat. Vilken skogsanvändning ger snabbast klimatnytta? Och vilken ger den mest uthålliga?
- Vilka data används för att beräkna skogens upptag och utsläpp? I olika typer av skogar, olika åldrar, och i kolpoolernas alla olika komponenter

(markkol, död ved, levande biomassa etc.)?

Tittar man bakåt på faktiskt uppmätta data eller utgår man från modeller och simuleringar?

- Hur hanteras skogens produkter, de som ersätter klimatdrivande fossila råvaror, cement, stål? Hur beräknas substitutionen, det fossila kol som man slipper ta upp ur jordskorpan genom att vi använder träbaserade produkter? Och kan man verkligen räkna med samma substitutionseffekter i framtiden, när vi kanske har fasat ut mycket av den fossila användningen?
- Om vi drastiskt skulle minska avverkningarna i Sverige så minskar exporten till andra länder. Innebär det minskad konsumtion, ökad användning av fossila alternativ, eller ökar avverkningen i andra länder för ett ersätta bortfallet från Sverige?
- Är det skillnad på fossilt kol och biogent kol? Det fossila kolet i olja, naturgas, sten- och brunkol har lagrats i jordskorpan under miljontals år. Det biogena kolet ingår i ett naturligt kretslopp mellan atmosfär och växtlighet, det är alltså ingen ”ny” koldioxid som tillförs, och ju mer kol som stannar kvar i växtligheten, desto mindre koldioxid hamnar i atmosfären.
- Hur kommer skogarna att påverkas av uppvärmningen? Ökar tillväxten, eller får vi mer torkstress, naturliga störningar och skador som bromsar eller till och med sänker tillväxten? Här finns ännu inget facit.
- Hur påverkas skogens andra nyttor av olika handlingsalternativ? Biologisk mångfald, sociala värden, andra ekosystemtjänster? Det påverkar inte direkt climateffekterna men har väldigt stor betydelse för avvägningar och prioriteringar.

2.1 En spoiler

Trots att forskargrupper tvistar finns det oftast en samstämmighet om att:

1/ ett sätt att öka kolsänkan på kort sikt är att sluta avverka. Åtminstone den svenska skogen är välväxande som en effekt av tidigare skötsel, och kommer att fortsätta att öka sitt kollager under många decennier om den lämnas orörd. Ett annat sätt att snabbt öka kolsänkan är att gödsla skogen förutsatt att man inte samtidigt ökar avverkningen.

2/ på längre sikt kommer kolsänkan i oskötta skogar att minska. Kollagret blir högt men ökningen av kollagret minskar. Det beror på att träd tillväxten avtar med stigande ålder och träd dör, stormfälls och får insektsskador, och på lång

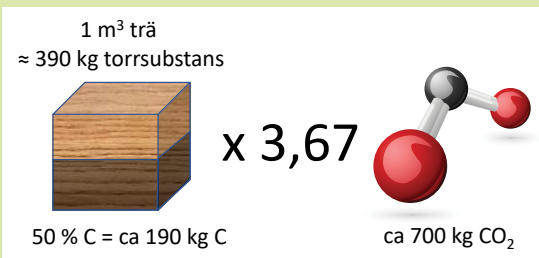
sikt kan ett obrukat skogslandskap bli klimatneutralt (dvs. släppa ut lika mycket kol som tas upp). Fortsätter vi sköta skogarna kommer vi att bibehålla en hög tillväxt samtidigt som den levererar produkter åt samhället. Avverkningen av mogna träd är en förutsättning för uthålligt hög tillväxt. Kolsänkan bestäms då av hur stor del av tillväxten som skördas.

Frågan är då om vi har tid att vänta på det långsiktigt bättre utfallet med skötta skogar eller om det är mer bråttom att bromsa utsläppen idag. Och hur gör vi med dagens industriprodukter – trähusbyggnad, lokala värmeverk, toalettpapper – om vi stryper avverkningen av vår egen skog?

Från trä och träd till koldioxid

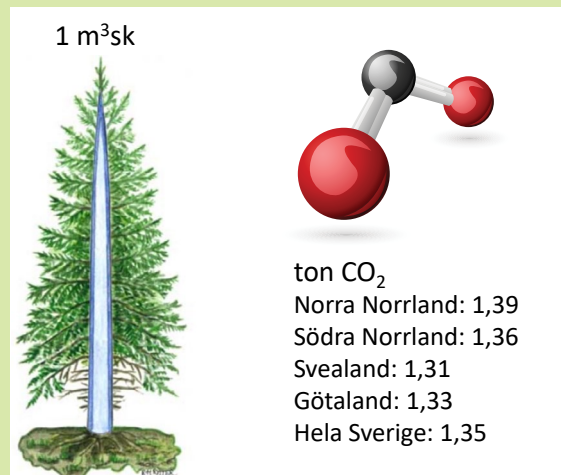
Trä består till ungefär 50 % av kol (C) vid torrsvikt. Det är lite skillnad beroende på träslag, ålder och växtkraft. Barrträd har något mer C (47–55 %) än lövträd (46–50 %), mest på grund av högre ligninhalt.

Koldioxid (CO_2) består av en kolatom med atommassa 12 och två syreatomer med atommassa 16. Matematiken ($44/12$) säger att om vi multiplicerar C med 3,67 får vi vikten av CO_2 . 1 ton kol motsvarar alltså 3,67 ton koldioxid.



Från m³sk till CO_2 i hela trädet

SLU Riksskogstaxeringens provträd ger ett underlag för att beräkna hur mycket torrbiomassa och därmed kol som finns i en skogskubikmeter om även trädens grenar, barr, löv, stubbar och rötter räknas in. Trädens totalbiomassa beräknas med Marklunds funktioner (Marklund 1988) och ställs i relation till stamvolymen beräknad med Näslunds (1947) funktioner. Halva torrvikten beräknas vara kol, som kan omräknas till koldioxidekvivalenter (1 ton C = 3,67 ton CO_2). Med provträd för tidsserien 2010–2019 erhålls dessa omräkningstal för ett medelträd i olika delar av landet.



Begrepp

Klimatneutral: Ett mångbottnat begrepp. Det kan ses som en skog där utsläpp och upptag av koldioxid är lika stort. Skogen påverkar inte atmosfärens koldioxidinnehåll. Begreppet används också för förbränning av biobränslen. Då resonerar man som att koldioxiden från förbränningen ingår i det naturliga kretsloppet och tas upp av ny växtlighet.

Klimatnytta: Ett begrepp som väger in alla aspekter av skogens klimatpåverkan och innehåller kolsänkor i skogen och skogsprodukter samt undvikna utsläpp när skogsprodukter och bioenergi ersätter fossila råvaror, cement och stål.

Koldioxidekvivalent: Det finns flera gaser som påverkar atmosfären. För att underlätta jämförelser räknas exempelvis lustgas och metan om till koldioxidekvivalenter, ett uttryck för deras klimatskada i jämförelse med koldioxid. I rapporten förkortad CO₂e.

Kolpooler: Det finns många kolpooler att förhålla sig till. I skogen brukar man skilja på levande träd-biomassa, död ved, förna och markkol. Även skogsprodukterna i samhället utgör en kolpool.

Kolkälla: Uppstår när kollagret i en kolpool minskar. Kolförrådet minskar i poolen och ökar i atmosfären.

Naturbaserad kolsänka: Uppstår när kollagret i en naturbaserad kolpool ökar. Kolförrådet ökar i poolen och minskar i atmosfären.

Teknisk kolsänka: Biogena utsläpp av koldioxid sker vid förbränning av biobränslen. Om koldioxiden i rökgaserna återfångas med tekniska lösningar och kolet lagras geologiskt (bio-CCS) uppstår en permanent kolsänka.

Additionalitet: En kolsänka som uppstår till följd av ett aktivt beslut om att anpassa skogsskötseln med syfte att lagra in mer koldioxid. Kolsänkor som uppstår på grund av lagkrav räknas inte som additionella.

Lustgas: N₂O, dikväveoxid. Under syrerika förhållanden omvandlas lustgasen till kvävgas men vid syrebrist kan lustgas släppas ut i atmosfären. Lustgas är 265 gånger mer klimatpåverkande per molekyl jämfört med koldioxid.

Metan: CH₄, även kallad sumpgas. Metan bildas i syrefattig miljö och är närmare 30 gånger mer klimatpåverkande per molekyl jämfört med koldioxid.

Respiration: Cellandning från träden (autotrof respiration) eller från nedbrytning i marken (heterotrof respiration). Den autotrofa respirationen är betydande och sker hela dygnet och hela året, men under växtsäsongen (och bara på dagarna) kompenseras den av upptag av koldioxid via fotosyntesen. Den heterotrofa respirationen från nedbrytning i marken är ungefär lika stor under hela omloppstiden.

Substitution: Ett omdiskuterat begrepp som handlar om undvikna utsläpp. Om produkter av trä ersätter (substituerar) fossila produkter eller produkter som genererar stora koldioxidutsläpp vid tillverkningen (till exempel cement) betyder det att mindre fossil koldioxid tillförs atmosfären.

Substitutionsfaktor: Hur mycket växthusgasutsläpp som undviks när en viss råvara/energi används i stället för någon annan. Ofta uttrycks faktorn som hur många kilo fossilt kol som ersätts av ett kilo kol i biomassan. Storleken på substitutionsfaktorn beror på en rad antaganden vilket i sin tur kan resultera i motstridiga resultat vad gäller skogens klimatnytta beroende på vilka antaganden som gjorts.

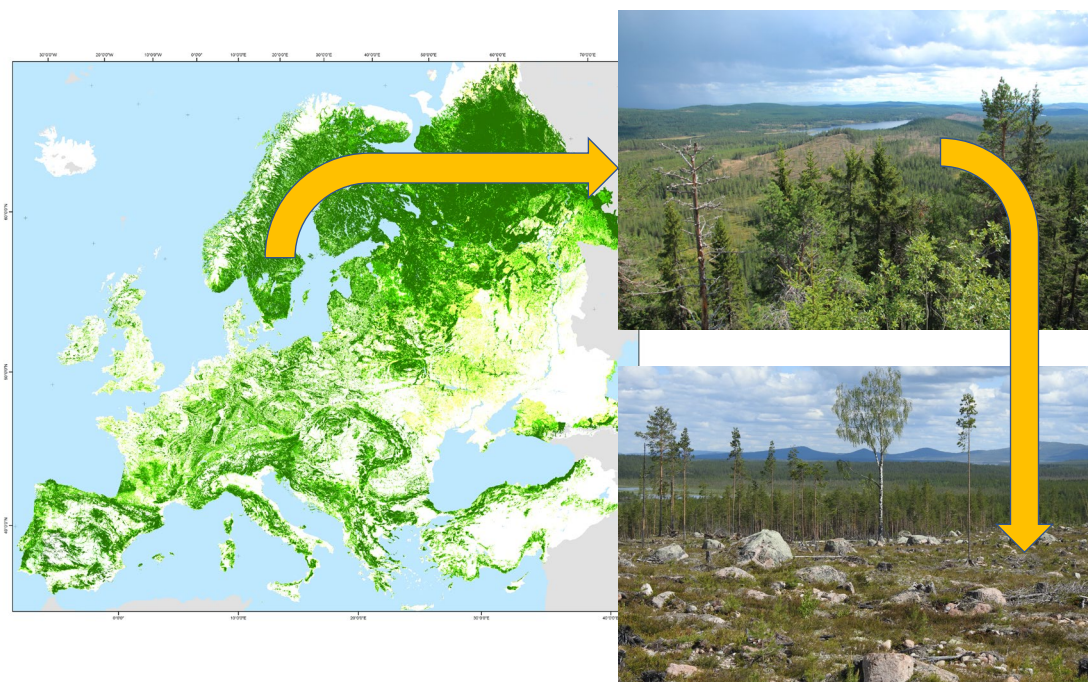
3. Det handlar om systemgränser

3.1 Bestånd eller Landskap

När ett enskilt bestånd utgör systemgränsen innebär en avverkning så klart en förlust av kol från systemet under den första tiden, eftersom kollagret minskar kraftigt till följd av avverkningen. Man pratar om att det uppstår en kolskuld. Det finns heller inte några träd som kan ta upp koldioxid, samtidigt som koldioxid fortsätter att avges från marken. I ett enskilt bestånd blir det intressant hur lång tid det tar innan annan vegetation och de nya träden kan balansera avgivningen från markens alla nedbrytande organismer. Hur lång tid det tar beror på vilken ny skog som skapas och hur snabbt den växer. Så småningom återställs kollagret i takt med att ett nytt skogsbestånd växer upp. Resone-

rar man så här så tänker man ofta att skogen finns, sedan skördas den och då behöver den växa upp igen för att klimatnytta ska ha uppstått.

Om skogslandskapet är systemgräns är det skogens totala kollager och tillväxt som är intressant (figur 3). Alla träd i alla åldrar ingår i systemet och den totala tillväxten avgör hur mycket som kan avverkas utan att kollagret minskar. Avverkas mindre än det växer så uppstår en kolsänka och någon kolskuld uppstår aldrig med det synsättet. Resonerar man så här så tänker man ofta att först växer skogen upp och sedan skördar man, det vill säga att först tas koldioxiden upp och sedan återförs den till atmosfären.



Figur 3. Slutsatserna om skogens klimatnytta kan variera om man tittar på regional (nationell/europeisk) nivå, på ett landskap eller på det enskilda hygget. Skogskarta från EFI Forest Map of Europe. Foton: Mats Hannerz.

3.2 Tidsperspektivet

Slutsatserna blir olika om tidsperspektivet är "NU" (eller cirka 10–20 år framåt), 50 år eller 100 år.

Med ett Nu-perspektiv är det bäst att låta skogen stå för att uppnå de definierade klimatmålen, särskilt om man antar att substitutionsfaktorn är låg (se kapitel 7). Skogen får då buffra för koldioxidutsläpp i andra samhällssektorer med utgångspunkten att kolsänkan i skogen blir större än de ökade utsläpp som uppstår när man måste använda mer olja och cement till följd av att skogsprodukterna försvinner. Varje avverkning innebär en förlust av kolsänka. Dessutom anges ofta att det uppstår vinster för den biologiska mångfalden när skogen får utvecklas fritt. Nu-perspektivet tar inte hänsyn till skogens tillväxt på längre sikt, att gamla skogar tappar i växtkraft, eller att risken för störningar ökar i åldrande skogar. Det tar heller inte hänsyn till omställningskostnader (och klimatbelastning) av att lägga ner skogsindustri, eller om avverkningen flyttar till andra länder. Däremot kan det finnas ett antagande att man på längre sikt lyckas med andra metoder för att minska utsläppen eller öka upptagen, till exempel infångning av koldioxid. Om inte konsumtion och industriproduktion minskas kan Nu-perspektivet också innebära ett ökat fossilberoende jämfört med om skogen brukas.

Med ett Framtids-perspektiv (50–100 år eller mer) är det bäst att bruka skogen aktivt och avverka mogna träd för att upprätthålla hög tillväxt. Det var också slutsatsen från Skogsstyrelsens senaste konsekvensanalyser (SKA22) där scenarier med större naturvårdsavsättningar ger hög kolinlagring på kort sikt men scenariot Dagens skogsbruk ger större kolinlagring på längre sikt (Skogsstyrelsen 2022). Detta gäller särskilt om man antar att substitutionsfaktorn är hög. Substitutionsnyttan är additiv och med uthålligt hög avverkning kommer den samlade substitutionsnyttan till slut att bli större än den nytta som uppstår av att låta skogen stå och vara kolsänka eftersom kolsänkan avtar med tiden i den obrukade skogen.

Det finns dock ett alternativ till Nu-perspektivet, nämligen att aktivt öka både biomassaproduktionen och kolinbindningen. Gödsling och beskogning av jordbruksmark kan ge en stor kolsänka på kort tid (se avsnitt 4.4). Det finns också ett alternativ som ökar substitutionsfaktorn. Med ökad återvinning och återanvändning av

skogsprodukter ökar substitutionsfaktorn. Den ökar också om bio-CCS (avskiljning och lagring av koldioxid från förnybara källor) skulle installeras i skogsindustrin och kraftvärmeverk. Det finns således många vägar att välja om man vill nå Parisavtalets mål.

3.3 Den stora skiljelinjen – bruka, bevara eller bruka försiktigare

Lite förenklat landar de olika synsätten i två grupper: Den ena gruppen ser ett system med växande skogar i olika åldersklasser som sammantaget binder mycket koldioxid samtidigt som biomassa från skogarna ersätter fossila produkter. Vi kallar dessa för "brukarna". Den andra gruppen, "bevararna", vill maximera skogen som kolsänka nu genom att lämna den och låta den fortsätta växa. Ett träd som avverkas betyder att det för evigt har slutat att ta upp koldioxid, och kolet i det avverkade trädet kommer så småningom att tillföras atmosfären. I debatten är det dock knappast någon som förespråkar extremerna; att lämna skogen helt orörd eller att nyttja den maximalt. Ett ofta förekommande synsätt är att skogsbruk visst kan vara motiverat men med lägre avverkningsnivå, utan kalhyggen och där den avverkade biomassan främst används till långlivade produkter. Vi kallar gruppen för "bruka försiktigare".

3.3.1 Så här tänker "brukarna"

Det handlar om att både sköta skogen i hela landskapet så att den har en hög tillväxt samtidigt som uttaget virke och avverkningsrester blir produkter som lagrar kol och ersätter fossila råvaror. Brukarna ser den minskade koldioxidinfångningen under hyggesfasen som en del i en dynamik där omgivande skogar tar upp koldioxid. Det är landskapets totala tillväxt som ska vara så hög som möjligt. Det viktiga är hur hela skogens kolbalans ser ut, och här lyfts ofta fram att skogen växer som bäst i "yngre medelåldern". När skogen blir gammal avtar dess nytta som kolsänka eftersom tillväxten minskar samtidigt som träd dör och avger koldioxid.

Skogen kan vara en kolsänka även i framtiden samtidigt som avverkningen ökar. Det förutsätter att kolsänkan i levande trädbiomassa, det vill säga det ökande virkesförrådet av stående skog, leder till ökad tillväxt. Därför måste skogarna skötas så att den relativa tillväxthastigheten (räntan på

virkeskapitalet) bibehålls eller ökar. Avverkning av mogna träd blir då en viktig tillväxtfrämjande åtgärd som säkerställer att skogen hålls vital och livskraftig. Det gäller alltså att bygga virkesförråd i unga och medelålders skogar, inte i gamla, svagväxande skogar.

3.3.2 Så här tänker "bevararna"

Det viktiga är att minska koldioxiden i atmosfären nu och därför vinner klimatet på att skogen får stå kvar och växa. Det kommer att ta decennier innan den blir så gammal att kolupptaget *de facto* minskar. Ett avverkat träd innebär en förlust av en kolsänka och när skogsprodukterna så småningom bryts ner tillförs atmosfären koldioxid som hellre borde ha stannat i skogen. Ett hygge blir en "kolbomb" eftersom det saknas träd och annan vegetation som kan ta upp de växthusgaser som alltid läcker från marken, oavsett om marken är träddäckt eller inte. De produkter som kommer från skogen är till stora delar en överförbrukning, människan behöver helt enkelt konsumera mindre och framför allt mindre av kortlivade skogsprodukter.

3.3.3 Så här tänker "bruka försiktigare"

Det handlar om att både maximera koldioxidupptaget och att minska användningen av "onödiga" skogsprodukter. Biobränsle kan till exempel ersättas med sol och vind. Kalhyggen kan ersättas av hyggesfria avverkningsalternativ, och mer av virket ska användas till långlivade produkter som sågtimmer i trähus. Ett kalhygge som tas upp idag kommer att vara en nettoutsläppare av koldioxid ända fram tills att träden vuxit upp, och då spelar det ingen roll att omgivande skogar tar upp koldioxid.

Alla har rätt – men det finns en intresse- och värderingskonflikt! Och alla behöver ställa sig frågan: Vad tror vi om konsumtionens utveckling i världen, kan den minska eller kommer den att öka? Hur mycket av skogens produkter kan vi avstå ifrån idag? Är det moraliskt rätt att importera virke? Visar vi framtida generationer störst ansvar genom att bromsa skogsbruket idag, och kanske rädda klimatet under 1,5–2-gradersgränserna, eller genom att skapa långsiktiga förutsättningar för skogen att leverera förnybara produkter?

4. Bruka eller bevara – vad säger forskningen?

4.1 Olika avverkningsnivåer

Enligt en studie kan minskad avverkning öka kolsänkan på kort sikt (upp till 50 år). Den positiva effekten av lägre avverkning kvarstår länge på magra marker men avtar snabbare på bördiga (södra Sverige). Resultaten är starkt avhängiga antaganden om substitution (Skytt m.fl. 2021).

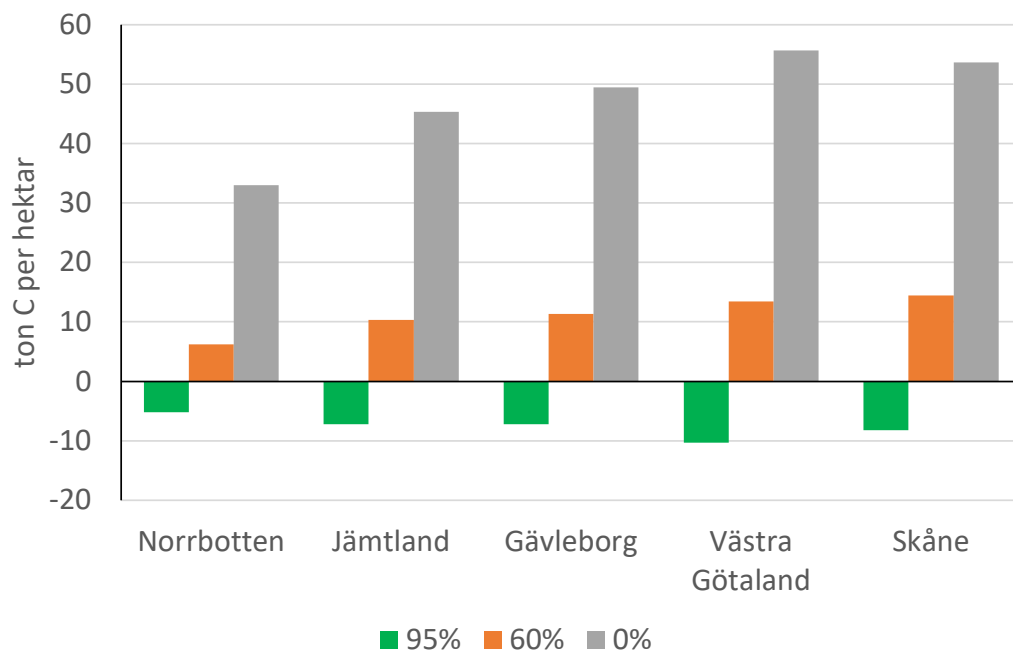
Uppföljning av de faktiska avverknings- och tillväxtnivåerna under de senaste 40 åren visar att virkesförrådet har ökat med 1 miljard m³ i Sverige samtidigt som 3 miljarder m³ har avverkats. Fram till 2059 beräknas fortsatt avverkning med dagens nivå innebära att 1,84 miljarder ton CO₂ undvikits att släppas ut i atmosfären. I alternativet att sluta avverka var motsvarande siffra 0,02–0,87 miljarder ton. Beräkningen tar hänsyn till substitutionseffekter (Holmgren 2021).

En studie som vägde in tillväxt, substitution och internationell handel med skogsprodukter beräknade att dagens skogsbruk kan bidra långsiktigt till en klimatnytta motsvarande 60 miljoner ton CO₂ per år i kolsänka och undvikna utsläpp i Sverige. Med ett mer intensivt skogsbruk (till exempel gödsling) kan klimatnyttan öka med ytterligare 40 miljoner ton CO₂ per år (Lundmark m.fl. 2014).

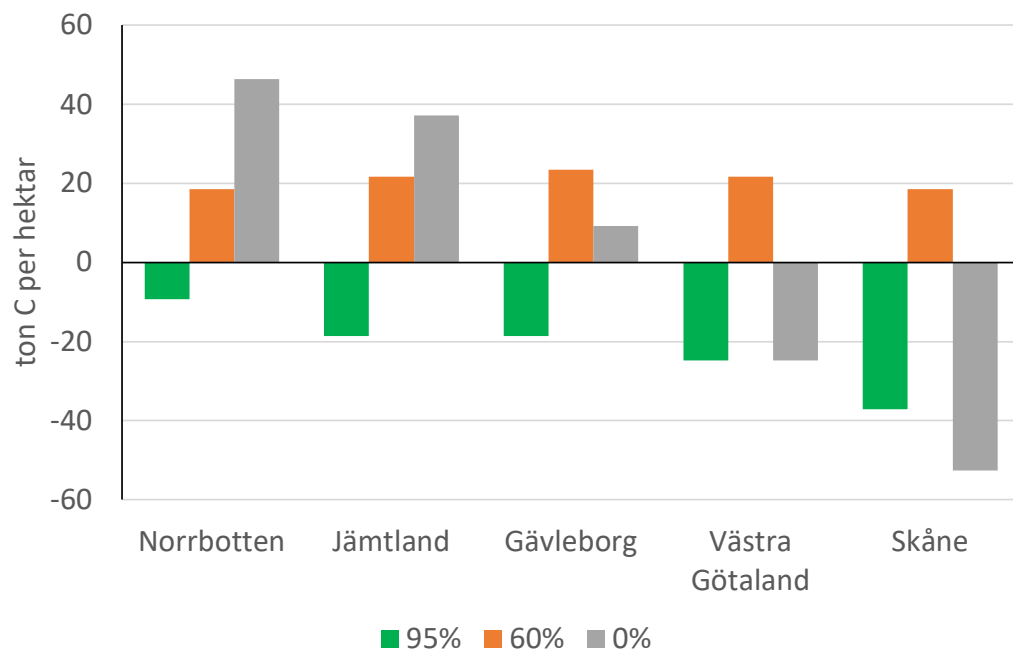
4.1.1 Klimatnyttan i fem landskap

Skytt m.fl. (2021) analyserade hur klimatnyttan påverkas av olika avverkningsnivåer (95, 60, 40 och 0 % av tillväxten) jämfört med den aktuella avverkningsnivån (ca 80 %). I fem landskap i Sverige (Norrbotten, Jämtland, Gävleborg, Västra Götaland, Skåne) skrevs tillväxten fram under 200 år med SLU:s analysystem Heureka (figur 4–5). Substitutionseffekten beräknades utifrån produktfördelningen i Sverige 2019. I substitutionen räknades inte skogsindustrins energianvändning in, och inte heller substitutionseffekterna där det saknas fossila alternativ (till exempel grafiska papper). Substitutionskoefficienterna varierade från 0,5–1,9 för de olika produkterna (se kapitel

7). Författarna drog slutsatsen att sänkt avverkning är mest positivt för klimatet i alla landskap, åtminstone på kort sikt (50 år). Ökad avverkning är negativt både på kort och lång sikt. Ett nollavverkningsalternativ ger i alla landskap en positiv kolbalans som överskrider de svenska antropogena utsläppen fram till åtminstone 2045. De högsta kortsiktiga effekterna av minskad avverkning fås i högproduktiva landskap. I lågproduktiva områden är effekterna lägre men mer långvariga. Om substitutionseffekterna avtar i framtiden (exempelvis genom att fossila råvaror ersätts av mindre klimatskadliga) kommer en lägre avverkning att vara positiv även på lång sikt.



Figur 4. Sammanlagd kolsänka per hektar under 50 år, 2025–2075 för olika avverkningarnivåer jämfört med 0-linjen (80 % avverkning). Ökad avverkning (95 %) blir en svagare kolsänka i alla landskap medan ingen avverkning (0 %) bidrar med störst kolbindning. Fritt från figur 5 i Skytt m.fl. 2021.



Figur 5. Sammanlagd kolsänka per hektar under 150 år, 2025–2175 för olika avverkningarnivåer jämfört med 0-linjen (80 % avverkning). Ökad avverkning (95 %) blir en kolkälla i alla landskap medan ingen avverkning (0 %) är en kolsänka i norra och en kolkälla i södra Sverige. Fritt från figur 5 i Skytt m.fl. 2021.

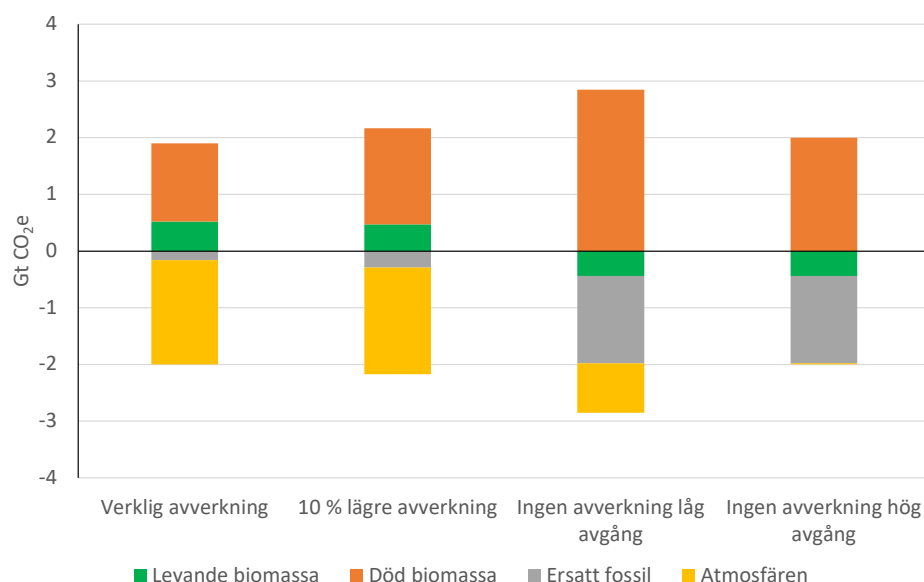
Artikeln av Skytt m.fl. (2021) fick svar av Gustavsson m.fl. (2022), som lyfte fram att de har underskattat substitutionseffekterna, felbehandlat livscykelanalyserna och inte vägt in riskerna för skador om skogen lämnas orörd. De var också kritiska till att inte konsekvenserna av minskad produktion av papper och andra produkter vägdes in, liksom inte heller nyttan med biobränsle. Exempelvis har inte ersättningar för uteblivna skogsprodukter vägts in i analysen. Man hänvisade också till att andra studier (Gustavsson m.fl. 2017 och 2021) visat att klimatnyttan av minskad avverkning visserligen är större på kort sikt (20–30 år) men sämre efter det. Efter 200 år är klimatnyttan enligt dessa studier 10 gånger större med ett aktivt skogsbruk jämfört med den initiala nyttan av att lämna skogen.

4.1.2 Kolinbindning under 40 år i svensk skog

Olika avverkningsnivåer användes också av Holmgren (2021). Han utgick från svenska data över kolförrådets ändring 1980–2019 och gjorde också en beräkning med Skogsstyrelsens framtidsscenario i SKA15 för 2020–2059. Dessutom räknade han in en substitutionsfaktor på i genomsnitt 500 kg CO₂ per avverkad kubikmeter och att om-

ställningen från skogsindustri till annan tillverkning också kommer att belasta klimatet. Under perioden 1980–2019 ökade det svenska virkesförrådet med 1 miljard kubikmeter samtidigt som 3 miljarder kubikmeter har avverkats. I beräkningen jämfördes den aktuella avverkningen med dels en minskad avverkning (–10 %), dels att avverkningen upphör helt (figur 6).

Den aktuella avverkningen och –10 %-alternativet gav ungefär samma utfall, totalt 1,84 respektive 1,88 miljarder ton CO₂-ekvivalenter som hade undanhållits atmosfären under perioden 1980–2019. Under hela perioden fram till 2059 hade cirka 80 miljoner ton CO₂ per år undanhållits atmosfären. Icke-avverkning gav en betydligt lägre klimateffekt, 0,02–0,87 miljarder ton CO₂ (spännvidden beror på olika antaganden om tillväxt i den kvarlämnade skogen). Holmgren såg resultaten som ett bevis för att det inte uppstår någon kolskuld av avverkningen eftersom virkesförrådet hela tiden har ökat samtidigt som substitutionen har bidragit positivt. Han konstaterade att icke-avverkning innebär att kolförrådet flyttas från ett fossilt lager i jordskorpan till ett mer osäkert lager i levande biomassa.



Figur 6. Ackumulerad förändring i kolförrådet i hela Sverige för de jämförda alternativen under 40-årsperioden 1980–2019. Negativa värden betyder att atmosfären tillförts koldioxid, positiva att kolförrådet ökat i biomassan. Alternativen Icke avverkning innebär ett större kollager i levande biomassa men samtidigt ökade utsläpp eftersom fossila produkter ersätter träprodukter. Fritt från Holmgren 2021.

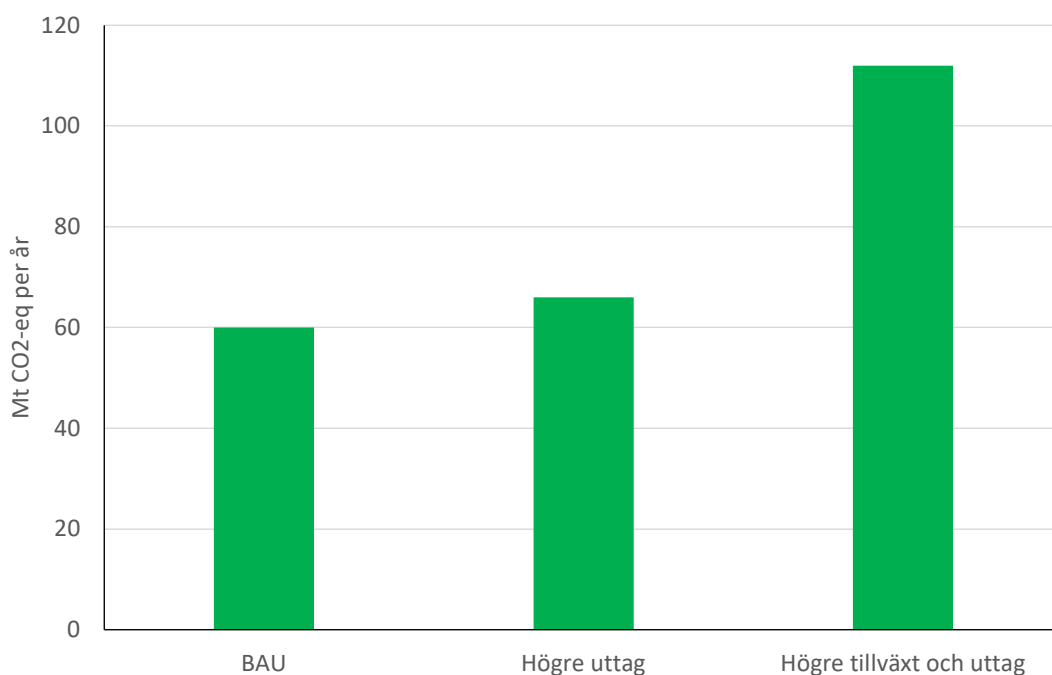
4.1.3 Intensivare brukande

Lundmark m.fl. (2014) gjorde en beräkning av effekterna på kolsänkan av ett mer intensivt brukande på både kort (2006–2035) och lång sikt (2036–2105). De gjorde också en historisk beräkning av kolsänkan år 1900–2005. De brukningsnivåer som jämfördes var ”business as usual” (BAU, som idag), ökad avverkningsintensitet (samma stamvedsuttag som i BAU men 35 % grot och 20 % stubbar skördas) och ökad tillväxt (56 % ökning med mer aktiv skogsskötsel samt gödsling). Markkolet antogs vara lika mellan brukningsalternativen.

I studien räknas också substitution in med i genomsnitt 0,47 ton CO₂ per kubikmeter avverkat virke. Livslängden på skogsprodukter varierade

från byggnadsvirke (80 år), interiört virke (30 år) och biobränsle (2 år). Studien tar hänsyn till effekter både inom landet och substitutionseffekter av export till andra länder. Klimatnyttan beräknades som summan av kolsänkor i olika pooler och undvikna utsläpp till följd av substitution.

Basalternativet ledde till en klimatnytta i slutet av perioden (2105) på 60 miljoner ton CO₂e/år (figur 7). I genomsnitt bidrog varje avverkad kubikmeter till att 500 kg fossil CO₂ kunde undvikas att släppas ut (en kubikmeter innehåller kol motsvarande 700–900 kg CO₂, beroende på densitet). Med en mer aktiv skogsskötsel, ökad tillväxt och ökad avverkning ökade klimatnyttan med över 40 miljoner ton CO₂e per år.



Figur 7. Årlig klimatnytta i hela Sverige under perioden 2019–2105 för dagens skogsbruk (BAU), högre uttag (35 % av grot och 20 % av stubbar) och högre tillväxt och uttag. Från Lundmark m.fl. 2014.

4.2 "Facit" från nordiska skogen

Den årliga kolsänkan i Norge, Sverige och Finland ökade med 3 gånger under perioden 1960–2017. Samtidigt ökade avverkningen med 40 % tack vare tillväxten i den brukade skogen som också ökade under perioden. Resultaten tas som intäkt för att aktivt skogsbruk är bäst för kolbalansen (Kauppi m.fl. 2022).

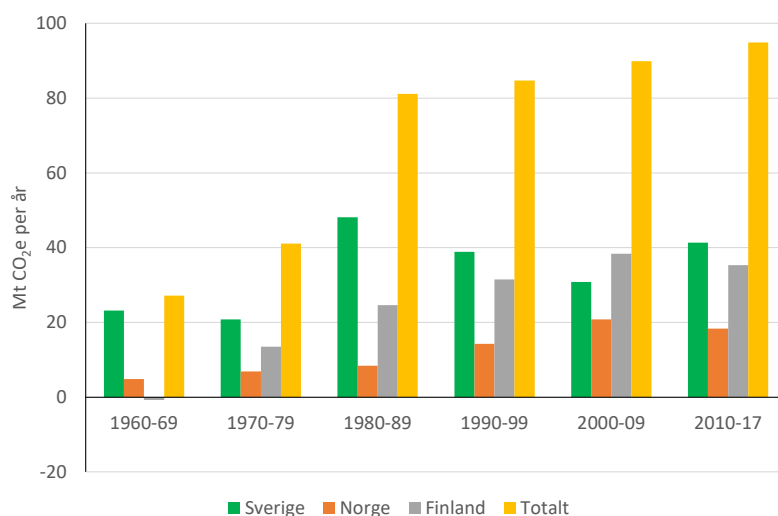
I de nordiska länderna ökade kolförrådet med 35 % mellan 1990 och 2017. Under samma period har halva den kolmängd som fanns 1990 avverkats. I mer intensivt brukade boreala skogar i Ryssland och Kanada har kolsänkan varit nära noll under perioden. Avverkning och avgång, främst till följd av skogsbränder, har alltså varit ungefär lika stor som tillväxten i skogen. I Alaska har kolförrådet till och med sjunkit, och skogen har där blivit en kolkälla i stället för en kolsänka. I Ryssland, Kanada och Alaska brinner 0,5–0,6 % av skogsarealen varje år, i de nordiska länderna 0,01 % (Högberg m.fl. 2021).

Framtidsprognoser och simuleringar av skogens och kolets utveckling är viktiga, men de är också omgärdade av osäkerheter. Större säkerhet finns i att använda redan uppmätta data, i retrospektiva studier. De nordiska länderna har ett unikt underlag eftersom nationella skogsinventeringar har pågått i 100 år. Från många länder finns också skogliga data inrapporterade till FN:s klimatkonvention *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC).

4.2.1 De nordiska ländernas bidrag

En samnordisk studie (Kauppi m.fl. 2022) analyserade kolförråden och deras förändring för tiden 1960–2017 i Norge, Finland och Sverige. Syftet var att kvantifiera kolbalanserna och diskutera vad

den relativt intensivt brukade skogen i de nordiska länderna har betytt för klimatet, detta under en period när trakthyggesbruk har dominerat helt. Kolsänkan i de tre länderna ökade från knappt 30 miljoner ton CO₂ per år till över 90 miljoner ton CO₂, alltså mer än en tredubbling (figur 8). Samtidigt har avverkningen ökat med 40 %. Under hela perioden har 3,5–5 miljarder ton CO₂ bundits i träd och mark och avverkning har bortfört 5,8–6,4 miljarder ton CO₂. I artikeln diskuteras att ett mer aktivt skogsbruk och skötsel av skogarna skulle kunna bidra mer till kolinbindningen globalt. I hela världen finns ungefär 2 miljarder hektar mark tillgänglig för skogsproduktion, och ytterligare arealer skulle kunna beskogas.



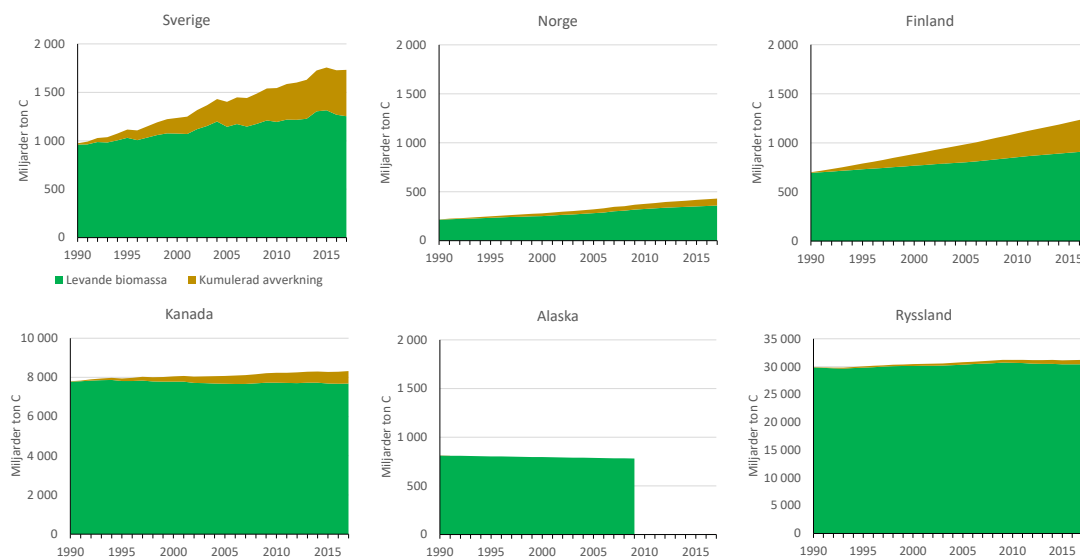
Figur 8. Årlig kolsänka i Sverige, Norge och Finland 1960–2017. Den årliga kolsänkan (tillväxten minus avgången) har ökat med 3 gånger i tre nordiska länder. Hänsyn tas bara till det stående virkesförrådet, inte till substitutionseffekter. Från Kauppi m.fl. 2022.

4.2.2 Jämförelse mellan boreala länder

Sverige, Norge och Finland ingår också i en annan studie som jämför kolbalansrapporteringen i sex länder i den boreala barrskogsregionen: Alaska, Kanada (de 160 miljoner hektar som brukas), Norge, Finland, Sverige och Ryssland (Högberg m.fl. 2021). Analysen omfattar perioden 1990–2017 baserat på rapporter till UNFCCC. I de nordiska länderna med ett intensivt skogsbruk har kolförrådet dubblats på 100 år, och ökat med 35 % under den undersökta perioden (figur 9). Samtidigt har avverkningen kunnat öka tack vare att tillväxten i skogen också ökat. I Kanada och Ryssland har kolförrådet inte ändrats. I Alaska har kolförrådet till och med minskat, skogen har där varit en kolkälla. I Ryssland, Kanada och Alaska brinner 0,5–0,6 % av skogsarealen varje år, vilket tillsammans med avverkning gör att avgången är ungefär lika stor som den årliga tillväxten. I de nordiska länderna med aktivt brukad skog över hela skogsarealen brin-

ner bara 0,01 % varje år. Alla länder rapporterar en svag ökning av markkolet på skogsmark men mest i de nordiska länderna. Rapporten belyser bara hur kolförrådet och därmed kolinbindningen har ändrats, inte hur avverkade skogsprodukter också kan bidra genom substitution (se kapitel 7).

Det intensiva brukandet i de nordiska länderna innebär ett skötselsystem där man efter avverkning återplanterar, röjer och gallrar under en omloppsperiod. Ryssland och Kanada avverkar skog i områden som är befolkade. En stor skillnad från brukandet i de nordiska länderna är att återbeskogningen är mer extensiv, ofta med fri återväxt, vilket minskar tillväxten och påverkar kolbalansen i den unga skogen. Skog i obefolkade områden är i princip orörd, med låg tillväxt och ibland okontrollerade skogsbränder där kolet i biomassan återförs till atmosfären. I den boreala delen av Alaska bedrivs inget skogsbruk alls, och majoriteten av alla skogsbränder härjar okontrollerat.



Figur 9. Kolförrådets förändring 1990–2017 i Norge, Finland, Sverige, Alaska, Kanada och Ryssland. Grönt är levande trädbiomassa, brunt är avverkat virke. Diagrammen summerar den mängd kol som har undvikits att tillföras atmosfären pga. skogen. Från Högberg m.fl. 2021.

4.2.3 De boreala skogarna är viktigaste kolsänkan

En global analys använde satellitdata (vegetation optical depth, VOD) som filtrerats för att minska brus från mänsklig påverkan och skillnader i vattenbalans. Denna analys beräknade biomassan på land i hela världen mellan 2010 och 2019 (Yang m.fl. 2023). Biomassans ökning motsvarade ett globalt ökat kolförråd med 0,5 miljarder ton kol per år. Det största bidraget till det ökade kolförråd stod de boreala skogarna för, 0,37 miljarder ton per år. Tempererade skogar kom strax efter med 0,13 miljarder ton C. Såväl boreala som tempererade skogar var alltså kolsänkor. Tropiska skogar var däremot kolkällor, eller på gränsen till koldioxidneutrala. Största tappet i kolförråd hade våta tropiska skogar (-0,07 miljarder ton C per år).

De tropiska skogarnas minskade kolförråd be-

rodde främst på avskogning och skogsförstörelse, särskilt i sydöstra Amazonas. Orörda våta tropiska skogar var däremot fortfarande kolsänkor. Den näst viktigaste orsaken till minskat kolförråd var överföring från träd- och buskmarker till jordbruk.

Ökningen i de boreala, tempererade och även subtropiska delarna av världen kunde knytas till områden som var aktivt brukade eller föremål för igenplantering. Exempelvis har skogsplanteringar i Kina resulterat i ökat kolförråd. Förluster av kol i boreala skogar förekommer dock lokalt där det har brunnit kraftigt.

Studien av Yang m.fl. (2023) fann också att unga (<50 år) och medelålders (50–140 år) skogar i boreala och tempererade områden stod för de största kolsänkorna. Skogar äldre än 140 år var fortfarande kolsänkor i boreala och tempererade områden, men kolkällor i tropiska områden.

4.3 Är hyggesfritt en lösning?

Ett kalhygge är en kolkälla under de första 10–20 åren, vilket på beståndsnivå är ett argument för att trädskiktet ska behållas intakt.

I ett landskapsperspektiv är det ingen skillnad på kolbalansen mellan trakthygges- och kontinuitetsskogsbruk (till exempel blädning), förutsatt att båda systemen kan upprätthålla samma tillväxt.

Det är svårt att fastställa hur skötselmetoderna skiljer sig åt i långsiktig produktion, men flera studier pekar på att hyggesfria brukningsmetoder har 10–20 % lägre tillväxt jämfört med trakthyggesbruk.

En omställning från dagens skogar, anpassade för trakthyggesbruk, till fullskiktade skogar anpassade för blädning, kommer enligt en studie att sänka tillväxten i den svenska skogen med en tredjedel under 50 år.

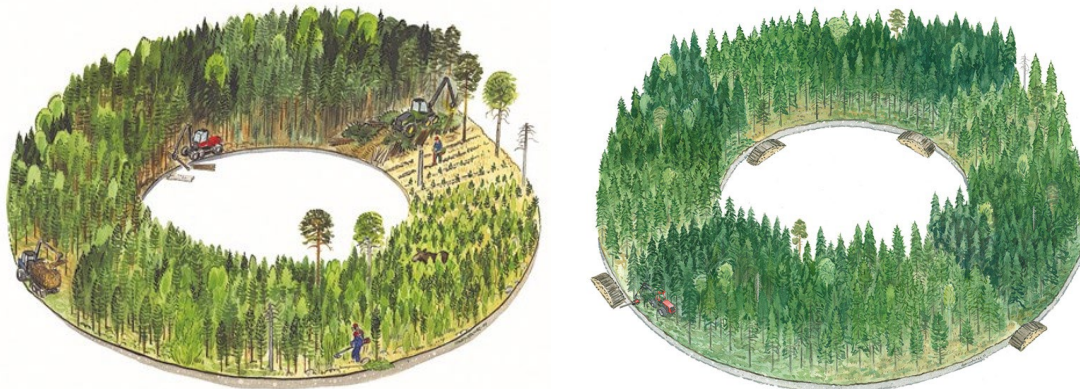
Det finns starka förespråkare för att hyggesfritt skogsbruk (figur 10) skulle vara mindre klimatbelastande än trakthyggesbruk (se diskussion i bland annat Appelqvist & Mogren 2023). Argumenten är framför allt att kalhygget i sig ger en kolförlust som tar 10–20 år att hämta igen, och att ett skogsbruk där grova träd plockhuggs i högre grad kan användas till mer långlivade träprodukter. Argument mot detta lyfter fram att tillväxten är lägre i det hyggesfria skogsbruket och att större arealer måste skördas för att få ut samma volymer. Det hyggesfria alternativet försvårar eller omöjliggör också den skörd av skogsbränsle som är möjlig efter en kalavverkning.

Förespråkare för hyggesfria metoder utgår ofta från mätningar av kolflöden i experimentskogar. Deras främsta argument är att kolbalansen är

negativ under kalhyggesfasen, och att det tar 10–15 år innan skogen övergår från att vara en kolkälla till en kolsänka (Vestin 2020, Lindroth m.fl. 2009). Kolflödesmätningar i gallringsskog visar att utsläppen efter gallring är mindre än efter en kalhuggning, och detta talar enligt författarna för att kalhyggesfritt är bättre (Lindroth m.fl. 2018). Från norra Sverige finns dock resultat som har visat att ett bestånd som kalhuggits blir en kolsänka redan efter 10 år (Peichl m.fl. 2022).

4.3.1 Troligen lägre tillväxt

Många forskare framhåller att det är tillväxten som är den viktigaste faktorn för skogens totala klimatnytta. Nordiska studier visar på en mycket stor variation i volymproduktion i hyggesfria brukningsalternativ, mycket beroende på skogar-



Figur 10. Ett landskap som brukas med trakthyggesbruk (vänster) som här exemplifieras av en blandning av skogar i olika åldersklasser med olika nivå på kolinbindningen. I ett landskap med blädning (till höger) eller andra hyggesfria metoder är hela marken trädklädd. Illustration: Martin Holmer.

nas sammansättning och inte minst virkesförråd (se syntes i Ekholm m.fl. 2023). En blädad skog med lågt virkesförråd får en kraftigt minskad volymproduktion, och virkesförrådet i en blädad skog bör vara 30–50 % högre än medelförrådet i trakthyggesbruk för att kunna hålla samma volymtillväxt (Elfving 2006).

En sammanställning av 19 studier i Sverige, Norge och Finland visade en variation i volymproduktion från 50 % upp till 150 % jämfört med trakthyggesbruk, och i genomsnitt 92 % (Soneson m.fl. 2017). Den relativa skillnaden är lägst på goda marker, där den blädade skogen kan hålla en högre volym. En senare sammanställning av 17 olika studier konstaterade att trakthyggesbruk oftast har högre långsiktig tillväxt, men att resultaten varierar och att det är svårt att fastställa vilket skötselsystem som är mest produktivt (Ekholm m.fl. 2023). Lundqvist m.fl. (2013) rapporterade om ett barrblandbestånd med olika behandlingar som följts under 85 år. Blädning av skogen resulterade i 60 % av volymproduktionen jämfört med kalhuggning och plantering, men detta var sannolikt orsakat av ett lågt virkesförråd från början. Under den senaste 50-årsperioden var volymproduktionen ungefär 80 % av produktionen på den planterade ytan.

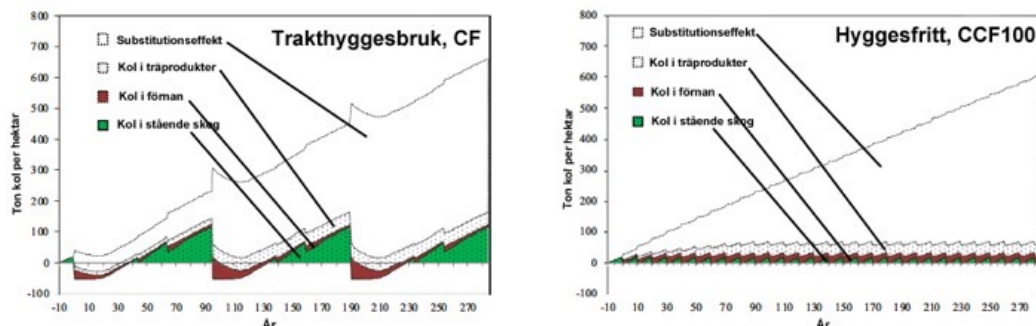
Det finns bara en empirisk studie som har jämfört klimatpåverkan på landskapsnivå av trakthygges- och blädningsbruk: en norsk studie med gran (Nilsen & Strand 2013). Under en 80-årsperiod var det totala kolförrådet 10–15 % större i trakt-hyggeslandskapet.

4.3.2 Effekter på virkesförsörjning och kolbalans

Soneson m.fl. (2017) beräknade tillväxteffekterna av en övergång till hyggesfritt skogsbruk med olika omfattning. En grundförutsättning var att de olika skötselformernas andel hade existerat under lång tid, och analysen tog därför inte hänsyn till omställning från dagens trakthyggesbruk till hyggesfria alternativ. Här antogs att grandominerad skog blädas medan talldominerad skog sköts med överhållna skärmar. Om 100 % av den svenska skogen bedrivs med hyggesfri skötsel skulle den nationella volymproduktionen vara 20 % lägre än idag, och skogsbränsle skulle vara försvunnet från marknaden. Om hyggesfritt bedrivs på 30 % av arealen skulle volymproduktionen vara 5–6 % lägre än idag. Vid 10 % hyggesfritt skulle volymproduktionen falla med 2 %, vilket motsvarar ett minskat upptag av drygt 3,4 miljoner ton koldioxid/år.

4.3.3 Samma tillväxt ger samma klimatnytta

Lundmark m.fl. (2016) gjorde en jämförelse mellan trakthyggesbruk och blädning på beståndsnivå i en fiktiv, flerskiktad granskog i mellersta Sverige (figur 11). De kom fram till att kolbalansen inte skiljde sig mellan blädning och trakthyggesbruk *per se*, utan det avgörande är vilken nivå på tillväxten som kan upprätthållas långsiktigt. I genomsnitt har den blädade skogen cirka 20 % lägre tillväxt, vilket ger motsvarande bortfall i kolinbindning.



Figur 11. Den kumulativa kolsänskan i trakthyggesbruk (CF) och hyggesfritt (alternativet CCF100 där tillväxten är lika med trakthyggesbrukets) under 285 år. Från Lundmark m.fl. 2016.

4.3.4 Omställningen ger förlorad tillväxt

En faktor att beakta i diskussionen om skötselsystem i Sverige är att omställningen från nuvarande trakthyggesbruk till hyggesfria metoder innebär en väsentligt lägre tillväxt under omställningsfa-

sen. Drössler (2013) beräknade att volymtillväxten minskar med en tredjedel under en 50-årig omställningsfas om utgångspunkten är ett ungt, jämnårigt granbestånd.

4.4 Hur påverkas kolsänkan av ökad tillväxt?

Traditionell gödsling av 100 000 hektar per år kan långsiktigt öka kolsänkan med drygt 2 miljoner ton CO₂ per år om tillväxtökningen får stanna i skogen.

Behovsanpassad gödsling (ungskogsgödsling) ökade kolförrådet i ung granskog med 47 % på 13 år. Ett ökat biobränsleuttag till 35 % av grot och 20 % av stubbar kan förbättra klimatnyttan med 10 miljoner ton CO₂ per år när substitutionseffekterna är inräknade.

Om 400 000 hektar jordbruksmark beskogades med snabbväxande lövträd kan kolinbindningen öka med 5,5 miljoner ton CO₂ per år.

En temporär kolsänka skapas om omloppstiderna förlängs fram till dess ett nytt jämviktsläge inträder.

Den svenska skogens virkesförråd har ökat till det dubbla under 100 år, samtidigt som fyra gånger så mycket virke har skördats och använts. Det ökade virkesförrådet betyder också att mer koldioxid binds av skogen. Ökningen beror främst på att skogarna blivit tätare och träden mer snabbväxta. Kan man göra skogen ännu mer snabbväxt och välanvänd, och vad skulle det betyda för skogen som kolsänka?

Här ges exempel på åtgärder som på relativt kort tid ökar klimatnyttan: gödsling, ökat uttag av skogsbränsle och beskogning av tidigare trädlös mark. Dessutom behandlas effekterna av andra åtgärder som förlängd omloppstid, mindre viltskador, ökad lövandel och mer hyggesfritt skogsbruk.

4.4.1 Gödsling

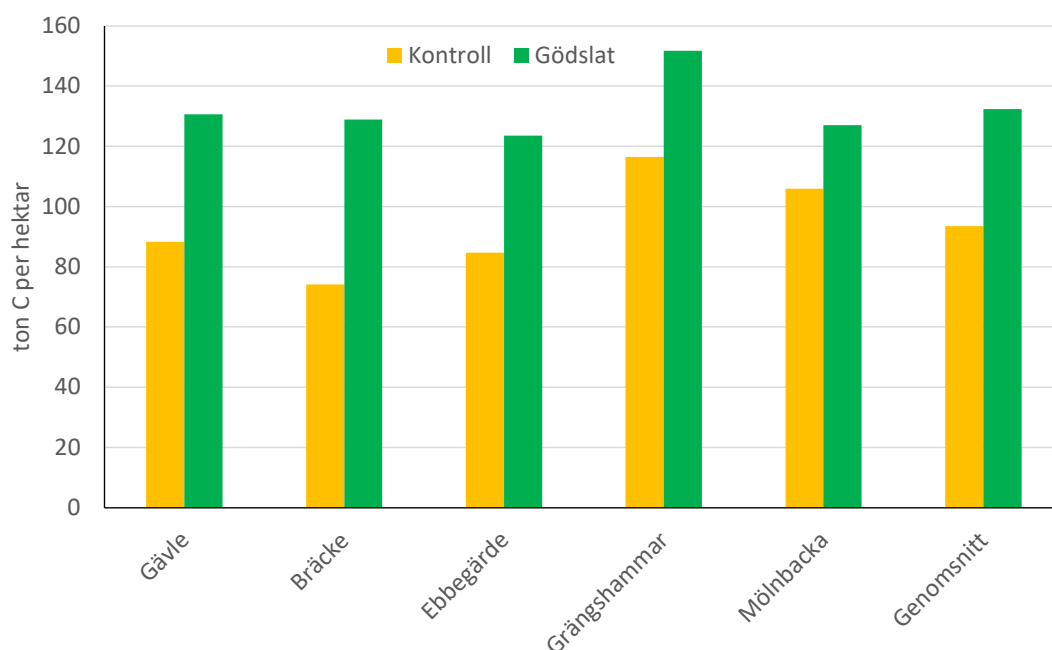
Skogsgödsling påverkar kolsänkan både genom ökad skogstillväxt och genom ökad kvävehalt i marken, vilket bromsar nedbrytningen. Skogsgödsling var som störst omkring 1980-talet då nära 200 000 hektar gödslades varje år. Gödslingen minskade kraftigt därefter och i början av 2000-talet gödslades cirka 20 000 hektar per år. Därefter har arealen ökat något till omkring 30 000 hektar per år (Gong m.fl. 2022). Det vanligaste sättet är att tillföra cirka 150 kilo kvävegödsel per hektar i skogar som är nära sin slutavverkningsålder, ungefär 10 år innan avverkningen. Skogen måste också vara lämplig, eftersom gödslingseffekterna varierar beroende på trädslag och ståndort. Effekten efter 10 år är cirka 15 m³sk extra virke per hektar.

Det betyder 1,5 kubikmeter per hektar och år, motsvarande en kolinlagring på 2,3 ton koldioxid per hektar och år. Med en årlig gödslingsareal på 100 000 hektar kommer det efter 10 år att finnas 1 miljon hektar gödslad skog, och nivån stabiliseras därefter. Det innebär en ökad kolinlagring på drygt 2 miljoner ton CO₂e per år (Gong m.fl. 2022). Motsvarande resultat (2,05 miljoner ton CO₂e/år) erhöles av Zanchi & Eriksson (2023) av en ökad gödsling från cirka 33 000 hektar till 150 000 hektar per år.

Gödsling av ungskogar pågår också i försökskala. Sådan gödsling upprepas flera gånger under omloppstiden med ett par års mellanrum, och den totala givan kan uppgå till 800–1500 kilo kväve per hektar. Ännu finns inte tillräckligt underlag för

att beräkna tillväxteffekterna för hela den tänkta perioden. Det har uppskattats att inom 50 år kommer 2,6 miljoner hektar ungskog att bli tillgängliga för denna typ av gödsling (Larsson m.fl. 2009).

En serie med fem försök undersökte ungskogsgödslingens effekter på kolbalansen i unga granbestånd (13–20 år vid försökets start) under totalt 13 år (Blasko m.fl. 2022). Den totala kvävegivan under perioden var cirka 1,1 ton kväve per hektar. Kolinlagringen ökade med 95 % i trädbiomassan, 150 % i förnan, 67 % i marken, och dessutom minskade koldioxidavgången från marken med 46 %. Det totala kolförrådet ökade i genomsnitt med 47 % (figur 12). I genomsnitt bands 35 kilo kol för varje tillfört kilo kväve. Responsen var störst på svaga marker.



Figur 12. Det totala kolförrådet per hektar efter 13 års gödsling jämfört med kontroll utan ungskogsgödsling. I genomsnitt hade förrådet ökat med 47 %. Från Blasko m.fl. 2022.

Koldioxidbudget för skogsgödsling

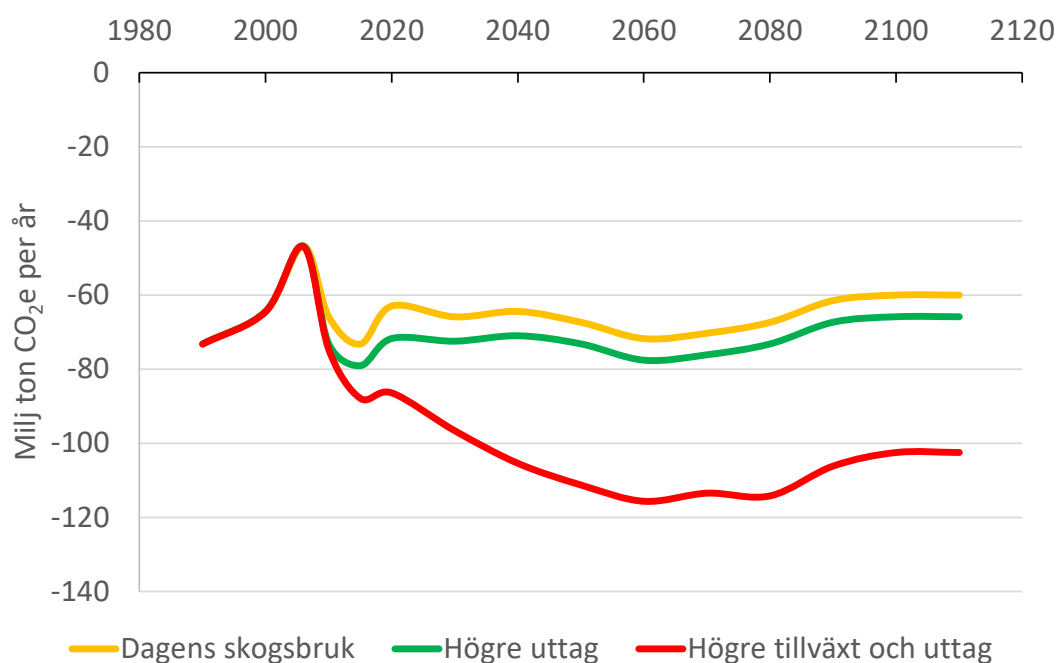
En skogskubikmeter motsvarar ett nettoupptag av 1,35 ton koldioxid om även trädens grenar, barr, löv, stubbar och rötter medräknas. Vid en tillväxtökning på 15 m³sk per hektar ökar koldioxidinlagringen i stamved med $15 \times 1,35 = \text{ca } 20$ ton koldioxid på 10 år. Produktion, transport och spridning av gödselmedlet uppskattas till 1,1 ton per hektar (från Skogsskötselserien nr 21). Med denna nivå betyder gödsling av 100 000 hektar en ökad koldioxidlagring på 2 miljoner ton CO₂ per år.

4.4.2 Skogsbränsleuttag

Skogsbränsleuttaget ur den svenska skogen har också stor potential att öka. En beräkning gjord av Svebio och Skogforsk visar att ökat utnyttjande av grot, stubbar och klenträd har en potential att öka biobränsleanvändningen med 42 TWh på kort sikt och till 74 TWh om 25–30 år (Svebio 2010). I en senare rapport bedömer Börjesson (2021) den årliga bruttopotentialen till 32 TWh från grot, 12,5 TWh från bark, 11,9 TWh från sågspån och kutterspån samt 9,9 TWh från lignin. Skogsstyrelsens skogliga konsekvensanalyser (SKA 22) skattade att potentialen för grot som helhet för landet är cirka 4–5 gånger högre än den faktiska

årliga användningen under perioden 2016–2020 (Skogsstyrelsen 2022).

Lundmark m.fl. (2014) räknade på effekterna av ett ökat biobränsleuttag vid avverkning, från dagens cirka 20 % till 35 % av groten, och att 20 % av stubbarna skördas. De fann att klimatnyttan kan öka med knappt 10 miljoner ton CO₂ per år (figur 13). Allra störst effekt hade en ökad tillväxt, och den därmed ökade användningen av skogsprodukter. Det scenariot kunde öka den långsiktiga klimatnyttan från 60 (motsvarande dagens skogsbruk) till 100 miljoner ton CO₂ per år. En ökad klimatnytta med ökat grotuttag påvisades också av Gustavsson m.fl. (2017).



Figur 13. Klimatnyttan per år med olika scenarier. Dagens skogsbruk innebär att dagens uttagsnivåer fortsätter. Till sammans med skogsprodukternas substitution leder det till att skogsbruket bidrar till en sänkning av koldioxiden med cirka 60 miljoner ton per år. Alternativet Högre uttag innebär större uttag av skogsbränsle (35 % av groten och 20 % av stubbarna) vilket ökar klimatnyttan något. Allra mest ökar klimatnyttan dock med scenariet Högre tillväxt och uttag. Med 50 % högre tillväxt stiger klimatnyttan med ytterligare cirka 40 miljoner ton CO₂ jämfört med dagens skogsbruksnivå. Förenklat från Lundmark m.fl. 2014.

4.4.3 Beskogning av jordbruksmark

Övergivna jordbruksmark är på många håll en resurs för skogsproduktion. I Sverige har 300 000–500 000 hektar beräknats som tillgänglig, och i hela Norden samt Baltikum är arealen 1,8–2,6 miljoner hektar (Rytter m.fl. 2014). I praktiken anses dock den tillgängliga arealen vara lägre. I en utredning (SOU 2020:4) skattas den till 140 000 hektar.

Övergivna jordbruksmark växer ofta igen av sig själv på sikt, men är samtidigt ofta bördigare än omgivande skog och kan med rätt trädslag och skötsel producera stora virkesvolym. Snabbväxande trädslag som poppel och hybridasp kan binda stora mängder koldioxid på kort tid. Hybridasp har en produktion på 20 kubikmeter stamved per år under en 25-årig omloppstid.

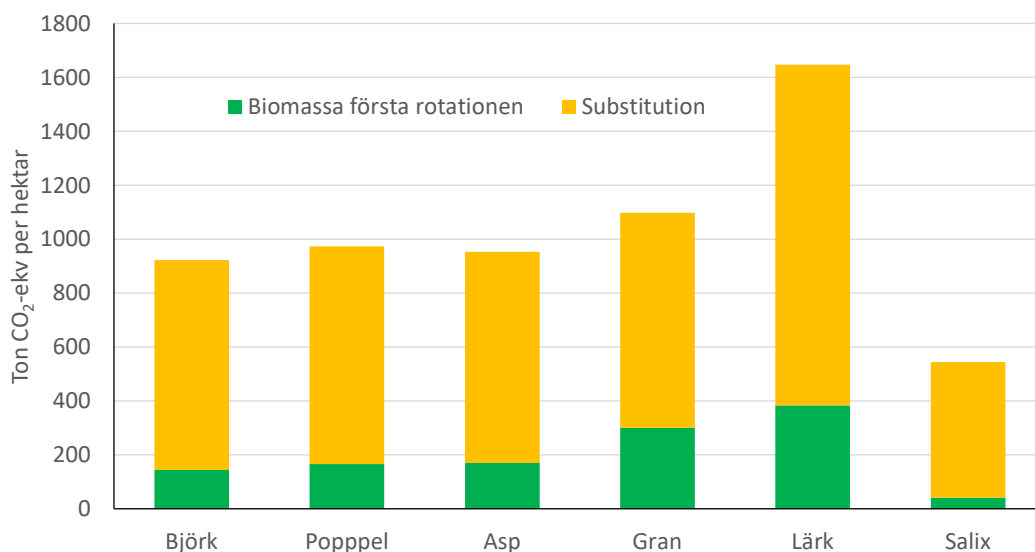
Rytter (2012) beräknade att planterad Salix och poppel binder netto i genomsnitt 4–4,5 ton C per hektar och år under en 20-årsperiod (varav 3,5–4 ton i ovanjordsdelen och 0,4–0,5 ton som markkol). Om 400 000 hektar beskogades med dessa snabbväxande grödor skulle cirka 1,5 miljoner ton C bindas årligen. Det motsvarar 5,5 miljoner ton CO₂, alltså mer än en tiondel av Sveriges antropogena utsläpp.

Beskogning av jordbruksmark ger dock ingen omedelbar effekt. Det tar ett antal år innan bestån-

det blir en nettosänka. En förklaring är att nedbrytningen av kol i marken inledningsvis är högre än tillförseln av nytt kol (Lundblad m.fl. 2021).

En annan studie lyfter fram de långsiktiga effekterna på kolbalansen med olika trädslag vid beskogning av övergivet jordbruksmark (Lutter m.fl. 2021). Trädslag med kort rotationstid, till exempel Salix och andra energigrödor, ger omedelbara effekter på klimatnyttan. Substitutionsfaktorn kan däremot betraktas som lägre än för mer långlivade trädslag, eftersom bioenergin främst ersätter olja och gas. Trädslag med lång rotationstid kan däremot användas till solida träprodukter, och på sikt också ge större genomsnittligt kolförråd i ett landskapsperspektiv. I studien jämfördes sex olika trädslag baserat på data från ett nätverk av fältförsök i Sverige. Försöket var mätt efter 9 år och den fortsatta tillväxten modellerades för en hundraårsperiod, med olika rotationstider för olika trädslag. Den sammanlagda substitutionseffekten beräknades med hänsyn till om biomassan kunde användas till energi, massaved eller timmer.

Studien visade att lärk gav den största klimatnyttan av de sex trädslagen, både när det handlade om kol som bundits i biomassan under den första rotationsperioden och när substitutionen räknats in (figur 14).



Figur 14. Klimatnyttan per hektar beräknad som summan av kolförråd i biomassan och substitution under en 100-årsperiod för olika trädslag planterade på tidigare jordbruksmark. Förenklat från Lutter m.fl. 2021.

4.4.4 Förlängd omloppstid

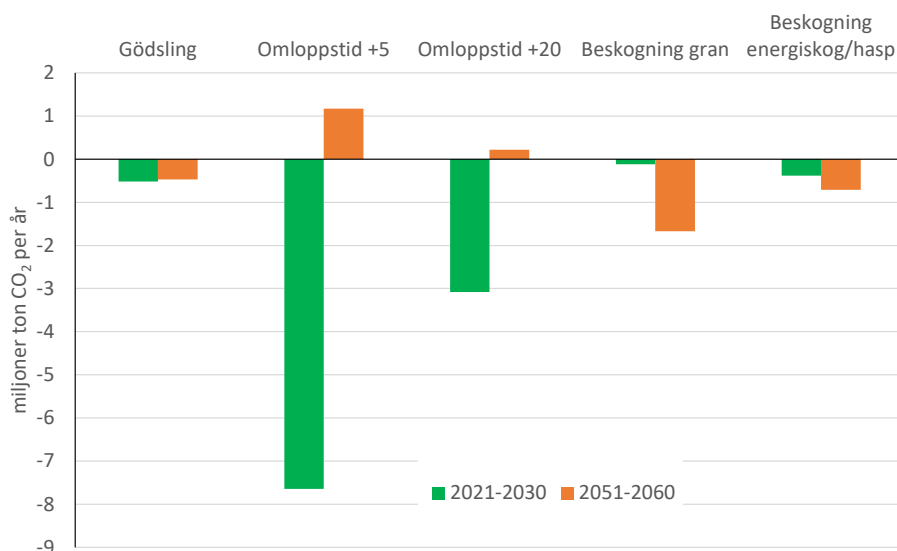
Maximal tillväxt i ett enskilt bestånd erhålls om skogen avverkas när den löpande (årliga) tillväxten är lika stor som medeltillväxten (tillväxtens kulmination). Om omloppstiden förlängs ytterligare jämfört med idag kan det betyda lägre tillväxt i ett landskapsperspektiv över tid, men en måttligt ökad tillväxt ger också ökad volym av biomassa i landskapet. På kort sikt leder en förlängd omloppstid till minskat virkesuttag och därmed en ökad kolsänka i skogen. Initialt leder dock den minskade avverkningen av en förlängd omloppstid till minskad substitution, vilket reducerar den positiva effekten av ökad kolinlagring i skogen (Lundström u.å.).

Lundmark m.fl. (2018) visade att den totala kolsänkan kan ökas med 0,1–0,2 miljoner ton CO₂ om omloppstiden ökas med 10 år på en yta som omfattar 0,5 miljoner hektar. En annan studie (LUSTRA 2008) visade att granskog i Dalarna med en 20 % förlängd omloppstid ökar kolinlagringen med 13 % i trädbiomassan och 10 % i marken. Om omloppstiden minskas jämfört med dagens nivåer sjunker kolinlagringen.

4.4.5 Vilken åtgärd ger störst kolsänka?

Gong m.fl. (2022) analyserade alternativen gödsling, förlängd omloppstid och beskogning av åkermark, och beräknade effekten på kolsänkan på kort och lång sikt. Gödsling 10 år före slutavverkning ökade med 50 000 hektar jämfört med idag. Omloppstiderna förlängdes med 5 år på 3,75 miljoner hektar skog (motsvarande 18 % av virkesproduktionsmarken) alternativt 20 år på 0,25 miljoner hektar. Beskogning av jordbruksmark skedde med gran på 10 000 hektar per år, alternativt med energiskog på 8 000 hektar per år under de kommande 5 åren (2 000 hektar med Salix och 6 000 hektar med hybridasp).

Figur 15 visar den uppskattade årliga kolsänkan under perioden 2021–2030, dvs. en 10-årsperiod samt på lite längre sikt (2051–2060). På kort sikt (10 år) ger förlängd omloppstid på en relativt begränsad areal störst klimatsänka. På längre sikt skapar dock beskogning av jordbruksmark störst klimatsänka. I analysen är det relativt begränsade arealer jordbruksmark som beskogas. Gödslingen på 50 000 hektar extra är fortfarande lägre än vad som är praktiskt och miljömässigt möjligt. De förlängda omloppstiderna berör bara en del av skogsmarksarealen. Studien av Gong m.fl. (2022)



Figur 15. Årlig effekt på kolsänkan under en första 10-årsperiod (2021–2030) och efter 30 år (2051–2060). Gödsling = gödsling av 50 000 hektar utöver dagens nivå. Omloppstid 5 år = förlängd omloppstid med 5 år på 3,75 miljoner hektar skog. Omloppstid 20 år = förlängd omloppstid med 20 år på 0,25 miljoner hektar skog. Beskogning gran = plantering av 10 000 hektar gran per år upp till 100 000 hektar. Beskogning energiskog = plantering av 2 000 hektar Salix och 6 000 hektar hybridasp per år under 5 år. Data från Gong m.fl. 2022.

omfattade inte alla potentiella åtgärder för ökad kolinlagring i skog. Exempelvis inkluderades inte förbättrad ståndortsanpassning, skogsträdsförädling, minskade skogsskador, effektivare förnygring och röjning.

4.4.6 Andra skogliga åtgärders effekt på kolsänkan

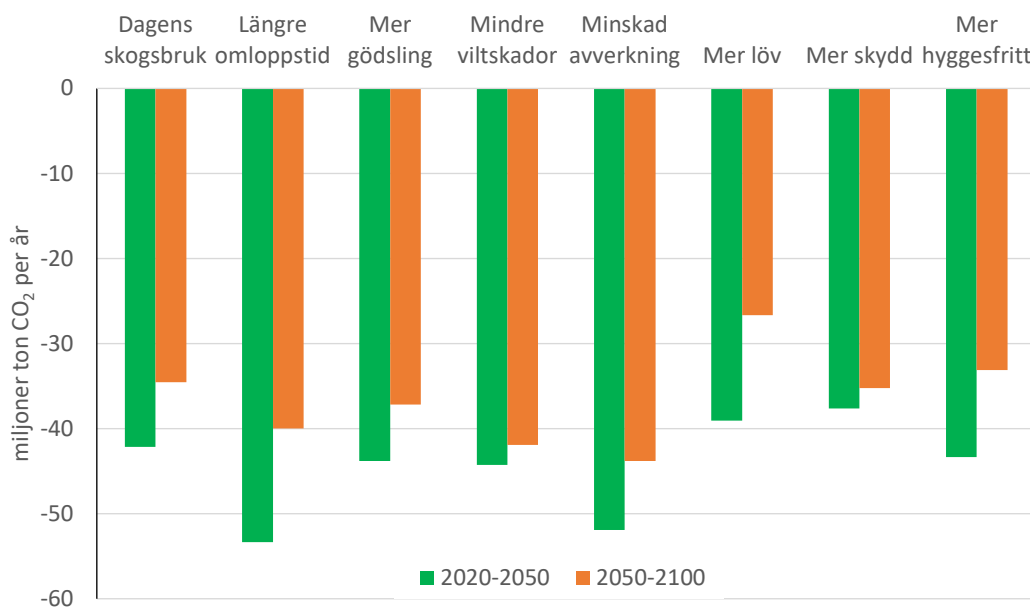
En rapport från Skogsstyrelsen (Zanchi och Eriksson 2023) analyserade effekterna på kolsänkan av skogliga åtgärder som både minskar och ökar den möjliga tillväxten och potentiella avverkningsen, beräknade med modellsimuleringar i beslutsstödet Heureka. Liksom i Gong m.fl. (2022) ingick inte läckageeffekter eller substitution i beräkningarna, däremot förändringar i träprodukters kolförråd. Effekterna på markkolket ingick inte heller i beräkningarna på grund av osäkerhet i modellerna.

En förutsättning för beräkningarna var att dagens avverkningsvolym upprätthålls med undantag för ett scenario som räknade med 10 % lägre avverkning. Det innebär att en åtgärd som leder till mindre intensivt skogsbruk i delar av landet

kompenseras av ökade virkesuttag i andra delar.

I studien jämfördes dagens skogsbruk (business as usual) med 1/ minskade viltskador i ungskog (halverade från 12 till 5 procent), 2/ förlängda omloppstider (30 procent förlängning), 3/ ökad lövandel (3 gånger mer björk än idag), 4/ mer hyggesfria metoder (en fjärdedel jämfört med 4 procent idag), 5/ ökad gödsling (4,5 gånger dagens nivå), 6/ ökade naturvårdsavsättningar (fördubblat) och 7/ minskad avverkning (10 procent jämfört med dagens nivå).

Figur 16 visar hur kolsänkan påverkas av de olika åtgärderna på kort (2020–2050) och lång (2050–2100) sikt. Den svenska skogen och träprodukter från den kommer att fortsätta att vara kolsänkor under de kommande 100 åren. Störst positiv effekt på kollagringen har minskad avverkning och förlängd omloppstid, både på kort och lång sikt. Mindre viltskador och mer gödsling har också positiva effekter jämfört med dagens skogsbruk. Mer hyggesfritt har en kolsänka ungefär på samma nivå som dagens skogsbruk medan kolsänkan blir lägre av ökad lövandel och mer skyddad areal.



Figur 16. Årlig effekt på kolsänkan på medellång sikt (2020–2050) samt på lång sikt (2050–2100) av olika skogliga åtgärder. Längre omloppstid = 30 % mer än lägsta tillåtna slutavverkningsålder. Mer gödsling = 4,5 gånger dagens gödsling. Mindre viltskador = minskade skador i ungskogen från dagens 12 till 5 %. Minskad avverkning = 10 % mindre än dagens avverkning. Mer löv = 3 gånger dagens areal förnygrädd med björk. Mer skydd = fördubblad areal naturvårdsavsättningar. Mer hyggesfritt = en fjärdedel av virkesproduktionsmarken brukas med hyggesfria metoder. Kolsänkan inkluderar kol i trädet, trävaror och död ved. Data från Zanchi och Eriksson 2023.

4.5 Är den gamla skogen koldioxidneutral?

Trädens tillväxt kulminerar i medelåldern. Äldre träd har långsammare tillväxt.

Påståendet att riktigt gamla naturskogar (upp till 800 år) fungerar som kolsänkor har ifrågasatts av forskare.

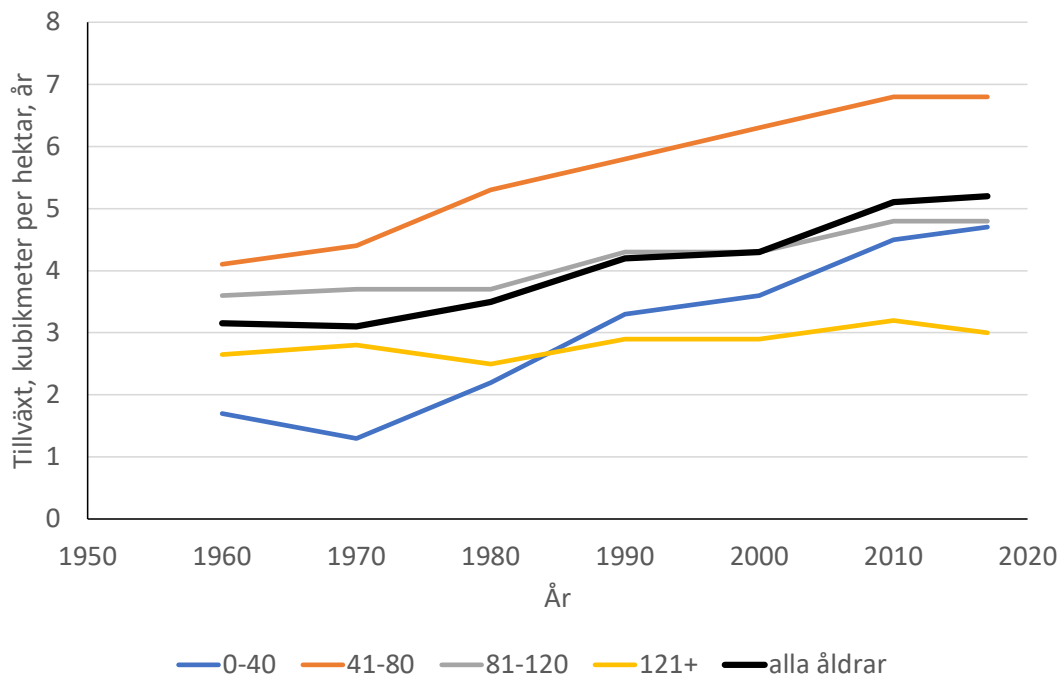
Brukad skog står för 78 % av den årliga kolsänkan i svensk skog, formellt skyddad skog för 7 %. Kolsänkan är ungefär 40 % större per hektar i den brukade skogen jämfört med den formellt skyddade.

Naturskog och extensivt brukad skog i Alaska, Kanada och Ryssland har inte ökat sitt kolförråd under perioden 1990–2019. Sverige, Finland och Norge har ökat kolförrådet med 35 % under samma period.

Nya globala satellitstudier visar att det är unga och medelålders skogar i boreala och tempererade områden som står för den största kolsänkan.

”Träd är som tonåringar, de äter mest när de växer upp” brukar det heta, och syftar på att det är den yngre och medelålders skogen som binder mest kol. Figur 17 visar tillväxten i olika åldersklasser mätt med Riksskogstaxeringens data. Det är framför allt

den medelålders skogen (41–80 år) som står för den stora tillväxtökningen. Även den yngre skogen (0–40 år) har ökat kraftigt i tillväxt under perioden medan den äldre skogens tillväxt (121+ år) har stagnerat.



Figur 17. Tillväxt per år och hektar i olika åldersklasser i skötte skogar i Sverige 1960–2017 beräknat med data från Riksskogstaxeringen.

När träden blir äldre avtar tillväxten. Det kan dock dröja länge, enskilda träd växer ju och binder kol så länge de lever. Men för skogen som helhet avstannar tillväxten i takt med att träd dör, faller omkull eller förstörs av brand eller insektsangrepp. Men blir den då koldioxidneutral, det vill säga att den inte tar upp mer koldioxid än som släpps ut genom trädens respiration och nedbrytning?

År 2008 fick en Nature-artikel stor uppmärksamhet då det framhölls att även 800-årig skog fortsätter att vara klimatpositiv. Luyssaert m.fl. (2008) gjorde en analys baserat på en sammanställning av 519 enskilda studier i boreala och tempererade skogar. De kom fram till att sannolikheten att äldre skogar band mer kol än som släpptes ut var större än att de var klimatneutrala. Skogar äldre än 200 år skulle binda i genomsnitt $2,4 \pm 0,8$ ton C per hektar och år, fördelat på 0,7 ton i stammar, 0,4 ton i förna och 1,3 ton i mark och rötter. Författarna kritiserade Kyotoprotokollet som inte tar upp gammelskogens bidrag till klimatet, och framhöll att naturskogar i boreala och tempererade områden står för 15 % av den globala skogsarealen och 10 % av nettoupptaget av kol.

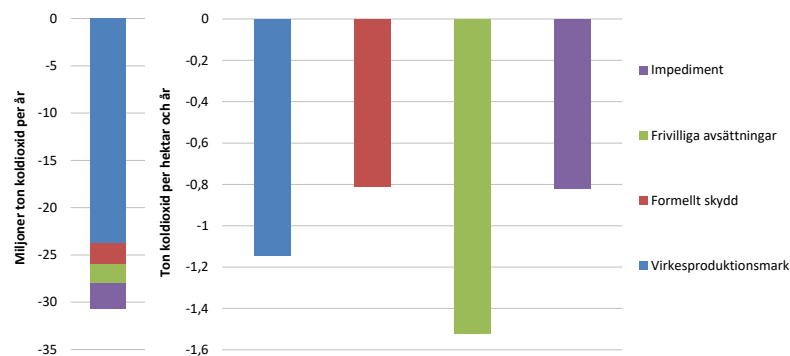
Slutsatsen stod mer eller mindre oemotsagd tills ett forskarteam gjorde en ny analys av samma material och visade på orimligheter i beräkningarna. Gundersen m.fl. (2021) pekade bland annat på att den beräknade ökningen av markkol skulle kräva enormt mycket högre tillskott av kväve än som normalt finns tillgängligt. Tillväxtsiffrorna för de äldre skogarna var enligt dem överskattade med 30 %. I Luyssaerts analys (2008) hade hänsyn inte tagits till om skogarna var skötta eller inte. Gundersen visade i sin nya analys att skötta skogar kunde vara kolsänkor även när de är gamla, men att de orörda skogarna är kolkällor. De framhöll

också att skogar inte kan fortsätta växa i det oändliga (Luyssaert använde nordvästra Nordamerikas skogar med $1400\text{--}1800\text{ m}^3/\text{hektar}$ som ett riktmärke), och som exempel tog de upp en 300-årig naturskog i Danmark som nu var koldioxidneutral.

Se även slutsatserna från Högberg m.fl. 2021 i 4.2.2. Där framgår att den intensivt brukade skogen i Sverige, Norge och Finland har varit en större kolsänka än den naturskog eller extensivt brukade skog som finns i Alaska, Kanada och Ryssland.

4.5.1 Är kolförråd och kolsänka större i naturskogen?

En naturlig reflektion är att brukade skogar, ofta unga, i genomsnitt har lägre kolförråd och lägre nettoupptag av koldioxid än naturskogar eller andra avsatta skogar. Sveriges lantbruksuniversitet, som tar fram underlag till den officiella rapporteringen av kolbalanserna för markanvändningssektorn (LULUCF), gjorde en beräkning av nettoupptaget i brukad och avsatt skog (figur 18). De fann att den högsta kolsänkan per hektar fanns i frivilliga avsättningar, som ofta är högproduktiva och av hög ålder. Däremot var kolsänkan per hektar större i brukade skogar (cirka 40 %) än i formellt skyddade områden (och förstås även impediment). Totalt i Sverige bidrog den formellt skyddade skogen med 2,2 miljoner ton CO_2 år 2016 medan den brukade skogen bidrog med 23,8 miljoner ton. Brukad skog stod då för 78 % av kolsänkan i svensk skog, på 74 % av skogsmarksarealen. Motsvarande för formellt skyddad skog var 7 % av kolsänkan på 10 % av skogsmarksarealen. De resterande 15 % av nettoupptaget gjordes i frivilliga avsättningar och improduktiv skogsmark.

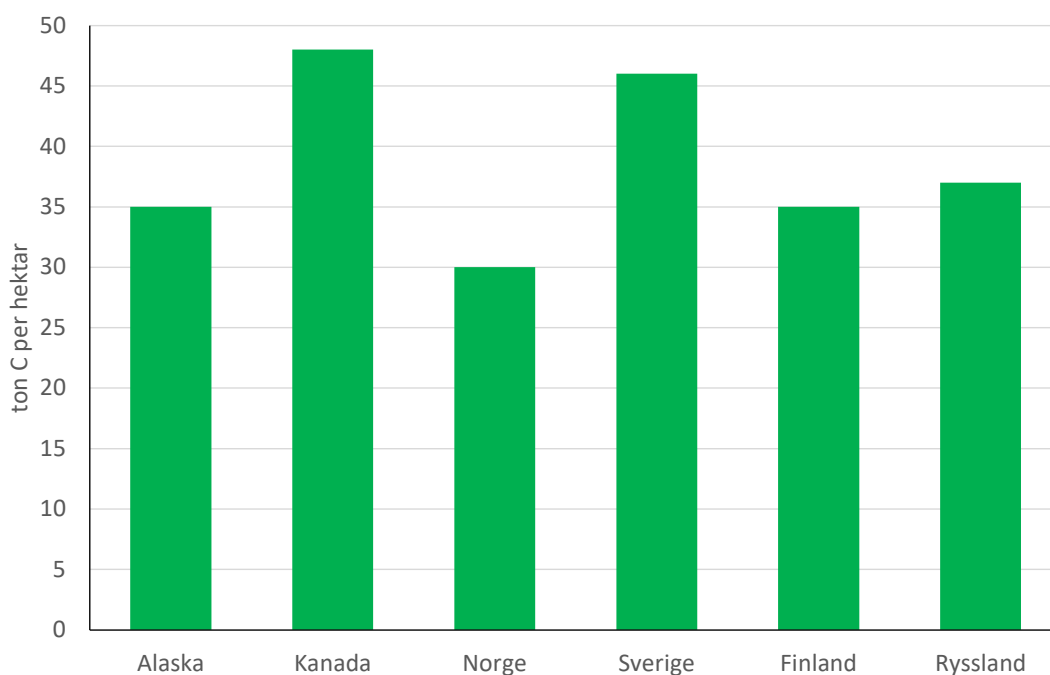


Figur 18. Nettoupptag i biomassa på olika skogsmarkskategorier 2016. Totalt till vänster och per hektar till höger. Från Lundblad m.fl. 2022 baserad på analys från Grundberg m.fl. 2022.

Naturskogens bidrag till kolbindningen ifrågasattes också i en studie av kolbalansen i olika delar av den boreala skogen utförd av ett internationellt forskarteam på uppdrag av organisationen *International Boreal Forest Research Organisation, IBFRA* (Högberg m.fl. 2021). Uppgifterna byggde på inrapporterade data till FN:s klimatkonvention UNFCCC. Kolförrådet och kolbalansen för perioden 1990–2019 jämfördes mellan den boreala delen av Alaska (med obrukade skogar), Kanada och Ryssland (båda med extensivt brukade skogar), samt Sverige, Norge och Finland (alla med intensivt brukade skogar). Här konstaterades att skogen i Alaska är en kolkälla och att Kanadas och Rysslands skogar varken har ökat eller minskat sitt

kolförråd under perioden. I de nordiska länderna har kolförrådet däremot ökat med 35 %, från 1,88 miljarder ton C till 2,35 miljarder ton, samtidigt som 0,88 miljarder ton hade skördats genom avverkning. En huvudslutsats av studien var att brukade (skötta) skogar har en betydligt mer positiv effekt på klimatbalansen än orörd eller extensivt brukad naturskog (som naturligtvis kan bidra med andra värden).

Studien visar också att virkesförrådet inte är högre i den obrukade skogen jämfört med genomsnittet för den mer intensivt brukade skogen i Norden (figur 19). I avsnitt 4.2.2 visas figurer över hur kolförrådet har förändrats över tid i respektive region.



Figur 19. Kolförråd i levande biomassa per hektar i de jämförda länderna år 2015–2017. Från Högberg m.fl. 2021.

En svaghet i Högbergs m.fl. studie var att de bara tittade på den stående skogen (det finns inte tillförlitliga historiska data för andra kolpooler för alla länder). Död ved, markkol och förna ingick inte. De lyfte dock upp siffror som visar att de nordiska skogarna har bundit i genomsnitt 100 kg C/år och hektar i marken, och i Ryssland och Kanada 20–30 kg C/år och hektar. Död ved har minskat i Kanada men ökat i Ryssland. I de nordiska länderna har död ved ökat kraftigt procentu-

ellt, men ligger på mycket låga nivåer jämfört med naturskogen.

En förklaring till skillnaderna är bland annat bränder. I Alaska, Kanada och Ryssland brinner i genomsnitt 0,5–0,6 % av skogen varje år, i de nordiska länderna 0,01 %. Det betyder att motsvarande en halv procent av kolförrådet går upp i rök varje år i de branddrabbade ländernas skogar. Här lyfter författarna också fram att en skog som avverkats återhämtar sig snabbare och får ny skog

än en hårt brunnen skog, där även markvegetation och förna har bränts upp.

Att kolsänkan är högre i brukad skog får också stöd i en global analys baserad på satellitdata (Yang m.fl. 2023). Enligt studien ökade det globala kolförrådet i vegetationen under åren 2010–2019

med 0,5 miljarder ton C per år, varav de boreala skogarna stod för 0,37 miljarder ton. De områden som ökade sitt kolförråd mest kunde knytas till områden som brukades aktivt med skogsbruk, och dessutom fanns de största kolsänkorna i ung och medelålders skog (se avsnitt 4.2.3).

4.6 Markens kol

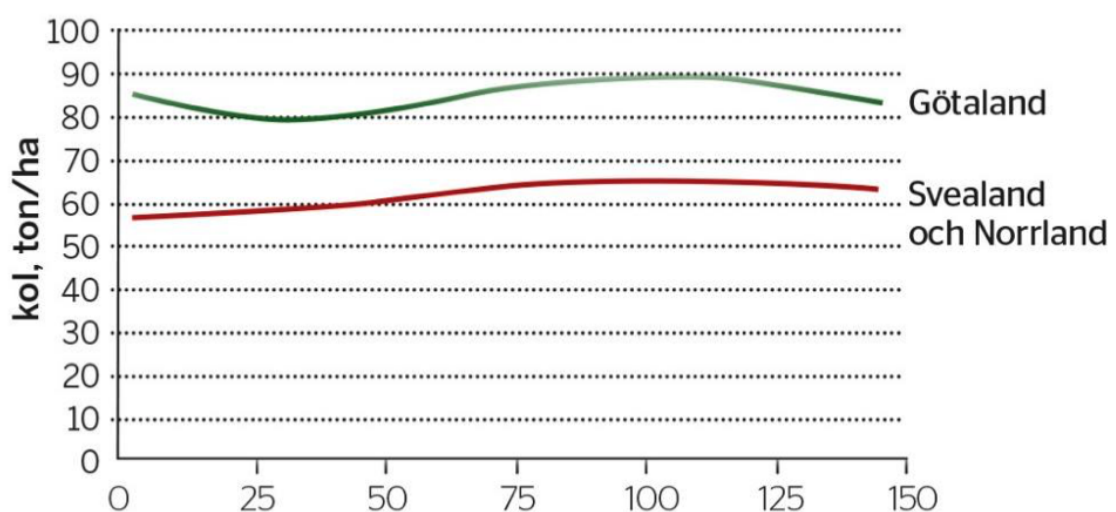
Kolförrådet i den boreala skogsmarken är cirka 75 ton per hektar och i den stående skogen i genomsnitt cirka 50 ton kol per hektar.

Markens kolförråd är stigande i den boreala zonen, och under ett bestånds omloppstid är skillnaderna i markkolsinnehåll litet.

Markberedning bidrar inte till någon förlust av kol. I stället kan markberedningen bidra till en större kolsänka på sikt genom bättre träd tillväxt.

De boreala skogarnas mark har ett stort kolförråd som har byggts upp sedan istiden. I genomsnitt finns ungefär 75 ton C per hektar ner till 1 meters djup vilket är mer än det kol som finns bundet i den stående skogen (genomsnitt för landet är 50 ton C per hektar). Koluppsamlingen i marken har skett långsamt med cirka 7 kg C per hektar och år under en 10 000-årig period. Idag ökar det dock snabbare, med i genomsnitt 100 kg C per hektar och år (ca 150 kg C på mineraljord men på dikade torvmarker minskar det).

Markkolsmängderna är relativt stabila i ett bestånd (figur 20). En viss ökad avgång kan ske när marken rörs om, till exempel vid avverkning och markberedning. Studier visar dock att den ökade respirationen pga. störningar vid avverkning och markberedning kompenseras av ökad tillväxt av den nya skogen. Långsiktigt visar Markinventeringen att markkololet ökar i skogen, vilket också bekräftas av långa försöksserier med markberedning (se 4.6.1).



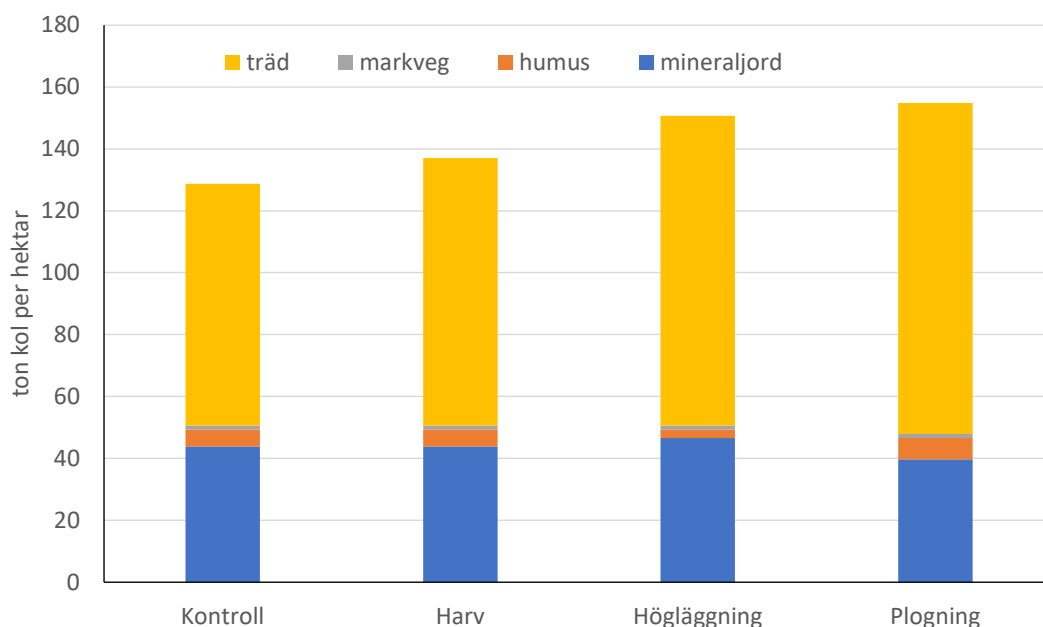
Figur 20. Markkololets variation över beståndsålder. Från Bergh m.fl. 2020, baserad på Markinventeringen 2003-2012.

4.6.1 Minskar markkolet vid avverkning och markberedning?

En vanlig föreställning är att kol i marken och förnan minskar kraftigt efter en avverkning ("kolbomben"). Läckaget av kol är dock ungefär likvärdigt under hela omloppstiden. Skillnaden som gör kolbalansen negativ de första åren efter avverkning beror på att det saknas vegetation som samtidigt binder koldioxid och producerar förna

som så småningom blir till kol i marken.

Omrörningen som sker vid markberedning kan igångsätta nedbrytning och kolavgång. Studier av de faktiska avgångarna visade dock att det inte uppstått någon kolförlust (figur 21). På lång sikt bidrar markberedningen till en högre tillväxt och ett totalt högre kolförråd i skogsekosystemet, och skillnaderna i kolförrådet i mineraljorden är försumbart (Mjöfors m.fl. 2017).

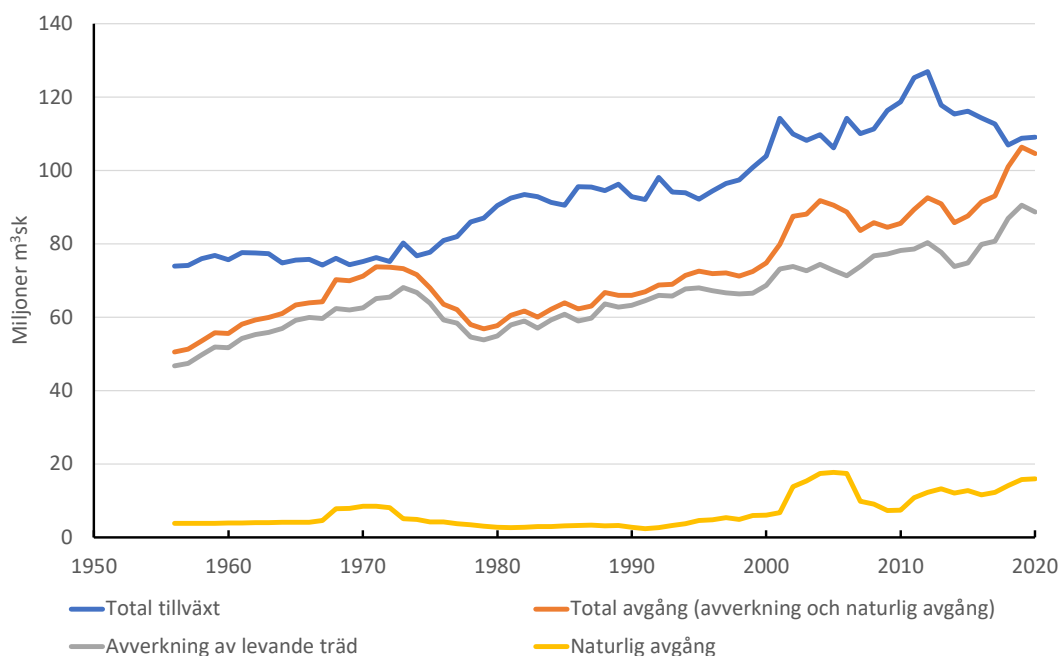


Figur 21. Genomsnittligt kolförråd i mark, humus, markvegetation och träd 25 år efter markberedning. Medelvärden från tre försök i Flåda (Östergötland) och Råtan (Jämtland). Efter Mjöfors m.fl. 2017.

4.7 Har skogens tillväxt slutat att öka?

Virkesförrådet i den svenska skogen har ökat från 1,7 miljarder skogskubikmeter (m^3sk) 1926 till 3,6 miljarder m^3sk 2019. De senaste åren har dock ökningstakten avtagit. Virkesförrådet fortsätter visserligen att öka i hela landet, men tillväxten har avtagit under andra halvan av 2010-talet (figur 22).

Samma trend har observerats i Finland där tallens tillväxt har minskat (däremot inte granens). Orsaken till den finska minskningen bedöms vara miljöfaktorer som temperatur och nederbörd, men också frösättning och skador hos tallarna (Luke 2021).



Figur 22. Årlig total tillväxt, total avgång (avverkning och naturlig avgång), avverkning av levande träd och naturlig avgång. Produktiv skogsmark. Data till och med 2020 från SLU Riksskogstaxeringen.

De senaste årens nedgång har diskuterats och det har bland annat föreslagits att ökade avverkningar har bidragit (Naturvårdsverket 2022). En särskild analys av tillväxtminskningen har gjorts av Riksskogstaxeringen (Fridman m.fl. 2022). Under perioden 2012–2018 minskade volymtillväxten för träd i Sverige med 15 %, och den största minskningen var i Götaland. Riksskogstaxeringen drar dock slutsatsen att avverkning och naturlig avgång bara har påverkat den totala tillväxten (bruttotillväxten) marginellt. Analyser av enskilda träds borkkärnor pekar på att den minskade tillväxten beror på försämrade tillväxtförhållanden,

varav torka är en viktig förklaring. Andra faktorer kan också ha inverkat, som skötselmetoder, skogens ålderssammansättning, trädslag och kvävenedfall. Under den period när tillväxten ökade (2005–2012) rådde både hög temperatur och hög nederbörd under tillväxtsäsongen. Under 2012–2018 var förhållandena i stället ogynnsamma med framför allt låg nederbörd.

Efter inventeringssäsongen 2022 rapporterar dock Riksskogstaxeringen att tillväxttakten har ökat något (SLU 2023), och eventuella slutsatser om den långsiktiga trenden måste vänta tills mer data som täcker in denna period finns tillgängliga.

4.8 Kostnaden för att lagra kol i skogen

Beskogning av jordbruksmark är mest kostnadseffektivt per ton CO₂. Gödsling (200 kr/ton CO₂) är mer kostnadseffektivt än att förlänga omloppstider (320–450 kr/ton CO₂) och att skydda skog.

EU har som mål att nettoutsläppen av växthusgaser ska vara noll år 2050 och år 2030 ska de ha minskat med minst 55 procent jämfört med 1990. För Sverige är målet att bli koldioxidneutralt 2045. Alla bruttoutsläpp kan inte bli noll, exempelvis kommer utsläpp från jordbruk och djurhållning att kvarstå och viss basindustri kan få svårt att helt reducera utsläppen. För att nå nettonollutsläpp behövs därför kompletterande åtgärder som bidrar till att minska koldioxiden i atmosfären. Exempel är ökad kollagring i skog och mark och avskiljning genom lagring av biogen koldioxid (bio-CCS).

En studie vid Sveriges lantbruksuniversitet (Gong m.fl. 2022) beräknade kostnaderna för olika åtgärder som kan öka kolsänkan i skogen på kort och lång sikt. De konstaterade att förstärkta kolsänkor kan vara en kostnadseffektiv klimatåtgärd men att den aldrig kan ersätta minskningar av

fossila utsläpp. Mest kostnadseffektivt är beskogning av nedlagd jordbruksmark. Kostnaden för kolsänkor är med denna åtgärd under 100 kronor per ton CO₂e. För kvävegödsling av skogsmark, energiskogsodling och permanent skydd av skog är kostnaden 200 kr per ton CO₂e. Störst kostnad har förlängning av omloppstiden med 5–20 år (320–450 kr per ton).

I den statliga utredningen Vägen till en klimatsäker framtid (SOU 2020) gjordes också beräkningar av de samhällsekonomiska kostnaderna. De flesta åtgärderna (återväxtning av skog, energiskog, skydd av skog och bio-CCS) beräknas uppgå som högst till drygt 1 krona per kg CO₂e (1000 kr per ton). För åtgärden förlängda omloppstider är kostnaderna något högre, och beroende av hur efterfrågan på skogsråvara ser ut.

5. Biobränsle

Bioenergi är den största förnybara energikällan i Sverige sett till slutlig energianvändning. Av den tillförda energin i landet står bioenergi för mer än olja, kol och gas tillsammans.

Kolskuld är ett begrepp för den skuld som uppstår när ett kolförråd i skogen avverkas för att bli bioenergi eller andra produkter. Skulden återbetalas när den nya skogens kolinbindning har kompenenserat för hela skulden. En del forskare menar att det inte existerar någon kolskuld eftersom virkesförrådet i skogarna ökar med tiden.

Debatten om biobränsle handlar i första hand om att mark ställs om för bioenergiproduktion. Restprodukter från ordinarie skogsbruk betraktas som ett mindre problem ur klimatsynpunkt.

Grenar, toppar och stubbar som lämnas i skogen kommer att brytas ner och bli koldioxid om de lämnas. Halveringstiden för grot är 5–10 år och för stubbar cirka 15 år. Eldas de upp avgår koldioxiden tidigare.

Användningen av biobränsle för uppvärmning och elproduktion har varit en av de hetaste frågorna bland forskare och miljöpolitiker. Här möts flera frågor: Förbränning av biobränsle betyder att koldioxid släpps ut direkt medan vedrester som lämnas i skogen släpper ut den mer långsamt. Biobränsle kan ersätta fossilbaserad energi som därmed inte ger ett tillskott av ”ny”, fossil, koldioxid till biosfären. Uttag av grenar och toppar (grot) i skogen innebär bortförsel av näringsämnen, substrat för biologisk mångfald och den rismatta som kan skydda marken vid terrängkörning. Å andra sidan medför grot-uttag att skogsvården underlättas och framkomligheten ökar för friluftslivet.

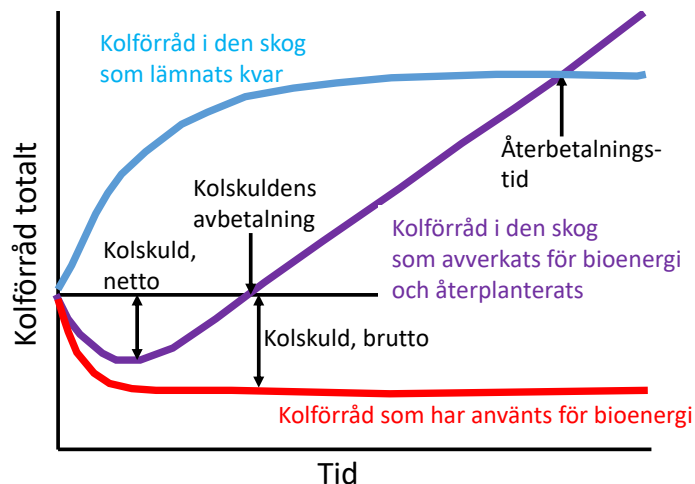
Det går inte att komma ifrån att Sveriges övergång till biobränsle på 1970-talet och framåt starkt bidrog till det minskade behovet av olja och kol, inte minst i fjärrvärmeverken. År 1980 stod olja för 90 % av all energikonsumtion för uppvärmning och kyla, idag dominerar förnybara bränslen helt (Westholm & Beland Lindahl 2015). Sverige hade den högsta andelen förnybar energi i EU år 2020, 60 % jämfört med EU-snittet 22 %, och bioenergi är idag den största förnybara energikällan i Sverige sett till slutlig energianvändning. Av den tillförda energin år 2020 stod biobränslen för 141 TWh, vilket är mer än den olja, gas och kol tillsammans som används i Sverige (136 TWh). Tillförseln av biobränslen har tredubblats under de senaste 40 åren och under samma period har

tillförsel av råolja och oljeprodukter mer än halverats (Energimyndigheten 2022).

En av diskussionerna om biobränslen rör dess särställning i klimatbokföringen. Bioenergi räknas inte som en belastning i energisektorn utan tas i stället upp som en ”kostnad” i markanvändningssektorn, direkt i samband med avverkning i det land där avverkningen sker. Det gör till exempel att importerade pellets från Nordamerika räknas som klimatneutrala när de används inom EU men att den negativa effekten av utsläppet belastar Nordamerikas utsläppsbudget i LULUCF.

5.1 ”Kolskulden”

Men är då biobränslen klimatneutrala eller inte? De som hävdar att de inte är det pekar på ”kolskulden”, den tid det tar innan en skördad skog växer upp och binder lika mycket koldioxid som släpptes ut. Kolskulden fick stort genomslag i diskussionen om hur regnskog, torvmarker och savanner omfördes till biobränsleproduktion. Ett exempel är när regnskog avverkas för att odla oljepalmer. Återbetalningstiden för kolskulden beräknades i en grundläggande artikel till 86 år (Fargione m.fl. 2008). Artiklar som ofta lyfts fram är Holtsmark (2010) samt Mitchell m.fl. (2012) som också illustrerar fenomenet kolskuld (*carbon debt*) och återbetalningstid (*carbon parity*) grafiskt (figur 23).



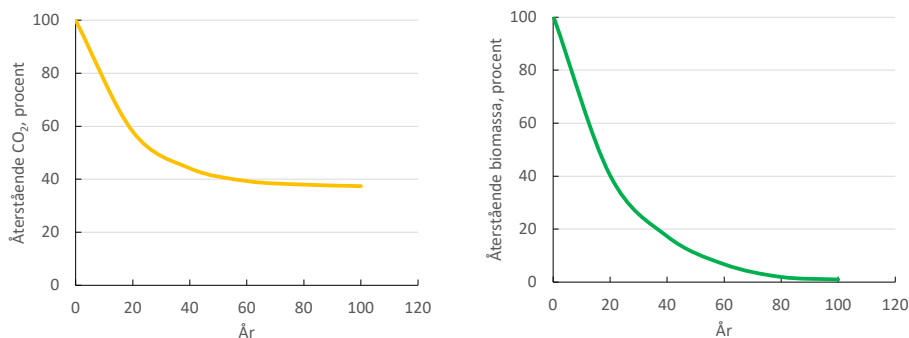
Figur 23. Kurvorna utgår från att en skog avverkas och enbart används som biobränsle. Från Mitchell (2012).

Har vi då en kolskuld? Det skulle innebära att de senaste decenniernas förbränning av bioenergi skulle ha bidragit till minskat kolförråd i skog och mark, och det har många forskare motbevisat, till exempel Holmgren (2022) och på europeisk nivå Nabuurs m.fl. (2017).

Debatten om kolskulden handlar framför allt om när grödor odlas enbart för att bli biobränsle. I det svenska systemet är biobränsle i stället en restprodukt när stammar har skördats för att bli timmer och massaved. Sågspån och lutar från massaindustrin används för skogsindustrins egen kraftproduktion medan grenar och toppar till stor del blir el och värme för hushållen. I den omtalade artikeln av Fargione skrivs till exempel att restprodukter från biomassa knappast innebär någon kolskuld.

5.2 Grenar och toppar

Avverkningsrester (grenar och toppar, grot) som lämnas kvar i skogen kommer att brytas ner och avge koldioxid även om de inte samlas in. Beroende på grovlek är halveringstiden (den tid när halva kolmängden avgått som koldioxid) 5–10 år. När de samlas in och eldas avgår förstås koldioxiden snabbare och det kan betraktas som en temporär kolskuld. Nedbrytningshastigheten för granstubbar är längre, efter 15 år finns hälften av kolet kvar när de lämnas i skogen (Melin m.fl. 2009) (figur 24). Idag är dock stubbskörd mycket ovanligt i svenskt skogsbruk.



Figur 24. Diagrammet till vänster illustrerar hur mycket av ett pulsutsläpp av koldioxid, till exempel i samband med förbränning av ett fossilt bränsle eller biomassa i ett kraftvärmeverk, som finns kvar i atmosfären över 100 år. Källa: IPCC (2007). Till höger visas nedbrytningsförloppet hos granstubbar som lämnas på ett hygge över 100 år. Källa: Melin m.fl. (2009), från Skogsskötselserien.

6. Dikade torvmarker släpper ut växthusgaser

Dikade produktiva torvmarker i Sverige beräknas släppa ut växthusgaser motsvarande 7 ton CO₂e per hektar och år.

Återvätning av torvmarker kan minska koldioxidavgången, men samtidigt kan utsläppen av metan öka.

Störst positiv effekt av återvätning fås troligen på näringsrika torvmarker i södra Sverige. På näringsfattiga torvmarker i norra Sverige är åtgärden tveksam.

På skogbevuxna dikade torvmarker betyder återvätning att skogstillväxten och kolsänkan i träden minskar, samtidigt som avgången från marken också minskar. Det kan ta lång tid innan återvätningen ger positiv effekt.

Den totala arealen produktiv skogsmark på torvmark är drygt 2 miljoner hektar, varav 0,8 miljoner beräknas vara dikad. Dessutom finns cirka 1,5 miljoner hektar fastmark som är påverkad av diken, och av dessa har cirka 0,5 miljoner hektar torvartad mår (Drott & Eriksson 2021). Torvmarkerna är rika på kol som släpps ut som koldioxid när de bryts ner efter dikning, men torvmarker kan också bidra med utsläpp av lustgas och metan när grundvattenståndet är högt.

De samlade utsläppen från dikad produktiv torvmark i Sverige uppgår enligt Sveriges klimatrapportering till motsvarande 7 ton CO₂e per hektar och år, varav 5,7 ton är koldioxid och 1,3 ton är metan och lustgas (Lundblad m.fl. 2022). IPCC anger en så kallad emissionsfaktor i tempererad zon på 9,5 ton CO₂ per hektar och år från dikad torvmark, och i boreal zon 3,4 ton på näringsrik mark och 0,9 ton per hektar på näringsfattig mark. Lustgasavgången uppskattas vara 0,2 ton CO₂e per hektar och år på närings-

fattig mark, 3,0 ton CO₂e per hektar och år på näringsrik mark i boreal zon och 5,0 ton CO₂e per hektar och år i tempererad zon. Avgången av metan uppskattas till 0,27 ton CO₂e per hektar och år i tempererad zon, och i boreal zon 0,25 ton på näringsrik mark och 0,42 ton på näringsfattig mark (Drott & Eriksson 2021).

Samtidigt binder träden och markvegetationen kol som kompenserar en del av utsläppen, och ibland hela. Tillväxtökningen efter dikning bedöms på mellanboniteter vara cirka 2–3,5 m³sk per hektar och år enligt dikningsboniterings-schemat (Hånell 2008). Riksskogstaxeringens data över dikad och odikad mark visar dock på lägre skillnader, då de inrymmer marker där dikningen kanske inte har varit helt effektiv eller varit utförd på marker som inte är optimala för dikning. Den dikade torvmarken har enligt Riksskogstaxeringen någon kubikmeter större tillväxt per hektar och år än den odikade.

Metan och lustgas

Metan och lustgas är två gaser som vid sidan av koldioxid kan bidra till att öka växthuseffekten. Efter avverkning på fastmark kan lustgas och metan bidra med cirka 10 % av växthusgasutsläppen på grund av det höjda grundvattenståndet. Det gör att de inte kan negligeras (Vestin m.fl. 2020). På våtmarker har lustgas och metan ännu större betydelse.

Metan (CH_4) är en kolförening som tas upp från atmosfären och konsumeras av bakterier under syrerika förhållanden. Vid sidan av metanoxidation i troposfären är marken den näst viktigaste sänkan för metan. Om marken däremot blir syrefattig kan nybildning av metan ske genom anaeroba bakterier. Detta inträffar på vattenmättade marker och i mikromiljöer i skogen.

Efter en kalavverkning stiger normalt grundvattennivån och risken för metanavgång ökar så att skogsmarken övergår från metansänka till metankälla. Metan är mer kortlivad i atmosfären än CO_2 , men den är betydligt mer klimatpåverkande. Vid omräkning till koldioxidekvivalenter räknas metan som 28 gånger mer klimatdrivande i ett 100-årigt perspektiv (EPA u.å.).

Lustgas, dikväveoxid (N_2O), produceras också i marken av mikroorganismer, framför allt i syrefattig miljö genom reduktion av nitrat. I syrerik miljö omvandlas mycket av lustgasen till kvävgas genom denitrifierande bakterier. Skogsmarken kan vara både en källa och sänka för lustgas. Liksom metan är lustgas en mycket aggressiv växthusgas, 265 ggr mer klimatdrivande än koldioxid (EPA u.å.).

6.1 Återvätning – en klimatpositiv åtgärd?

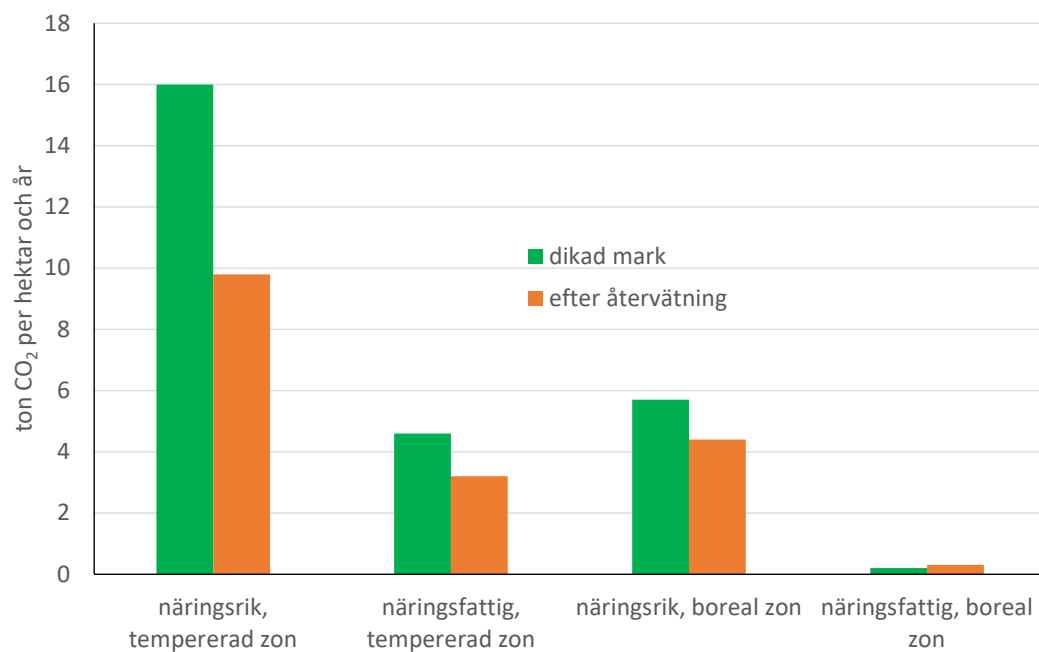
Återvätning har föreslagits som en effektiv klimatåtgärd i och med att ett högre grundvattenstånd bromsar nedbrytningen av torven och därmed koldioxidavgången. Däremot kan återvätning leda till högre avgång av metan, åtminstone under en period. Åtgärderna måste därför göras där de gör störst nytta. Även om metanutsläppen är låga jämfört med koldioxidavgången kan de orsaka klimatskador genom att metan har större klimatpåverkan än koldioxid.

Ett högt grundvatten innebär också en lägre skogstillväxt. Ur klimatsynpunkt är därför igenläggning av diken en balansgång mellan minskad nedbrytning och minskad skogstillväxt (och därmed kolsänka).

Naturvårdsverket och Skogsstyrelsen bedömer att återvätning av torv- och våtmarker är en effektiv klimatåtgärd (Drott & Eriksson 2021). Skogsstyrelsen bedömer att återvätning av 100 000 hektar fram till 2050 skulle minska nettoutsläppen av växthusgasar med 1–9 ton CO_2e per hektar

och år. Störst effekt har återvätning av näringsrik, väl-dränerad torvmark i södra Sverige (figur 25). På näringsfattig dikad torvmark i norra Sverige bedöms dock klimateffekten vara låg.

Forskare har dock poängterat att det råder stor brist på experiment som ger svar på vilka faktiska effekter återvätningen får, både för växthusgasbalansen och för vattenkvalitet. Ett försöksområde i Västerbotten (Trollberget) är det första i Sverige där det finns publicerade resultat från systematiska mätningar av växthusbalansen före och efter åtgärd, och mellan åtgärdade områden och kontrollområden (Laudon m.fl. 2023). Mätdata finns ännu bara för de första åren, men de tyder på att återvätningen initialt bidrar till både ökad koldioxid- och metanavgång. Försöksområdet representerar torvmark med låg bördighet i den boreala zonen, och det är möjligt att resultaten blir annorlunda på en bördigare mark. Det är också möjligt att växthusgasbalansen kommer att förändras över tid, och att återvätningen då kan visa sig positiv.



Figur 25. Markens växthusgasbudget (förändrat kolförråd + transport av lösliga kolföreningar + avgång av lustgas + avgång av metan) för dikad och återvätt torvmark på produktiv skogsmark. Medelvärden från beräkning i Drott & Eriksson 2021.

7. Substitution – ersättningsfaktorer

Substitution handlar om undvika utsläpp. Om produkter av trä ersätter (substituerar) fossila produkter eller cement betyder det att mindre fossil koldioxid tillförs atmosfären.

Hur substitutionen ska räknas är omdiskuterat, och vilka nivåer som används beror på vilka antaganden som gjorts och vilka förväntningar som finns för framtidens konsumtion. Spannet i olika studier är stort, men ett riktvärde kan vara att för varje kilo kol som finns i träråvaran undviks ungefär 1 kilo fossilt kol att släppas ut till atmosfären. En fastkubikmeter ved innehåller kol motsvarande cirka 700 kilo koldioxid.

En viktig del i klimatnyttan ligger i de så kallade substitutionseffekterna, det vill säga att fossila råvaror byts ut (substitueras) mot trä och andra produkter baserade på biomassa. Om skogen lämnas för fri utveckling eller om avverknings-temperatur sänks, ökar visserligen kollaget i skogen jämfört med om skogen avverkas, men samtidigt måste skogsråvaran ersättas med mer klimatpåverkande material som betong och stål för husbyggnad och fossila bränslen för energi.

Utformningen av bioenergisystemen och vilka fossila system som ersätts får då stor betydelse. Analyser vid Linnéuniversitetet visar att om biomassa ersätter el- och värmeproduktion i koleldade anläggningar blir klimatnyttan särskilt stor (Gustavsson m.fl. 2015a). För transportsektorn ökar klimatnyttan om man använder skogsråvara för elproduktion som kan användas till elbilar, jämfört med om man producerar biodrivmedel direkt. Det beror på de höga omvandlingsförlusterna i framställningen av drivmedel.

Andra studier pekar på stora klimatfördelar med att bygga hus med trästomme i stället för med betongstomme. Det beror på att utsläppen av koldioxid från fossila bränslen och cementtillverkning är betydligt större vid produktion av ett betonghus än ett likvärdigt hus med trästomme. Beaktas dessa faktorer tillsammans kan ett hus med trästomme minska utsläppen med mer än 400 kilo koldioxid per kvadratmeter jämfört med hus byggda i betong (Gustavsson m.fl. 2015b).

För en lägenhet på 90 kvadratmeter motsvarar det ungefär 3000 mils bilkörning.

För att det ska uppstå en substitutionseffekt krävs att det finns något klimatskadligt som kan ersättas. Att bygga en träaltan som annars inte skulle ha byggts är inte substitution, däremot om huset byggs med trästomme i stället för cement eller stål. En typisk substitutionseffekt är när våra värmeverk och kraftvärmeverk i stor skala på 1970-talet och framåt byggdes om från kol och olja till biobränsle. Om energialternativet till biobränsle däremot är vind och solkraft blir substitutionseffekten lägre eller kanske till och med utebliven. Om de flesta bilar är eldrivna uppstår ingen omedelbar substitutionseffekt av biodiesel, förutsatt att elektriciteten har framställts med förnybara processer. Kortlivade produkter som hygienartiklar, papper och kartong kan också ha substitutionseffekter om det finns fossila alternativ (exv. plastprodukter för förpackningar). Toalettpapper är nog svårt att hitta alternativ till så där kan vi inte räkna med substitution. Men klarar vi oss utan produkten?

En annan faktor som skulle kunna påverka substitutionseffekten är om utbudet av träprodukter ökar och resulterar i lägre råvarupriser. Det kan i sin tur leda till ökad efterfrågan och i sin tur till större utsläpp.

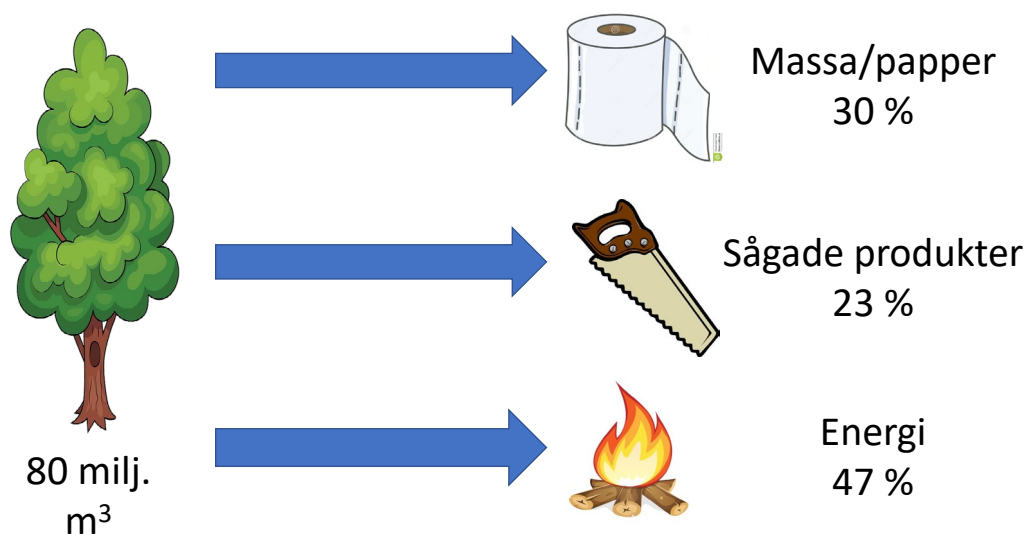
Substitutionsberäkningar är omgärdade av många antaganden, och därför finns ett stort spann mellan olika studier. En finsk sammanställning av 51 publicerade studier fann en spännvidd på -0,7

till 5,1 kg kol som kunde undvikas att släppas ut för varje kilo kol som ingick i träråvaran. I genomsnitt var substitutionseffekten 1,2 kilo C/kilo C (Leskinen m.fl. 2019). Sathre och O'Connor (2010) rapporterade ett spann på 1,0–3,0 kg undviken fossil kol per kilo kol i trä med ett genomsnitt på 2,1 kg. En lägre siffra redovisas i Hurmekoski m.fl. (2021) som systematiskt gick igenom 44 studier om substitutionseffekter. I genomsnitt kunde 0,55 kilo kol undvikas per fossil kilo kol i den avverkade träråvaran. De studier som var jämförbara visade på ett spann på 0,27–1,16 kilo C/kilo C.

I en studie av den svenska träråvarans användning som inkluderade både inhemsk och utländsk (export) användning landade Lundmark m.fl.

(2014) i en substitutionsfaktor på cirka 500 kg CO₂ per avverkad kubikmeter, vilket motsvarar ungefär 0,7 kg C i undvikna utsläpp per kg C i träråvaran.

Vid substitutionsberäkningar tas hänsyn till olika skogsprodukters livslängd och deras kaskad användning. Papper återanvänds flera gånger och träprodukter blir så småningom biobränsle som kan ersätta fossila bränslen. Livslängderna varierar något, men det finns en standard som används inom klimatrapporeringen baserad på IPCC:s metoder, där halveringstiden är 35 år för (sågade trävaror), 25 år (träskivor) och 2 år (papper). Figur 26 visar en förenklad bild av den svenska skogssektorns råvaruflöden.



Figur 26. Användningen av svensk skogsråvara 2019. Energifunktionen är stor och innefattar här både direkt energiproduktion för fjärrvärme och biobränsle samt förluster i produktionsprocessen. En stor del av "förlusten" utgörs av avlutar från pappers- och massaproduktion vilket nyttiggörs som energi i skogsindustrin. Förenklad med data från Skytt m.fl. 2021.

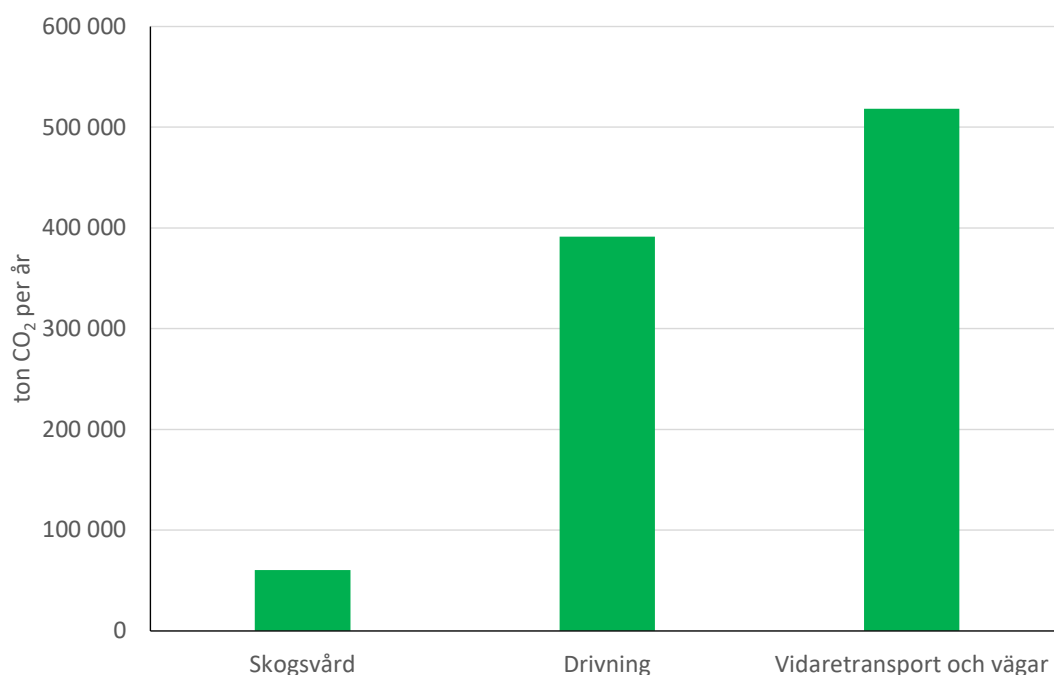
8. Skogsbrukets egna utsläpp

Avverkning, markberedning och transport av virket baseras fortfarande till stor del på fossil-drivna motorer vilket innebär att skogsbrukets eget arbete bidrar till utsläpp.

Björheden (2019) beräknade de totala utsläppen för skogsvård, terrängtransport, virkesbilar och väghållning till knappt 1 miljon ton CO₂/år (figur 27). Den pågående effektiviseringen har minskat

energianvändningen i drivning (skörd och skotning) från 5,4 liter bränsle per m³fub på 1980-talet till 3,7 liter per m³fub år 2005. Arbete pågår också med intelligenta styrsystem, vägval i terrängen och eldrift.

En stor faktor är vidaretransporten med virkesbilar som står för 46 % av bränsleförbrukningen per kubikmeter (cirka 4,7 liter per m³fub).



Figur 27. Total bränsleförbrukning i svenskt skogsbruk 2014. Skogsvård innebär plantering, plantproduktion, markberedning, röjning och gödsling. Drivning är avverkning, skotning av rundvirke och skogsbränsle samt flisning. Vidaretransport är biltransport av rundvirke (som står för den största delen), skogsbränsle samt väghållning. Från Björheden 2019.

9. Läckageeffekter - minskad avverkning här kan öka avverkningen där

En klimatpolitisk åtgärd som leder till minskad avverkning på en plats kan leda till ökad avverkning på en annan. Effekten kallas läckage, och betyder i praktiken att klimatförbättrande åtgärder på en plats kan leda till ökade utsläpp på en annan. Läckage uppstår till exempel om skogsindustrin kompenserar ett lokalt avverkningsstopp med ökad import. Då flyttas klimatpåverkan från ett land till ett annat. Läckage kan också uppstå inom ett land, till exempel om en minskad avverkning i Norrbotten resulterar i ökad avverkning i Västerbotten för att kompensera för virkesbortfallet till de regionala industrierna.

Läckage kan också uppstå om ekonomiska styrmedel (till exempel nationellt satta koldioxidskatter) leder till att industri flyttar till länder med andra regelverk. Om råvaran blir begränsad kan en industri också flytta till ett annat land med bättre tillgång till råvara. Detta är också läckage.

I en kunskapssammanställning visades på en stor spridning av läckageeffekterna (Lundmark 2022). De totalt 34 läckageuppskattningar som är baserade på minskad avverkning har ett genomsnittligt läckage på 52 %. Mest intressant för Sverige är de nordiska analyserna. En minskad avverkning i Norge (10, 30 eller 50 %) leder till läckage på 60–100 %, vilket betyder att varje kubikmeter som inte avverkas i Norge innebär att 0,6–1 kubik-

meter avverkas i andra länder (Kallio och Solberg 2018). En minskad avverkning på 4,5 % i EU, Storbritannien och Norge gav ett läckage på 64 % fram till 2030 (Päivinen m.fl. 2022). En uppskattning för skogssektorn i EU plus Norge gav ett läckage på 79 % fram till 2030 om avverkningen minskar med cirka 20 % (Kallio m.fl. 2018).

I Lundmark (2022) gjordes en beräkning av läckageeffekterna vid minskad svensk avverkning på 5, 10 respektive 20 %. Läckaget bedömdes vara 24–27 % för sågtimmer, 44–53 % för massaved och mellan 26 och 72 % för brännved (Lundmark 2022). Ju lägre avverkningsminskning, desto större var det procentuella läckaget, vilket beror på att det är lättare att kompensera en mindre minskning med ökad avverkning i andra länder.

Läckage innebär därför att klimatpolitiska åtgärder blir mindre effektiva. Läckaget är dock mindre om handel sker mellan länder med liknande klimatpolitik, till exempel inom EU. För svenskt vidkommande, med läckageeffekter på cirka 26 % för sågtimmer och 50 % för massaved, betyder varje kubikmeter i minskad avverkning i Sverige att avverkningen ökar med 0,26 kubikmeter respektive 0,5 kubikmeter i andra länder. De resterande volymerna (skillnaden mellan den minskade avverkningen i Sverige och den ökade avverkningen i andra länder) innebär en minskad efterfrågan.

10. Diskussion och slutsatser

Sverige är det största skogslandet inom EU med 17,5 % av unionens skogsareal och 13 % av virkesförrådet (Eurostat 2023). Det är naturligt att den svenska skogen, tillsammans med de nordiska grannländernas, betraktas som en resurs i klimatomställningen inom EU. Enligt åtgärds paketet *Fit-for-55* ska utsläppen i EU minska med minst 55 % till 2030. Markanvändningssektorn, den så kallade *LULUCF*, ska bidra med en väsentlig del genom att kolsänkan ska öka från 225 miljoner ton CO₂e till 310 miljoner år 2030. För Sverige är målet att kolsänkan ska öka med 4 miljoner ton till 2030 jämfört med medelvärdet för perioden 2016–2018, som var cirka 40 miljoner ton CO₂e (Regeringen 2022).

Skogens nettoupptag i mark och biomassa uppgick år 2022 till 39 miljoner ton koldioxidekvivalenter. Tillsammans med träprodukter, betesmarker med mera, uppgick nettoupptaget i *LULUCF*-sektorn till totalt 41 miljoner ton CO₂e (Sveriges territoriella utsläpp var 45 miljoner ton år 2022) (Naturvårdsverket u.å.). Det är cirka 3,6 miljoner ton mindre än medelvärdet för åren 2016–2018. Målet att kolsänkan ska öka med 4 miljoner ton vilket innebär att Sverige just nu är 7,6 miljoner ton från målet. Det verkar därför i dagsläget svårt att nå.

Frågan är då om Sverige kan lyckas med sitt åtagande att öka upptaget. Kan forskningen ge svar? De studier som refereras i kapitel 4 och framåt har sällan haft som specifikt syfte att utvärdera de politiskt satta målen. De tidsramar det handlar om i klimatpolitiken är ofta för korta för att förändrade skogsbrukssätt ska hinna ge utslag.

10.1 Skillnad i systemgränser

Det är också tidsramarna som ger så olika resultat i studierna. På kort sikt (ett par decennier) kan det vara mest effektivt att minska avverkningen, även när substitutionen vägs in. Men på längre sikt, fram mot nästa sekelskifte, pekar de flesta studier på att en brukad skog med hög tillväxt ger den största klimatnyttan.

Vid sidan av det tidsmässiga systemperspektivet

skiljer sig studierna åt i sin rumsliga avgränsning. Ett enskilt träd som avverkas slutar ju definitivt att binda kol, men de som står kvar har ju möjlighet att kompensera för bortfallet. Men ska bara en trädgrupp, ett bestånd eller flera bestånd i ett landskap räknas in? Vid en gallring eller selektiv avverkning kompenseras bortfallet av närmaste trädgrannar, som kan börja växa snabbare. Vid en slutavverkning finns inga omedelbara grannar som ökar sin tillväxt, utan där är det landskapets totala kolsänka som får avgöra klimatnyttan. Om trakthyggesbruk med slutavverkning och plantering bidrar till en ökad tillväxt i hela landskapet, är också klimatnyttan positiv. Frågan om slutavverkningens betydelse som ”kolbomb” kan då avfärdas, särskilt som forskning visar att markens naturliga kolläckage är ungefär lika stort i en sluten skog som på ett kalhygge. Skillnaden är om det finns träd som också tar upp koldioxid från atmosfären. En ytterligare systemavgränsning är vilka sektorer som ska räknas in. I EU-politiken hanteras skogens klimatnytta genom *LULUCF*-sektorn, som inkluderar kolförrädsförändringar i vegetation och mark för skogsmark, åkermark, betesmark, bebyggd mark, våtmark och övrig mark, och dessutom i avverkade träprodukter. Med *LULUCF* utelämnas klimatnyttan av att skogens produkter kan ersätta fossila produkter – substitutionseffekten.

10.2 Utmaning för politiken

Forskningsresultat är viktiga som beslutsunderlag, men som vi visat i sammanställningen finns inga entydiga svar. Här har politiken en utmaning att väga olika tidsperspektiv och intressen mot varandra. Ett forskningsresultat som visar att kraftigt neddragen avverkning ökar kolsänkan på kort sikt, kan ju samtidigt innebära att utbudet av sågade trävaror, pappersmassa och skogsenergi minskar kraftigt. Bortfallet kan kompenseras genom neddragen konsumtion och nedlagda industrier, men också genom ökad import av skogsråvara och en eventuell ökning av fossil koldioxid i atmosfären. Detta är beslut och konsekvenser som ligger bortom forskningens horisont.

10.3 Osäkert hur klimatet påverkar skogen på sikt

Simuleringar av skogens kolsänka på lång sikt bygger på stora osäkerheter. Längre tillväxtsång, högre temperaturer och högre koldioxidhalt kan bidra till ökad tillväxt, en ökning som kan förstärkas av alltmer högförädlad skogsodlingsmaterial. Men, som vi nämnt tidigare, kan skadegörare, stormar, bränder och torka bidra till att tillväxtökningen avstannar, och kanske till och med går ner. Scenarier av framtida tillväxt har visat på stora skillnader beroende på om de utgår från år med låg eller hög tillväxt inom den naturliga variationen. Här finns en stor osäkerhet som har gjort att prognoser har behövt revideras över tiden.

Vid sidan av arbetet med att öka skogens kolupptag (*mitigation*) är det lika viktigt att arbeta med anpassning (*adaptation*). Här kan det handla om skadeförebyggande arbete, riskspridning med fler trädslag, alternativa bruksmetoder på marker med risk för erosion, återställda våtmarker etc. (Skogsstyrelsen 2019). Lika viktigt är också att arbetet med ökat kolupptag och klimatanpassning inte motverkar den biologiska mångfalden och andra ekosystemtjänster.

10.4 Vi har den skog vi har

Skogen är ett långsamt system som inte kan förändras över en natt. Den svenska brukade skogen har formats av över 100 års skötsel. Sedan Riksskogstaxeringen startade sina inventeringar kan vi konstatera att virkesförrådet har mer än fördubblats, och den årliga tillväxten har sedan 1950-talet ökat från cirka 76 miljoner kubikmeter till 113 miljoner kubikmeter (Skogsdata 2023).

Ökningen kan till stor del tillskrivas ett aktivt brukande, som i Sveriges fall främst har byggt på trakthyggesbruk. En förstagallrad skog kommer att fortsätta att växa snabbt under kanske 50 år till, innan den är mogen att avverka och ersätta med något nytt trädslag eller skötselsystem. Om skogen ska ställas om under sin pågående omloppstid, kan det kosta tillväxt och kolsänka.

En omställning till mer hyggesfria metoder kan förstås på sikt ge ett skogslandskap i balans, med fortsatt hög tillväxt. Omställningsfasen innebär dock minskad tillväxt och dessutom får den effekter på utbudet av skogsenergi och massaved. Det får konsekvenser för andra omställningsprocesser såsom en ökad bioekonomi och minskad fossil

användning. På sikt kan förstås industri och energisektorn ställa om, men det är en politisk fråga i vilken takt som samhället vill att omställningen ska göras.

Referenser

- Appelqvist, C., Mogren, E. (red.) 2023. Förutsättningar för hyggesfritt skogsbruk och definition av naturnära skogsbruk i Sverige. Regeringsuppdrag. Skogsstyrelsen, Rapport 2023–16.
- Bergh, J., Egnell, G., Lundmark, T. 2020. Skogsskötselserien kapitel 21, Skogens kolbalans och klimatet. Skogsstyrelsen, oktober 2020. 74 s.
- Björheden, R. 2019. Det svenska skogsbrukets klimatpåverkan. Upptag och utsläpp av växthusgasen koldioxid. Skogforsk. 21 s.
- Blasko, R., Forsmark, B., Gundale, M.J., Lim, H., Lundmark, T., Nordin, A. 2022. The carbon sequestration response of aboveground biomass and soils to nutrient enrichment in boreal forests depends on baseline site productivity. *Science of the Total Environment* 838, 156327.
- Börjesson, P. 2021. Länsvis tillgång på skogsbiomassa för svensk biodrivmedels- och bioflygbränsleproduktion. TFEM nr 122. Miljö- och energisystem, LTH, Lunds universitet.
- Drott, A., Eriksson, H. 2021. Klimatpåverkan från dikad torvtäckt skogsmark – effekter av dikesunderhåll och återvätnings. Kunskapssammanställning och analys. Rapport 2021/7. Skogsstyrelsen. 71 s.
- Drössler, L., Nilsson, U., Lundqvist, L. 2014. Simulated transformation of even-aged Norway spruce stands to multi-layered forests: an experiment to explore the potential of tree size differentiation. *Forestry* 87, 239–248.
- Ekhölm, A., Lundqvist, L., Axelsson, E.P., Egnell, G., Hjältén, J., Lundmark, T., Sjögren, J. 2023. Long-term yield and biodiversity in stands managed with the selection system and the rotation forestry system: A qualitative review. *Forest Ecology and Management* 537, 120920.
- Elfving, B. 2006. Produktion vid byte från trakthygge till blädning. I: Karlsson B. (ed.). Trakthyggesbruk och kontinuitetsskogsbruk med gran, en jämförande studie. Redogörelse nr 5, Skogforsk, Uppsala.
- Energimyndigheten, 2022. Energiläget 2022.
- EPA, u.å. United States Environmental Protection Agency. Overview of greenhouse gases. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- Eriksson, H. 2007. Svenskt skogsbruk möter klimatförändringar. Rapport 8: 2007. Skogsstyrelsen. 49 s.
- Eurostat, 2023. Forests, forestry and logging. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Forests,_forestry_and_logging#Forests_in_the_EU
- Fargione, J., Hill, J., Polasky, S., Hawthorne, P. 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319, 1235–1238.
- Fridman, J., Westerlund, B., Mensah, A.A. 2022. Volymtillväxten för träd i Sverige under 00-talet. Ett faktaunderlag med anledning av den minskande nettotillväxten. Sveriges lantbruksuniversitet, Inst. för skoglig resurshushållning, Arbetsrapport 540.
- Gong, P., Knutsson, A., Eloffson, K. 2022. Styrmedel för att öka kolsänkor i skogssektorn. Rapport 7037, mars 2022. Naturvårdsverket.
- Grundberg, K.-E., Jalkanen, K., Petersson, H., Wikberg, P.-E., Lundblad, M. 2022. Fördelning av kolpoolsförändringar på olika skogstyper. SMED Rapport nr 1 2022.
- Gundersen, P., Thybring, E.E., Nord-Larsen, T. et al., 2021. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature* 591, E21–E23.
- Gustavsson, L., Haus, S., Ortiz, C., Sathre, R., Le Truong, N. 2015a. Climate effects of bioenergy from forest residues in comparison to fossil energy. *Applied Energy* 138, 36–50.
- Gustavsson, L., Dodoo, A., Sathre, R. 2015b. Climate change effects over the lifecycle of a building. Report on methodological issues in determining the climate change effects over the lifecycle of a building. Final report for Boverket, September 2015. Linnéuniversitetet.

- Gustavsson, L., Haus, S., Lundblad, M., Lundström, A., Ortiz, C.A., Sathre, R., Le Truong, N., Wikberg, P-E. 2017. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 612–24.
- Gustavsson, L., Nguyen, T., Sathre, R., Tettey, U.Y.A. 2021. Climate effects of forestry and substitution of concrete buildings and fossil energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 136, 110435.
- Gustavsson, L., Sathre, R., Leskinen, P., Nabuurs, G-J., Kraxner, F. 2022. Comment on ‘Climate mitigation forestry—temporal trade-offs’. *Environmental Research Letters* 17, 048001.
- Hannerz, M., Nordin, A., Saksa, T. 2017. Hyggesfritt skogsbruk. En kunskapssammanställning från Sverige och Finland. *Future Forests Rapportserie 2017:1*, Sveriges lantbruksuniversitet. 74 s.
- Holmgren, P. 2021. Time to dispel. The forest carbon debt illusion. *Skogsindustrierna*, Report May 2021. 39 s.
- Holtsmark, B. 2010. Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climate Change* 112(2), 415–428.
- Hånell, B. 2008. Handledning i bonitering. Del 4, Torvmark. Praktiska anvisningar. Skogsstyrelsen.
- Högberg, P. m.fl. 2021. Sustainable boreal forest management— challenges and opportunities for climate change mitigation. Report 2021/11. Skogsstyrelsen. 58 s.
- IPCC, 2023. Climate change 2023. Synthesis report. Summary for Policymakers. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kallio, A.M.I., Solberg, B. 2018. Leakage of forest harvest changes in a small open economy: case Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33, 502–510.
- Kallio, A.M.I., Solberg, B., Käär, L., Päivinen, R. 2018. Economic impacts of setting reference levels for the forest carbon sinks in the EU on the European forest sector. *Forest Policy and Economics* 92, 193–201.
- Kauppi, P.E., Stål, G., Arnesson-Ceder, L., Hallberg Sramek, I., Hoen, H.F., Svensson, A., Wernick, I.K., Högberg, P., Lundmark, T. 2022. Managing existing forests can mitigate climate change. *Forest Ecology and Management* 513, 120186.
- Konjunkturinstitutet, 2021. Skogen, klimatet och politiken. Miljö, ekonomi och politik 2021. 91 s + bilaga.
- Larsson, S., Lundmark, T., Ståhl, G. 2009. Möjligheter till intensivodling av skog. Slutrapport från regeringsuppdrag Jo 2008/1885, SLU, 136 s.
- Laudon, H., Mosquera, V., Eklöf, K., Järveoja, J., Karimi, S., Krasnova, A., Peichl, M., Pinkwart, A., Hei, C., Tong, M., Wallin, M.B., Zannella, A., Maher Hasselquist, E. 2023. Consequences of rewetting and ditch cleaning on hydrology, water quality and greenhouse gas balance in a drained northern landscape. *Scientific Reports* 13, 20218.
- Leskinen, P., Cardellini, G., González-García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., Smyth, C., Stern, T., Verkerk, P.J. 2018. Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. European Forest Institute (EFI).
- Lindroth, A., Tranvik, L. 2021. Accounting for all territorial emissions and sinks is important for development of climate mitigation policies. *Carbon Balance and Management* 16, 10.
- Lindroth, A., Lagergren, F., Grelle, A., Klemedtsson, L., Langvall, O., Weslien, P., Tuulik, J. 2009. Storms can cause Europe-wide reduction in forest carbon sink. *Global Change Biology* 15, 346–355.
- Lindroth, A., Holst, J., Heliasz, M., Vestin, P., Lagergren, F., Biermann, T., Cai, Z., Mölder, M. 2018. Effects of low thinning on carbon dioxide fluxes in a mixed hemiboreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 262, 59–70.
- Luke, 2021. Forest growth rate decelerated – volume of growing stock increased. Luke.fi News 2021–11–15.
- Lundblad, M., Roberge, C., Appiah Mensah, A., Petersson, H., Stendahl, J. 2021. Förslag på uppföljning av åtgärder för ökad kolinlagring och minskade utsläpp i LULUCF-sektorn. Beskogning av tidigare jordbruksmark. Arbetsrapport 525, SLU, Inst. för skoglig resurshushållning.
- Lundblad, M., Karlton, E., Stendahl, J., Lindahl, A., Petersson, H., Wikberg, P-E., Bolinder, M. 2022. Sveriges klimatrapportering – markanvändning och skogsbruk. Fakta Skog nr 7–2022. Sveriges lantbruksuniversitet. 4 s.

- Lundmark, R. 2022. Läckageeffekter från skog och skogsbruk. Skogsstyrelsen, Rapport 2022/18. 65 s.
- Lundmark, R. 2023. Skogens roll i energi- och klimatomställningen. SNS – Studieförbundet Näringsliv och Samhälle. Forskningsrapport 2023.
- Lundmark, T., Bergh, J., Hofer, P., Lundström, A., Nordin, A., Poudel, B. C., Sathre, R., Taverna, R., Werner, F. 2014. Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation. *Forests* 5, 557–578.
- Lundmark, T., Bergh, J., Nordin, A., Fahlvik, N., Poudel, B. C. 2016. Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden. *Ambio* 45 (Suppl. 2), 203–213.
- Lundmark, T., Poudel, B. C., Stål, G., Nordin, A., Sonesson, J. 2018. Carbon balance in production forestry in relation to rotation length. *Canadian Journal of Forest Research*, 48, 672–678.
- Lundqvist, L., Spreer, S., Karlsson, C. 2013. Volume production in different silvicultural systems for 85 years in a mixed *Picea abies*–*Pinus sylvestris* forest in central Sweden. *Silva Fennica* 47, 897.
- Lundström, A. u.å. Sammanställning av åtgärder inom LULUCF sektorn tillsammans med uppskattning av effekter av ett par av åtgärderna. Redovisning av Naturvårdsverkets uppdrag nr 2251–16–005. Sveriges lantbruksuniversitet.
- LUSTRA, 2007. Skogsklädda torvtäckta marker. Kolet, klimatet och skogen. En rapport från Mistra.
- LUSTRA, 2008. Så kan skogsbruket påverka. Kolet, klimatet och skogen. En rapport finansierad av MISTRA. 28 s.
- Lutter, R., Stål, G., Arnesson Ceder, L., Lim, H., Padari, A., Tullus, H., Nordin, A., Lundmark, T. 2021. Climate benefit of different tree species on former agricultural land in northern Europe. *Forests* 12, 1810.
- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P. & Grace, J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213–215.
- Marklund, L. G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. SLU, Inst f skogstaxering. Rapport 45, Umeå. 73 s.
- Melin, Y., Petersson, H., Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden – A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257, 1445–1551.
- Mitchell, S. R., Harmon, M. E., O’Connell, K. E. B. 2012. Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *GCB Bioenergy* 4, 818–827.
- Mjöfors, K., Strömgren, M., Nohrstedt, H.-Ö., Johansson, M.-B., Gärdenäs, A. 2017. Indications that site preparation increases forest ecosystem carbon stocks in the long term. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32, 717–725.
- Nabuurs, G.-J., Arets, E. J. M. M., Schelhaas, M.-J. 2017. European forests show no carbon debt, only a long parity effect. *Forest Policy and Economics, Special section on The economics of carbon sequestration in forestry* 75, 120–125.
- Naturvårdsverket, 2022. Nettoinlagringen av koldioxid i växande träd minskar kraftigt. Pressmeddelande 2022–09–29.
- Naturvårdsverket.se, u.å.. Statistik över utsläpp och upptag av växthusgaser. <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-nettoutsäpp-och-nettoupptag-fran-markanvandning/>
- Nilsen, P., Strand, L. T. 2013. Carbon stores and fluxes in even- and uneven-aged Norway spruce stands. *Silva Fennica* 47(4), 1024.
- Näslund, M. 1947. Funktioner och tabeller för kubering av stående träd. Tall, gran och björk i södra Sverige samt i hela landet. Meddelande från Statens Skogsforskningsinstitut, band 36, nr 3. Stockholm.
- Peichl, M., Martínez-García, E., Fransson, J. E. S., Wallerman, J., Laudon, H., Lundmark, T., Nilsson, M. B. 2022. Landscape-variability of the carbon balance across managed boreal forests. *Global Change Biology* 29, 1119–1132.
- Petersson, H., Ellison, D., Appiah Mensah, A., Berndes, G., Egnell, G., Lundblad, M., Lundmark, T., Lundström, A., Stendahl, J., Wikberg, P.-E. 2022. On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden. *GCB-Bioenergy* 14, 793–813.

- Päivinen, R., Kallio, A.M.I., Solberg, B. Käär, L. 2022. EU Forest reference levels: The compatible harvest volumes compiled and assessed in terms of forest sector market development. *Forest Policy and Economics* 140, 102748.
- Regeringen.se. 2022. EU-överenskommelse för utsläpp och upptag av växthusgaser i skog och mark. Pressmeddelande från Klimat- och näringslivsdepartementet, 11 november 2022.
- Rummukainen, M., 2021. Skogens klimatnyttor – en balansakt i prioritering. CEC Rapport nr 6. Centrum för miljö- och klimatvetenskap, Lunds universitet. 35 s.
- Rytter, L., Andreassen, K., Bergh, J., Ekö, P.-M., Kilpeläinen, A., Lazdina, D., Muiste, P., Nord-Larsen, T. 2014. Land areas and biomass production for current and future use in the Nordic and Baltic countries. Nordiska Ministerrådet, Nordic Energy Research. 44 s.
- Rytter, R.-M. 2011. The potential of willow and poplar plantations as carbon sinks in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 36, 86–95.
- Sathre, R., O'Connor, J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science and Policy* 13, 104–114.
- Skogsdata, 2023. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från SLU Riksskogstaxeringen. SLU, 2023.
- Skogsstyrelsen, 2019. Klimatanpassning av skogen och skogsbruket – mål och förslag på åtgärder. Skogsstyrelsen, Rapport 2019/23.
- Skogsstyrelsen, 2022. Skogliga konsekvensanalyser 2022 – syntesrapport. Skogsstyrelsen, Rapport 2022/11.
- Skytt, T., Englund, G., Jonsson, B.-G. 2021. Climate mitigation forestry – temporal trade-offs. *Environmental Research Letters* 16, 114037.
- SLU, 2023. Tre trender i den svenska skogen enligt SLU Riksskogstaxeringen. SLU-nyhet 2023-05-24.
- Sonesson, J., Eliasson, L., Jacobson, S., Wallgren, M., Weslien, J. & Wilhelmsson, L. 2017. Hyggesfritt skogsbruk på landskapsnivå. Skogforsk, Arbetsrapport 926/2017.
- SOU, 2020. Vägen till en klimatpositiv framtid. Betänkande av Klimatpolitiska vägvalsutredningen. Statens offentliga utredningar SOU 2020:4.
- Stendahl, J. 2017. Tema: Skogsmarkens kolförråd. I: Skogsdata 2017. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från Riksskogstaxeringen. s. 14–23. SLU, inst. för skogshushållning.
- Stokland, J. 2021. Volume increment and carbon dynamics in boreal forest when extending the rotation length towards biologically old stands. *Forest Ecology and Management* 488, 119017.
- Svebio, 2020. Färdplan bioenergi – så möter vi behovet av bioenergi för fossilfritt Sverige.
- Vestin, P. Mölder, M., Kljun, N., Cai, Z., Hasan, A., Holst, J., Klemedtsson, L., Lindroth, A. 2020. Impacts of clear-cutting of a boreal forest on carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes. *Forests* 11(9), 961.
- Westholm, E., Beland Lindahl, K. 2015. Välfärdsstaten nickar till Sveriges energiomställning. I: Skogliga trender i världen, Rapport från Future Forests 2009–2012. Future Forests Rapportserie 2015:1. Sveriges lantbruksuniversitet.
- Yang, H., Ciais, P., Frappart, F. m.fl. 2023. Global increase in biomass carbon stock dominated by growth of northern young forests over past decade. *Nature Geoscience* 16, 886–892.
- Zanchi, G., Eriksson, A. 2023. Effektanalys av några skogliga åtgärders påverkan på kolsänkan. Kunskapsunderlag. Skogsstyrelsen Rapport 2023/10.



SCIENCE AND
EDUCATION **FOR**
SUSTAINABLE
LIFE