

Klimateffektiv skogsskötsel

En jämförelse mellan tre trakthyggesbaserade skötselprogram och en hyggesfri metod utifrån ett klimatperspektiv

Maximilian Schulte (SLU), Anders Eriksson, Karin Ågren (IVL), Johan Möller, Johan Sonesson, Nils Fahlvik, Monika Strömgren, Fredrik Johansson, Samuel Rönnbäck, Per-Anders Hansson (SLU)



Innehåll

Förord	4
Summary	5
Sammanfattning	6
Bakgrund	7
Syfte	8
Metod	8
Definition av typståndorter	9
Definition av skötselprogram	9
Business as usual (BAU)	9
Gallringsfritt (GF)	10
Maximerad medeltillväxt (MMT)	10
Hyggesfritt med blädning (HFB)	10
Skötsel- och skogsutvecklingsmodeller i Heureka	11
Bestämning av stockegenskaper genom simuleringar	14
Tidsdynamisk LCA	15
Analysperspektiv	16
Konsekvensanalys av förändrad skötsel utifrån ett systemperspektiv	16
Beslutspunktsanalys för en enskild markägare utifrån ett beståndsperspektiv	16
Resultat	17
Klimat effekt i ett systemperspektiv	17
Tidsdynamisk temperaturförändring	19
Klimat effekt av en förändrad aptering inriktad mot mer timmer	21
Klimat effektiv skogsskötsel i ett landskapsperspektiv	21
Klimat effektiv skogsskötsel för en enskild markägare	22
Diskussion	26
Klimat effektivitet i olika skalor	26
Produkter, cirkularitet och substitution	27
Avvägningar och målkonflikter kring val av skötselprogram	28
Modellering av blädning	28
Hantering av markkol	29
Slutsatser	30
Referenser	31



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts mars månad 2024 av Erik Ling, doktor och programchef för skogsskötsel. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 5 juni 2024.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2024 ISSN 1404-305X

Förord

Det här arbetet är ett samarbetsprojekt mellan Skogforsk och Institutionen för energi och teknik på SLU i Uppsala. Projektet har löpt under 2022 och 2023. En av projektets styrkor är att vi haft en bred grupp av experter som med sina unika spetskunskaper gjort projektet möjligt.

Projektledarna vill tacka Skogssällskapet för finansiering samt Enheten för skoglig fältforskning på SLU och SITES (The Swedish Infrastructure for Ecosystem Science) för att de bidragit med försöksdata. Dessutom vill vi tacka alla kunniga och engagerade forskare på Skogforsk och SLU som möjliggjort projektets genomförande. Slutligen vill vi tacka alla som nyfiket hört av sig och efterfrågat våra resultat under projektets gång. Här kommer nu äntligen vår slutrapport.

Uppsala i februari 2024

Anders Eriksson och Karin Ågren

Projektledare

Summary

The climate issue is one of the most central challenges of our time, and many believe that forests play a key role in combating climate change. However, opinions vary on how forests should best be managed to achieve this. Some believe it is important to increase the carbon stock in standing biomass by reducing or delaying logging. Others advocate maximising carbon sequestration through both increased growth and increased roundwood harvest, thereby reducing dependence on fossil fuels and contributing to the bioeconomy. Differences in opinion are largely influenced by individuals' system, time, and spatial perspectives.

The purpose of this modelling study was to analyse four different forest management regimes and their resulting products, and then quantify the climate effect over time when implemented in three different forest stands in various parts of Sweden.

The total climate effect of the forest included the effect of changes in carbon stocks in the forest and its products, as well as the effect of using forest products to replace fossil and/or energy-intensive materials with renewable bio-based alternatives.

The individual forest owners have a direct impact on the climate effect through their choice of management, and it is at the individual decision points (thinning and regeneration felling) that they have an opportunity to influence the future development and thereby the climate efficiency of each individual stand.

The study concludes that active forest management with harvest and use of forest products, regardless of rotation forest or continuous cover forestry methods, will lead to a cooling climate effect over time, primarily due to forests' ability to sequester carbon. However, the cooling climate effect varies in magnitude and over time, depending on the geographical location and management method. Different systems may be preferable depending on the stage of management and when a significant cooling climate effect is prioritised.

The continuous cover management method had less cooling climate effect than the rotation-based alternatives, given the assumed lower forest production. However, the continuous cover forestry alternative resulted in lower climate fluctuations.

Another conclusion is that the chosen forest management regime affects the products that can be delivered from the forest, which in turn affects the magnitude of the cooling climate effect.

New types of analyses were made possible through the developed methodology, where roundwood properties and quality resulting from changed management are also included in life cycle assessments.

Sammanfattning

Klimatfrågan är en av vår tids mest centrala utmaningar och många anser att skogen spelar en nyckelroll i att bekämpa klimatförändringarna. Åsikterna om hur skogen bäst bör brukas för att uppnå detta går emellertid ofta isär. Vissa anser att det är viktigt att öka kollagret i den stående biomassan genom minskad eller senarelagd avverkning. Andra menar att det är viktigt att maximera inbindningen av kol genom såväl ökad tillväxt som ökat virkesuttag för att på så sätt minska fossilberoendet och bidra till en utvecklad bioekonomi. Skillnaden i åsikter påverkas i stor grad av personernas system-, tids- och rumsperspektiv.

Syftet med denna modelleringsstudie var att analysera fyra olika skogsskötselprogram och deras produktutfall, för att sedan kvantifiera klimateffekten över tid när de implementeras på tre typbestånd i olika delar av Sverige.

I skogens totala klimateffekt inkluderades såväl effekten av förändringar i kollager i skog och dess produkter, som effekten av att nyttja skogens produkter för att ersätta fossila och/eller energikrävande material med förnybara biobaserade alternativ.

Den enskilda markägaren har en direkt påverkan på klimatet genom sina skötselval, och det är vid de enskilda beslutspunkterna (gallring respektive föryngringsavverkning) som hen har en möjlighet att påverka den framtida utvecklingen och därigenom klimateffektiviteten för det enskilda beståndet.

Studiens slutsats är att ett aktivt skogsbruk med uttag och användning av de skogliga produkterna, oaktat om trakthyggesbruk eller hyggesfria metoder används, kommer leda till en klimatkylande effekt över tid, främst på grund av skogarnas förmåga att binda koldioxid, vilket möjliggör den klimatkylande effekten över tid. Den klimatkylande effekten är dock av olika magnitud och ser olika ut över tid beroende på var i landet och på vilket sätt brukandet sker. Det innebär att beroende på i vilket skede av brukandet man är och när i tiden man vill prioritera en stor klimatkylande effekt kan olika system vara att föredra. Den studerade hyggesfria metoden hade en lägre klimatkylande effekt än de trakthyggesbruksbaserade alternativen, givet den antagna lägre skogsproduktionen. Däremot hade det hyggesfria alternativet en lägre klimatmässig fluktuation.

En ytterligare slutsats är att valt skogsskötselprogram påverkar vilka produkter som kan levereras från skogen, vilket i sin tur påverkar magnituden av den klimatkylande effekten.

Nya typer av analyser har möjliggjorts genom den metodik som tagits fram inom projektet där virkets egenskaper och kvalitet, som en konsekvens av förändrad skötsel, också inkluderas i livscykelanalyserna.

Bakgrund

En av vår tids viktigaste frågor är hur rådande klimatkrisen bäst hanteras. I klimatkonventionen från 1992 anges två huvudspår för att motverka denna kris, dels genom att minska eller förhindra antropogena växthusgasutsläpp, dels genom att behålla eller förstärka sänkor bland annat i naturliga ekosystem (Artikel 4.1, FN 1992). Skogen kan spela en viktig roll i båda dessa spår. Skogsbaserade produkter kan förhindra utsläpp från mer fossilintensiva produkter och såväl den stående skogen som långlivade produkter kan även agera sänka. En del av frågan hur klimatkrisen bäst hanteras handlar därför om hur skogen bör brukas. Skogsskötseln kan påverka vilka produkter som kan tillverkas från skogsråvaran, vilka i sin tur kan ersätta mer fossilintensiva produkter eller förhindra utsläpp i andra sektorer. Genom skogsskötsel påverkas även mängden kol som lagras i skogen och dess produkter samt den mängd kol som tas upp genom tillväxt.

I dagens skogliga debatt går åsikterna kraftigt isär om hur skogen bör brukas. På ena sidan står de som anser att skogarna i mycket högre utsträckning än idag bör skyddas från avverkning, för att på så vis öka kollagret i den stående biomassan. På andra sidan höjs röster för att maximera inbindningen av kol genom både ökad tillväxt och ökat virkesuttag för att på så sätt minska fossilberoendet och bidra till en utvecklad bioekonomi.

Skillnaden i åsikter påverkas i stor grad av personernas system-, tids- och rumsperspektiv. Ser man till bara skogsekosystemet eller ser man även nyttan i produkterna? Betonar man vikten av att se nytta inom loppet av några år eller har man ett längre tidsperspektiv? Avgränsas resultaten till enskilda bestånd eller till ett landskap? Eller ser man bortom nationsgränserna i sin analys och tar även hänsyn till den internationella konkurrensen på den globala virkesmarknaden? Utöver skogens klimatnytta kan även hänsyn till skogens övriga nyttor vägas in och påverka valet av den metod man tycker är mest lämplig för brukandet.

När det gäller skogsprodukternas klimatnytta kan de dessutom ofta vara svåra att kvantifiera och värdera. Vilka produkter ersätter man eller vilka växthusgasutsläpp förhindras? Vilket klimatavtryck kommer skogsprodukterna och de produkter de ersätter ge upphov till i framtiden? Leder verkligen en ökad tillgång på skogsprodukter till minskade växthusgasutsläpp eller kan de leda till ökad konsumtion? Beroende på hur man svarar på dessa frågor, blir värdet på klimatnyttan olika.

Det finns ett ökande intresse bland många skogsägare att genom sitt skogsbruk bidra till att motverka rådande klimatförändring. Det saknas dock kunskap kring hur det enskilda brukandet påverkar klimatet, och framför allt hur man genom aktiva val i skogsskötseln kan påverka skogens klimatnytta och hur den förändras över tid. Bör omloppstiderna förlängas för att lagra in mer kol? Vad blir konsekvenserna om skogen brukas gallringsfritt? Och hur klimateffektiv är en hyggesfri skogsskötsel?

För att framåt kunna ta välgrundade beslut angående skötseln av de svenska skogarna finns därför behov av en bred analys av hur en klimateffektiv skogsskötsel kan se ut. I denna rapport redovisas klimatnyttan från fyra olika skötselalternativ och hur den förändras över tid. Tre alternativ bygger på dagens trakthyggesbruk och ett på en hyggesfri metod.

Syfte

Syftet med denna modelleringsstudie var att analysera fyra olika skogsskötselprogram och deras produktutfall, för att sedan kvantifiera klimateffekten över tid för tre typbestånd i Sverige. Följande fyra program undersöktes:

1. Business as usual
2. Gallringsfritt
3. Maximerad medeltillväxt
4. Hyggesfritt

I skogens klimateffekt inkluderades såväl effekten av förändringar i kollager i skog och dess produkter, som effekten av att nyttja skogens produkter för att ersätta fossila och/eller energikrävande material med förnybara biobaserade alternativ.

Studien har fokuserat på klimateffektiv skogsskötsel och inkluderar inte effekter på andra ekosystemtjänster såsom biologisk mångfald.

Metod

Den här studien baseras på modellering och simulering av fyra skötselprogram tillämpade på tre typståndorter för att slutligen skatta den årliga klimateffekten över tid (Figur 1). Här ges först en översikt över delarna i arbetet, medan varje del beskrivs mer ingående i de efterföljande avsnitten.

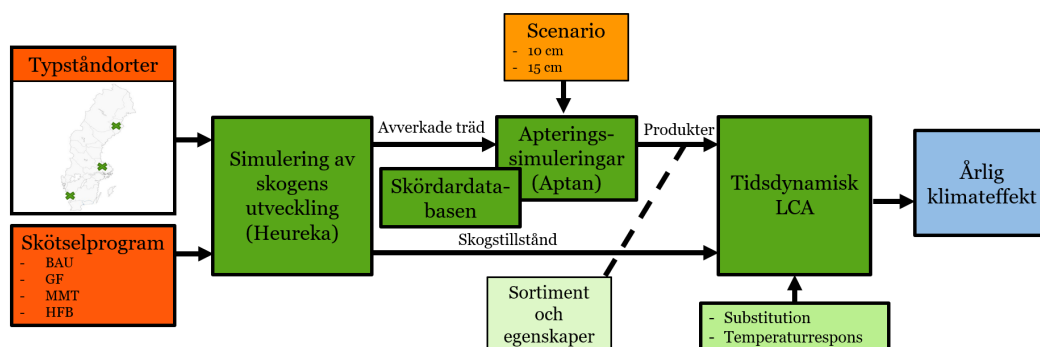
Först definierades fyra olika skötselprogram och tre olika typståndorter (Figur 1). Utformandet av skötselprogram gjordes för att inkludera möjliga förändringar som principiellt belyser olika val som en markägare kan ställas inför i sin skogsskötsel, såsom gallringfri skogsskötsel, maximerad medeltillväxt och hyggesfri skogsskötsel. I ett nästa steg simulerades skogens utveckling över tid för de olika skötselprogrammen för varje typståndort via Heureka (Wikström m.fl. 2011, Lämås m.fl. 2023).

Information om dimensioner och volymer av de träd som avverkats i de olika Heureka-simuleringarna användes därefter i apteringssimuleringar för att skatta vilka skogliga produkter, såsom sågtimmer och massaved, som varje skötselprogram och typståndort gav upphov till. Genom att koppla samman resultaten av apteringssimuleringarna med Skogforsks skördardatabas, som innehåller produktutfall från ett stort antal avverkningar, erhöles detaljerade egenskaper för varje stock/stam.

Apteringssimuleringarna genomfördes för två skilda scenarier; ett med en minimitoppdiameter för sågtimmer på 15 cm och ett på 10 cm. I det senare fallet kunde en större del av virket användas till mer långlivade produkter, vilket påverkar den totala klimateffekten.

Information om produkterna och den stående skogen användes slutligen som underlag till den tidsdynamiska LCA¹-modelleringen där klimateffekten över tid för varje skötselprogram och typståndort beräknades.

¹ LCA står för Life Cycle Assessment, eller Livscykelanalys.



Figur 1. Översikt över modelleringskonceptet som använts i den här studien.

Definition av typståndorter

Då Sverige är ett avlångt land med skilda skogliga förutsättningar har analyser och beräkningar genomförts för olika regioner i Sverige. För detta valdes tre typiska ståndorter; en i Västerbotten, en i Uppland och en i Halland, vardera på en hektar (Tabell 1).

För att möjliggöra jämförelser mellan skötselprogrammen på samma typståndort valdes granståndorter, dels för att granbestånd är vanligt förekommande, dels för att de också kan övergå till fler/fullskiktade bestånd och skötas med hyggesfria metoder.

Tabell 1. Beskrivning av typståndorterna.

Landskap	Ståndorts-index (h100)	Lat. (°)	Alt. (m)	Markfuktighets-klass	Markvegetations-klass
Västerbotten	G18	64	200	Frisk	Blåbär
Uppland	G26	60	50	Frisk	Lågårt/blåbär
Halland	G32	57	100	Frisk	Högårt/blåbär

Definition av skötselprogram

Fyra alternativa skötselprogram utarbetades, varav ett motsvarade dagens praxis. De fyra varianterna prioriterar olika delar i sin skötsel där syftet var att efterlikna fyra praktiskt möjliga alternativ för att sedan utvärdera och beskriva dessa med fokus på klimateffekt. Eftersom de är principiellt olika finns en möjlighet att bygga kunskap kring vad som är viktigt ur en klimataspekt samt varför. Beskrivningar av skötselprogrammen följer nedan och beskrivs i detalj i Tabell 2.

Business as usual (BAU)

I detta skötselprogram görs gallringar med stöd av gallringsmallar för respektive ståndortsindex enligt www.skogskunskap.se. Gallringarna görs som låggallring med uttag enligt Tabell 2. Slutavverkning görs vid nuvärdets kulmination. Eftersom intäkter längre

fram i tiden är värda mindre på grund av diskontering leder det till att skogen avverkas innan medeltillväxten kulminerat, men ur ett ekonomiskt perspektiv blir det den optimala slutavverkningstidpunkten givet den kalkylränta som använts. I denna studie har räntan 2,5 procent använts genomgående. För priser och kostnader användes de som anges i defaultinställningar i Heureka Standwise.

Gallringsfritt (GF)

I detta program genomförs ingen gallring och slutavverkning sker vid nuvärdets kulmination. Gallringsfritt skogsbruk kan vara ett alternativ i en situation med låga virkespriser och/eller höga drivningskostnader för gallringsavverkning. Det kan också motiveras av minskade risker för stora skador, t.ex. storm och röta. Gallringsfritt skogsbruk leder ofta till kortare omloppstider.

Maximerad medeltillväxt (MMT)

Gallringar genomförs som vid BAU, men slutavverkning sker i stället vid medeltillväxtens kulmination. Detta skiljer sig från nuvärdets kulmination genom att det oftast leder till en förlängd omloppstid jämfört med den nuvärdesoptimala omloppstiden. Över tid ger denna skogsskötsel högst virkesproduktion sett på landskapsnivå.

Hyggesfritt med blädning (HFB)

Som representation för hyggesfritt skogsbruk valdes i studien en variant med kontinuerligt återkommande blädningsbruk. Avverkningarna riktades mot de grävsta träden men med mål att över tid behålla beståndets längd- och diameterstruktur (en inverterad j-form). Blädningsintervallen i denna studie sattes till 25 år för ståndortsindex G18 och 15 år för ståndortsindex G26 och G32.

Tabell 2. Beskrivning av skötselprogram och hur de tillämpas på de tre typståndorterna. Gy = grunddyta.

	BAU	GF	MMT	HFB
	Röjning till 1500 st/ha år 20	Röjning till 1500 st/ha år 20	Röjning till 1500 st/ha år 20	
Västerbotten	Gallring år 65 35 % av Gy		Gallring år 65 35 % av Gy	Intervall 25 år
	Slutavverkning år 100	Slutavverkning år 95	Slutavverkning år 125	
	Röjning till 2000 st/ha år 15	Röjning till 2000 st/ha år 15	Röjning till 2000 st/ha år 15	
Uppland	Gallring år 40 och 50 Styrka 35 % resp. 30 %		Gallring år 40 och 50 Styrka 35 % resp. 30 %	Intervall 15 år
	Slutavverkning år 65	Slutavverkning år 45	Slutavverkning år 70	

	Röjning till 2300 st/ha år 10	Röjning till 2300 st/ha år 10	Röjning till 2300 st/ha år 10	
Halland	Gallring år 30 och 40 Styrka 35 % resp. 30 %		Gallring år 30 och 40 Styrka 35 % resp. 30 %	Intervall 15 år
	Slutavverkning år 55	Slutavverkning år 45	Slutavverkning år 60	

Skötsel- och skogsutvecklingsmodeller i Heureka

För att kunna analysera skötselns inverkan på klimateffekten modellerades såväl den stående skogen som de uttagna produkterna när de fyra olika skötselprogrammen applicerades på de tre typståndorterna. För de tre trakthyggesbaserade programmen var utgångsläget en föryngringsyta. Beräkningar av skogens framtida tillväxt, biomassa samt diameter- och höjdfördelningar utfördes med hjälp av simuleringsverktyget Heureka (Wikström m.fl. 2011, Lämås m.fl. 2023). Heureka innehåller ett antal olika modeller för bland annat tillväxt, avgångar, inväxning, biomassa och markkol. Huvuddelen av modellerna är baserade på data från Riksskogstaxeringen och är validerade av Fahlvik m.fl. (2014). Heureka låter användaren göra framskrivningar och analyser av skogens utveckling givet en viss skogsskötsel som specificeras av användaren. Skötselvariabler som gallringstidpunkt, -form, -styrka samt trädslagsval, omloppstid m.fl. kan simuleras, liksom olika varianter av hyggesfri skötsel. Centrala resultatvariabler för fortsatta analyser i denna studie var löpande nettotillväxt, kolförrådets utveckling samt diameter-, längd- och trädslagsfördelningar som låg till grund för apteringssimuleringarna.

Trädens biomassa och kolinnehåll simuleras i Heureka med funktioner av Marklund (1988) för stam, bark, grenar och barr och med funktioner av Petersson och Ståhl (2006) för stubbar och rötter. Kol i mark estimeras med hjälp av Q-modellen (Ågren & Hyvönen 2003), i vilken organiskt material i marken antas förändras kontinuerligt genom nedbrytning. I modellen tillförs marken kol genom förnaffall kopplat till trädens tillväxt och mortalitet. Stubbar, rötter, grenar och barr från avverkade träd tillförs också markens kolpool.

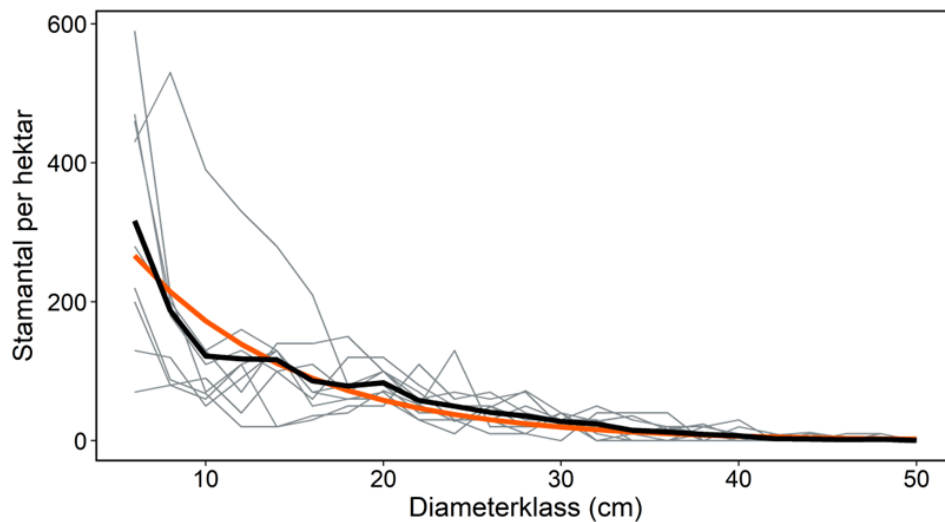
För att skapa ett utgångsläge med avseende på diameterfördelning för fullskiktad skog i Heureka för det hyggesfria skötselprogrammet (HFB) användes data från försöksserien ”Gallring och gödsling av skiktad granskog” med försöksytor i norra och mellersta Sverige (Ekholm m.fl. 2022). Till försöksserien valdes grandominerade bestånd med skiktad struktur på frisk till frisk/fuktig mark. Det ingår således inte någon omställning från likåldrig skog till skiktad skog i våra simuleringar. Behandlingarna var gallring, gallring+gödsling samt en obehandlad kontroll. I normalfallet etablerades en försöksyta per behandling inom respektive lokal. Ytornas areal var mellan 0,09 och 0,16 hektar. I denna studie användes data från de obehandlade kontrollytorna inom tio lokaler (breddgrad 60,7 och 64,7).

Baserat på de tio försöksytorna skattades ett samband mellan diameterklass och stamantal per hektar. För detta användes en exponentialfunktion som tidigare tillämpats för att beskriva diameterfördelningen i skiktad skog (Leaks 1965):

$$N = k \times e^{(-a \times DBH)} \times dDBH$$

där N är stamantalet per hektar för diameterklassen, DBH är diametern i brösthöjd, $dDBH$ är klassbredden för diameterklass, k och a är konstanter.

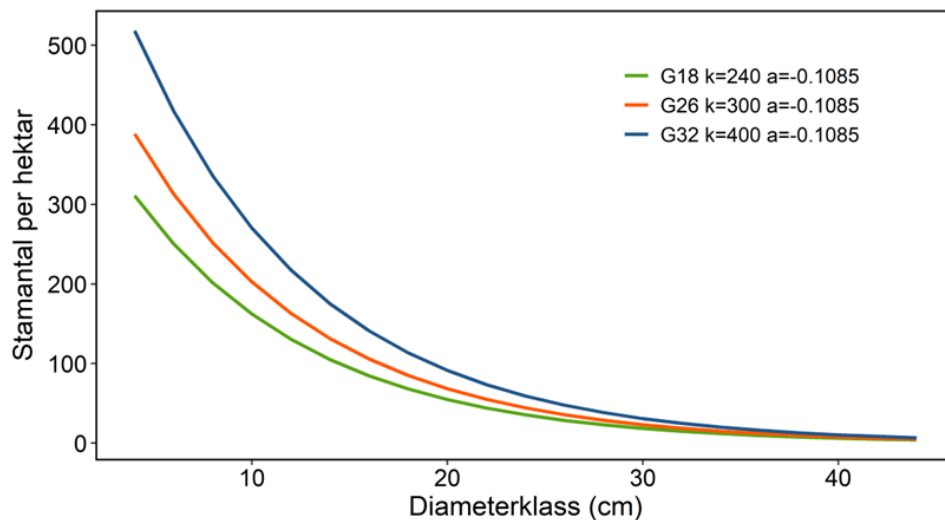
Funktionen anpassades till diameterfördelning för de tio försöksytorna genom ickelinjär regression i modulen *nls* i statistikprogrammet R (R Core Team 2023) (Figur 2).



Figur 2. Diameterfördelning för tio obehandlade kontrolltytor inom försöksserien "Gallring och gödsling i skittad granskog" (Ekholm m.fl. 2022). Diameterfördelningar presenteras för enskilda bestånd (grå linjer) och som medeltal för alla bestånd (svart linje). En exponentialfunktion som beskriver sambandet mellan diameter och stamantal anpassades till materialet (orange linje).

Värden för stående volym före uttag vid HFB hämtades från en skötselmall i blädningsbruk (Lundqvist m.fl. 2009). Mallen beskriver förhållandet mellan uttagens intervall och stående virkesförråd före uttag för skilda ståndortsindex. Baserat på ståndortsindex för typbestånden i denna studie och valda huggningsintervall gav mallen i Lundqvist m.fl. (2009) en volym före uttag på 180, 270 och 400 kubikmeter per hektar för G18, G26 respektive G32.

För att uppnå dessa stående volymer i Heureka-simuleringarna justerades konstanten k i exponentialfunktionen för sambandet mellan diameterklass och stamantal när utgångsläget genererades. Diameterfördelningar för ett stort antal värden på k testades som indata i Heureka. Det värde på k som gav ett bestånd med en volym som bäst motsvarade den stående volymen i mallen för respektive typbestånd valdes för att skapa indata till Heureka (Figur 3).



Figur 3. Konstanten k i exponentialfunktionen som beskriver diameterfördelning anpassades så att volymen i utgångsläget för alternativen G18, G26 och G32 var 180, 270 och 400 kubikmeter per hektar i Heureka-simuleringarna.

I Heureka användes en standardinställning för olikåldrig skog och bländningshuggningar. Minimidiameter för urval av träd vid bländningshuggningar sattes till 18 cm. Uttagets storlek vid varje ingrepp i HFB sattes till 30 procent av grundytan för samtliga typbestånd.

Initiala tester i Heureka visade på svårigheter med att uppnå en balans där beståndstruktur och produktion bibehölls över tid. Produktion och stamantal avtog över tid och nedgången i produktion tilltog med längden på simuleringen. Det paket med funktioner som skattar beståndsutvecklingen i Heureka är i huvudsak baserade på data från Riksskogstaxeringen. Skiktad skog har inte samma representation som enskiktade, likåldriga bestånd i det underliggande materialet. Det kan vara en förklaring till problemen med långsiktig simulering av HFB i Heureka.

På grund av problemen med att hitta en jämvikt i simuleringarna av HFB där beståndstruktur och stående volym genereras över tid togs beslutet att enbart inkludera det första huggningsintervallet i simuleringarna. För att möjliggöra kontinuerliga uttag sattes kravet att volymen innan uttag efter det första bländningsintervallet skulle vara lika stor som volymen i utgångsläget.

I denna studie antogs HFB producera 80 procent av volymens medeltillväxt i alternativ BAU för respektive typbestånd. Antagandet grundar sig på en studie av Lundqvist (2017) som indikerar att den långsiktiga produktionsnivån i bländningsskogsbruk är lägre än för trakthyggesbruk. För att uppnå denna skillnad mellan HFB och BAU, kalibrerades produktionsnivån i HFB genom att justera medelåldern i indata till Heureka för HFB. Med ovan gjorda antaganden om diameterfördelning, stående volym och bländningsingreppens utförande gav det en beståndsålder på 130 år i G18 och 70 år i G26 och G32 för den efterfrågade produktionsnivån. Produktionsnivån i HFB avsåg volymens medelproduktion inom det första simulerade bländningsintervallet. Detta antogs sedan upprepas över tid.

Bestämning av stockegenskaper genom simuleringar

För varje skötselprogram och typståndort genomfördes simuleringar för att avgöra vilka produkter (sågtimmer, massaved, bränsleved) de olika avverkningarna gav upphov till. I simuleringarna togs även information fram om de avverkade stockarnas egenskaper, såsom diameter, längd, volym och kolinnehåll. Detta användes som underlag i den tidsdynamiska LCA-analysen.

Två olika apteringsmodeller applicerades, där det ena scenariot apterade sågtimmer ner till en toppdiameter på stockarna på 100 mm och den andra ner till 150 mm. Den grövre diametern motsvarar dagens standard för sågtimmer. 100 mm är normalt den klenaste stocken som sågas, vilket dock är ovanligt i dagsläget.

Steg 1 var att skapa en artificiell stambank för varje avverkningstillfälle, skötselprogram och typståndort via information från modelleringarna i Heureka. Resultat från Heureka användes för att söka fram matchande träd i Skogforsks skördardatabas, som innehåller mer än 200 miljoner individuella träd med detaljerade beskrivningar av egenskaper. Viktiga egenskaper är röta och andra defekter på stammarna som innebär att stamdelen blir massaved i stället för sågtimmer, så kallad stamfelsesved.

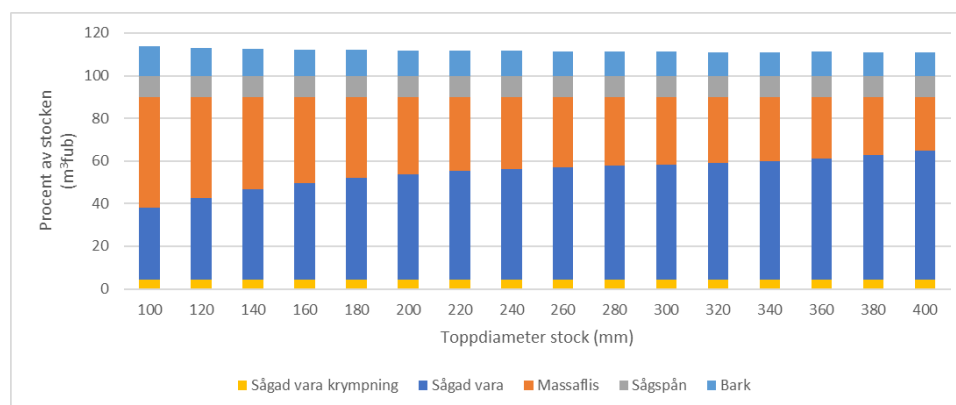
Via imputering baserat på erfarenheter från mängder med faktiska avverkningar kan den bästa representationen kopieras och användas vidare (Söderberg m.fl. 2017). I studien användes vid utsökning av stammar parametrarna *avverkningstyp (gallring/slutavverkning)*, *trädslag (gran)*, samt *DBH och trädhöjd* från Heureka inklusive koordinat för respektive område. I databasen söktes sedan liknande avverkade träd från närområdet som underlag för simulering. Därigenom skapas också en realistisk representation av stamvedsfelen, givet aktuell region och trädstorlek, exempelvis vad gäller rötskadade stockar och krök. Det är viktigt att inte bara beskriva utfallet i form av volymer, utan också beskriva egenskaperna, eftersom de i stor utsträckning påverkar produktutfallen (Möller m.fl. 2024). De kopierade träden från Skogforsks skördardatabas sattes samman till artificiella stambanker där varje träd beskrivs med en diametervektor var tionde cm, med tillhörande kvalitets- och skadevektorer.

I *steg 2* utfördes apteringsoptimeringar med programmet Aptan (Ogemark m.fl. 2000). Utifrån en standardprislista optimerades stockutfallet från stammarna baserat på priset för olika typer av stockar och sortiment. Generellt genererades i första hand sågtimmer, därefter massaved och sist energivedssortiment. Från apteringsoptimeringen genererades en stocklista med bland annat information om trädslag, sortiment, stockvolym, stocklängd och stockdiameter. För varje typståndort och skötselprogram upprättades två stocklistor, baserade på simuleringar med mintoppdiameter på sågtimmer på 100 mm respektive 150 mm.

Steg 3 var att beräkna kolinnehåll för varje stock. Skogforsk har utvecklat egenskapsmodeller för att beräkna exempelvis torr-rådensitet (Hyll m.fl. 2024). Densiteten beräknades för olika delar av trädet, från rot till topp. Indata till modellerna är bland annat trädets storlek, trädets ålder och diametervärden längs stammen från rot till topp. Utifrån de simulerade stammarna beräknades torr-rådensiteten i 10 cm-intervaller för alla apterade stammar i Skogforsks Forest Core-databas. Dessa beräkningar gav sedan kolinnehållet i varje unik stock. Av den torra vedens vikt utgörs 50–51 procent av kol (Ågren m.fl. 2023).

I *steg 4* genererades utfall av produkt och biprodukt för varje sågtimmerstock (Figur 4). Varje stock delades då in i fördelning av bark, sågad trävara, massaflis och sågspån. I Sverige används normalt barken till energi. Vad gäller sågspån blir de normalt också energi, men i viss utsträckning också spånbaserade skivor. I princip all flis används till

mekanisk eller kemisk massa. Utfallet genererades utifrån sågverkssimuleringar genomförda vid Luleå tekniska universitet i Skellefteå (Figur 4). För massavedsstockarna antogs att hela vedvolymen förutom barken blev flis för tillverkning av massa. För sågtimmerstockarna delades varje stock upp i olika produktdelar beroende på stockarnas toppdiametrar.



Figur 4. Produktutfall för timmerstockars volym i skilda toppdiametereklasser. Sågsimulering vid Luleå tekniska universitet på SLU:s stambanksdata för gran (Magnus Fredriksson, 2023). Utfallet är uppdelat i sågad vara med krympning, massafilis, sågspån och bark. För sågspån används tio procent av volymen som en schablon, detta inkluderas i flisen vid simuleringen.

Tidsdynamisk LCA

Skogsbaserad produktion är i högsta grad ett dynamiskt system där skogens kolflöden, lagring av kol i produkter och substitution av fossila råvaror samtliga är kraftigt tidsberoende. En förändrad skogsskötsel sker över en tidsperiod där dynamiska effekter kontinuerligt uppstår. Den traditionella statiska LCA-metoden bedömer miljöpåverkan från processer som sker under produkternas livscykel (ISO 14040, ISO 14044), men missar att ta hänsyn till den exakta tidpunkten för dessa. Därmed är en statisk LCA-metod inte lämpad för analys av dessa tidsdynamiska system. Metodik som kan hantera tidsdynamiken är dock numera tillgänglig, t.ex. Ericsson m.fl. (2013). Denna metodik, som kvantifierar vad IPCC numera benämner som Absolute Global Temperature Change Potential (AGTP), beräknar klimateffekten, till exempel av en träbaserad produkt och dess produktionsprocess, i grader Kelvin över tid (Forster m.fl. 2013), och kan därmed bidra till ett mycket tydligare underlag för strategiska beslut.

De tidigare beskrivna Heureka-simuleringarna gav information i 5-årsintervaller om den stående skogen såväl som de avverkade träden. För att få årliga effekter på skogen, träprodukterna och de fossila emissionerna har 5-årseffekterna linjärt interpolerats. Metodiken bygger på modellerade framtida effekter givet antaganden om skogen, dess skötsel samt samhället och användningen, och ger således endast en approximation av den faktiska effekt som äger rum i verkligheten. Detta är något som måste tas i beaktande vid tolkning och analys av resultaten.

Den potentiella mängden utsläpp av fossila växthusgaser som undviks genom tillhandahållandet av träprodukter, exempelvis genom ersättning av fossila produkter, bedömdes. Detta gjordes på produkternas slutanvändningsnivå genom att matcha träprodukter med deras motsvarande fossilbaserade motsvarigheter. För sågtimmerbaserade träprodukter använda i byggsektorn antogs deras motsvarighet vara betong och stål, medan massavedsbaserade träprodukter som kartong antogs motsvaras

av produkter tillverkade i fossil plast. Dessutom beaktades energisubstitution i form av biobaserad energi som ersättning till exempelvis naturgas. Slutligen inkluderades även substitution med andra träprodukter, exempelvis plywood eller spånskivor som antogs ersätta bland annat gips (Schulte m.fl. 2022). Fossila utsläppsprofiler för de beaktade träbaserade produkterna och deras motsvarigheter, det vill säga den utsläppta mängden CO₂, CH₄ och N₂O per producerad enhet, härleddes från Ecoinvent-databasen, vilken är världens ledande datasystem för centraliserad insamling, beräkning, hantering och tillhandahållande av livscykelanalysdata (Wernet m.fl. 2016), och hölls konstanta under hela den studerade tidshorizonten. En detaljerad beskrivning av varje produktionsprocess som beaktas finns i Schulte m.fl. (2022).

De biogena kolflödena tillsammans med emissioner från värdekedjan, och substitutionseffekterna användes därefter för att beräkna vilken effekt för klimatet det givna alternativet totalt sett resulterade i, samt dess tidsmässiga utveckling. Därigenom kan man se om en viss typ av skogsskötsel har kylande eller värmande effekt på klimatet över tid.

Analysperspektiv

Konsekvensanalys av förändrad skötsel utifrån ett systemperspektiv

På ett övergripande plan finns ett behov att undersöka hur en förändrad skötsel påverkar klimatet över tid när förändringar genomförs. Både i termer av vad som är viktigt för kolflödet under olika tidsperioder, och vad individuella val så som förändring i minsta toppdiameter för timmer har för effekt. Eftersom klimateffekten varierar över tid och beror på vilket skede av omloppscykel som är aktuellt, finns det en poäng i att beskriva de årliga kolflödena fördelat över en omloppstid. Då skötselalternativen har olika långa omloppstider kan en beräkning av den genomsnittliga årliga klimateffekten också stödja jämförelser mellan olika skötselalternativ. Det kan symbolisera resultatet av en förändrad skötsel i ett landsperspektiv, alltså en situation där många bestånd spridda i landskapet och i olika faser beaktas.

Beslutspunktsanalys för en enskild markägare utifrån ett beståndsperspektiv

Det finns idag ett stort intresse bland skogsägare att i sitt brukande också beakta klimataspekter. För att stödja en enskild markägare i sitt brukande genomfördes en beslutspunktsanalys. Där belystes de konkreta skillnaderna som uppstår då markägaren tar verkliga beslut i specifika situationer för ett specifikt bestånd. De beslutssituationer som markägaren står inför, och som analyserades här, var:

- Skogen börjar närma sig åldern för en förstagallring. Är det lämpligt att gallra enligt mall eller kan det vara bra att hoppa över gallringen till förmån för en tidigarelagd slutavverkning?
- Skogen har skötts enligt mall och beståndet börjar närma sig åldern för slutavverkning enligt BAU, alltså med maximerat nuvärde. Vad blir konsekvenserna om man i stället väljer att maximera virkesproduktionen och senarelägga slutavverkningen?

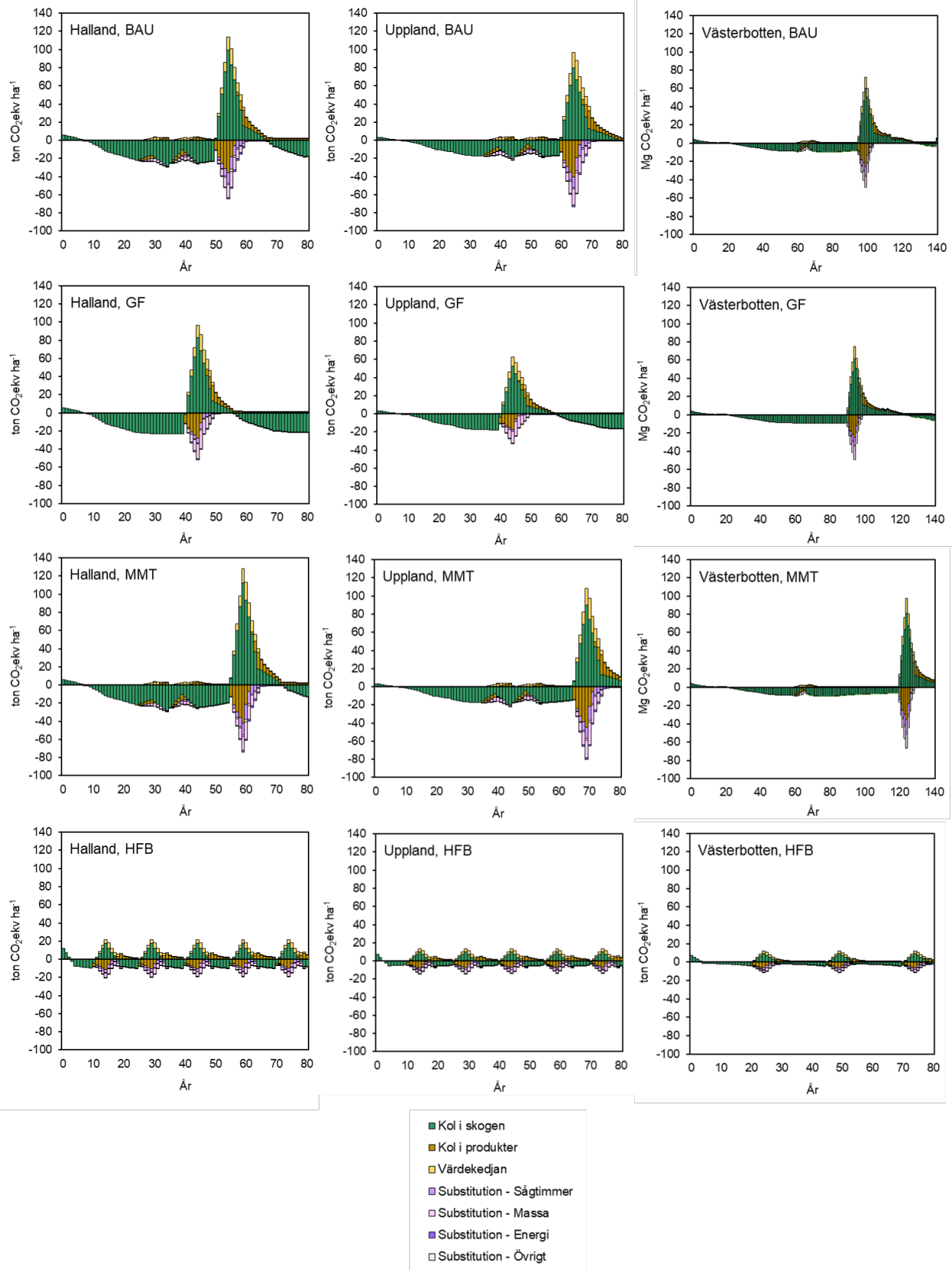
I en beslutspunktsanalys blir inte de hyggessfria metoderna relevanta eftersom övergången till ett flerskiktat bestånd inte görs lika snabbt.

Resultat

Klimat effekt i ett systemperspektiv

Analyserna av de absoluta tidsdynamiska växthusgasflödena visade att de biogena kolflödena från skogen står för de största bidragen i både positiva (utsläpp) och negativa (inbindning) termer för samtliga skötselprogram (Figur 5). I fallen med trakthyggesbruk följs fasen med biogen kolbindning (skogstillväxt) av antingen gallring (BAU, MMT) eller slutavverkning (BAU, GF, MMT), vilket leder till fossila utsläpp av växthusgaser och substitutionseffekter som varierar med andelarna sågtimmer, massaved och bränsleved från det som skördas. Avverkning eller gallring leder till stora omedelbara effekter på kolbalansen samma år som åtgärden, men dessa visas under en 5-årsperiod i Figur 5 på grund av Heureka's sätt att hantera tidsperioder, vilket är en modellartefakt. Efter avverkningen ökar kolinlagringen i produkterna, och under de följande åren sker positiva flöden (utsläpp) på grund av förmultning av kvarvarande biomassa. Tidpunkterna för gallring eller slutavverkning varierade mellan de olika typståndorterna och skötselprogrammen. Ju längre norrut, desto längre tid tog det innan åtgärderna genomfördes. I MMT-fallet sköts slutavverkningen upp, och i GF-fallet utfördes slutavverkningen tidigare jämfört med BAU.

Hyggesfritt med blädning (HFB) har samma principiella mönster som de tre rotationsskogsbruksbaserade skötselprogrammen. Även här sker ett upptag under tillväxtfasen, följt av avgång vid uttag samt tillhörande emissioner kopplade till värdekedjan. Samtidigt som uttaget sker flyttas kol till produkterna som tillsammans med substitution bidrar till negativa flöden. Skillnaden är att HFB har lägre kolflödesförändringar. Enligt HFB-fallet skedde avverkningar och motsvarande växthusgasflöden vart 15:e år i Halland och Uppland, och vart 25:e år i Västerbotten.

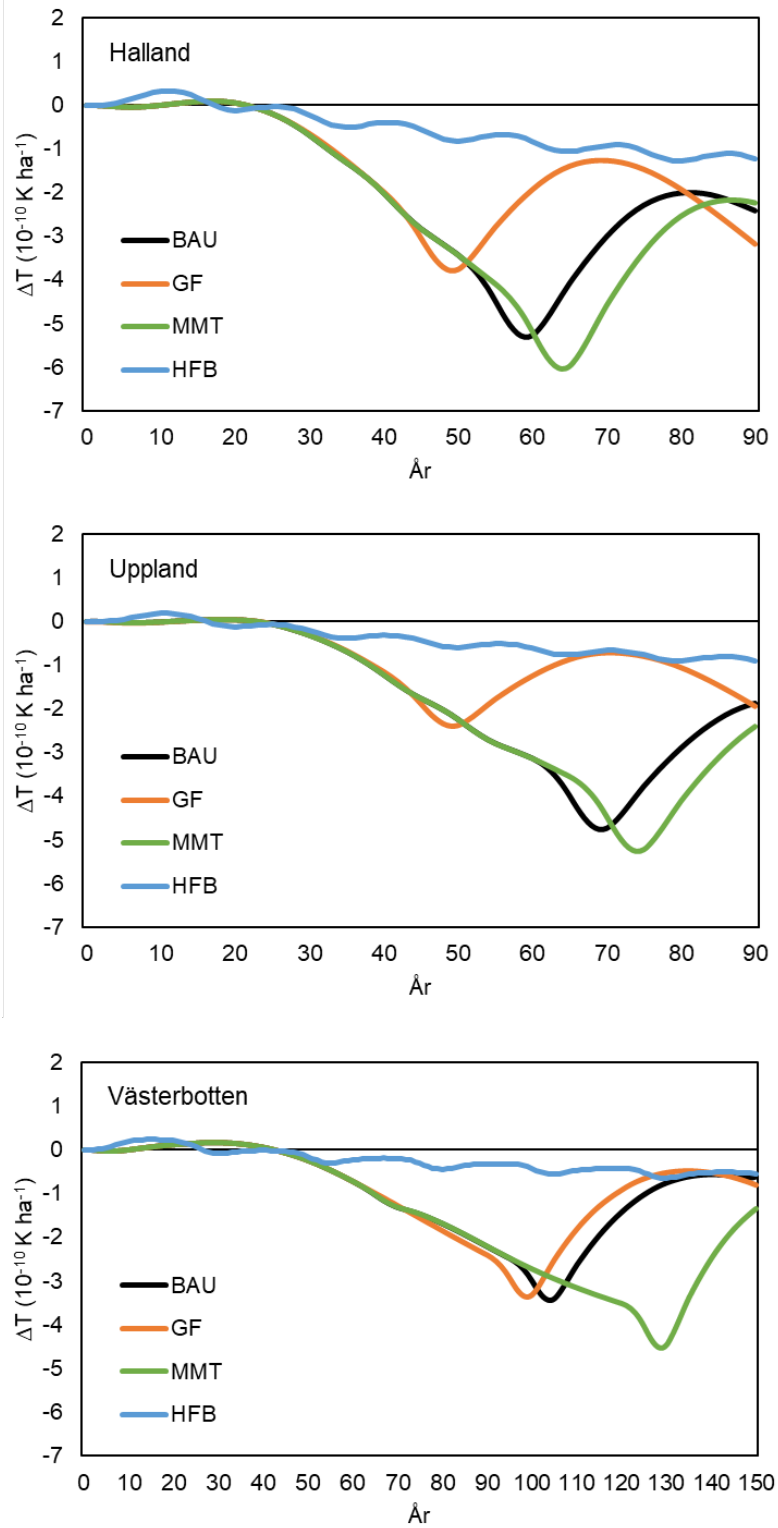


Figur 5. Absoluta tidsdynamiska växthusgasflöden för respektive typståndort och skötselprogram.

Tidsdynamisk temperaturförändring

Analysen av den absoluta globala temperaturförändringen (AGTP), vilket är en konsekvens av de tidsdynamiska växthusgasflödena och trögheten i systemet, visade en ökande klimatkylande effekt över tid oavsett region och skötselprogram, dock med en inledande svag uppvärmande effekt direkt efter avverkning (Figur 6). Den största klimatkylande effekten inträffade strax efter slutavverkningen eftersom temperaturförändringen i atmosfären orsakad av växthusgasflödena också påverkas av den atmosfäriska trögheten (Forster m.fl. 2021). Perioden efter slutavverkning (BAU, GF, MMT) visade på en uppvärmande effekt tills den kylande effekten åter tog överhand. Mönster med kylande och värmande perioder kunde ses även för HFB, och också i detta fall var den övergripande trenden ett svagt kylande över tid. I alla regioner leder HFB till den lägsta klimatkylningseffekten, dock med den minsta variationen i temperaturförändring.

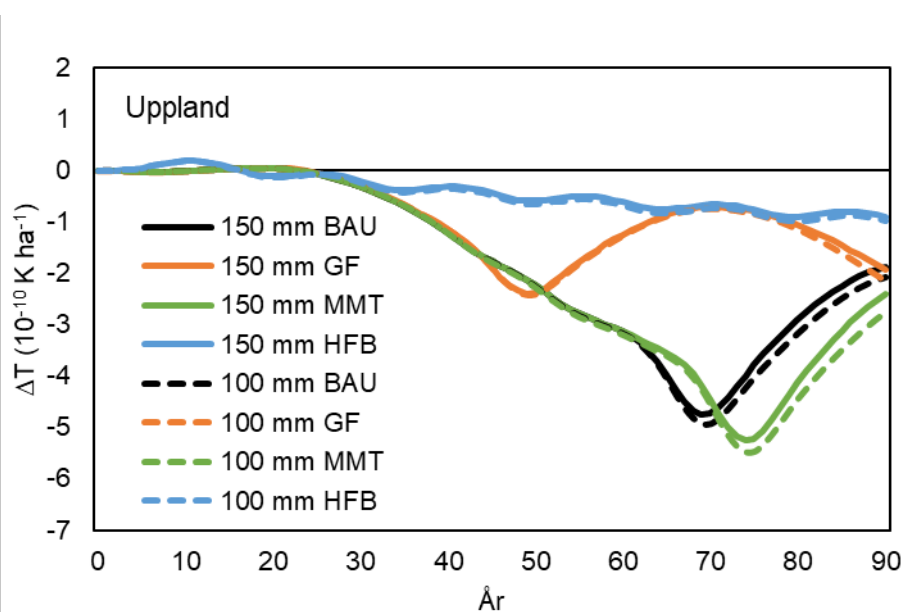
Temperaturförändringen var starkare ju sydligare regionen var (Figur 6). För typståndorterna i Halland och Uppland ledde MMT-fallen till den största klimatkylningseffekten, i Västerbotten MMT-fallet uppvisades liknande resultat under tidshorisonten 0–140 år.



Figur 6. Tidsdynamisk temperaturförändring för de fyra skötselprogrammen i de tre typståndorterna.

Klimat effekt av en förändrad aptering inriktad mot mer timmer

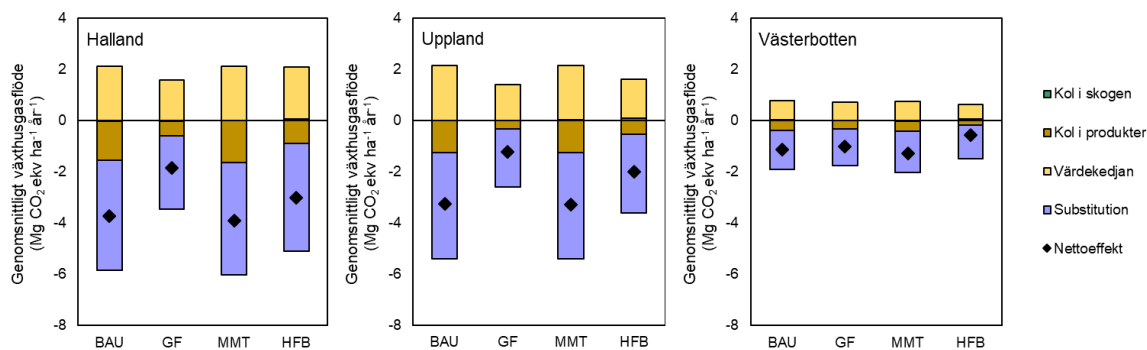
Effekten av en minskning av den minsta sågtimmerdiametern från 15 cm till 10 cm på den absoluta globala temperaturförändringspotentialen visas för Uppland i Figur 7. Oavsett scenario är den totala effekten på klimatprestandan mycket liten och ökar endast mycket svagt över tiden. Jämfört med temperaturförändringsskillnaderna mellan de olika scenarierna kan man därför dra slutsatsen att förändringar i skogsbruket har ett mycket större inflytande på klimatet än förändringar i virkessortimentet under bearbetningen av trä. I enlighet med klimatgradienten från södra till norra Sverige är dessa resultat lite större i söder och mindre uttalade ju längre norrut man kommer.



Figur 7. Tidsdynamisk temperaturförändring av en förändrad aptering inriktad mot mer timmer i Uppland per fall och hektar.

Klimat effektiv skogsskötsel i ett landskapsperspektiv

Samtliga skötselalternativ har såväl klimatpositiva som klimatnegativa bidrag. Tidpunkten och omfattningen av dessa bidrag är beroende av vilket skötselalternativ som studeras. Då omloppstiderna varierar är det svårt att jämföra alternativen och deras totala klimat effekt. Genom att beräkna ett genomsnittligt årligt växthusgasflöde över en omloppstid (BAU, GF, MMT) eller mellan två avverkningstillfällen (HFB) kan de olika fallen jämföras som om fallen var tillämpade på landskapsnivå med bestånd i olika åldrar eller faser jämnt representerade. Beräkningarna visar då att effekten av substitution och emissioner i värdekedjan dominerar växthusgasflödena under sådana förhållanden, förutsatt att deras intensitet skulle förbli stabil över de tidshorisonter som beaktas (Figur 8). Inlagringen av kol i produkter var också betydande, medan inbindning av kol i mark och biomassa i skogen var marginell eftersom det kol som tillfördes genom tillväxt avlägsnades vid de avverkningar som utfördes på landskapsnivå.



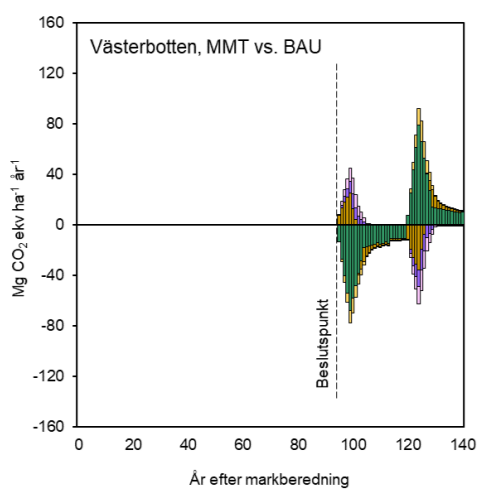
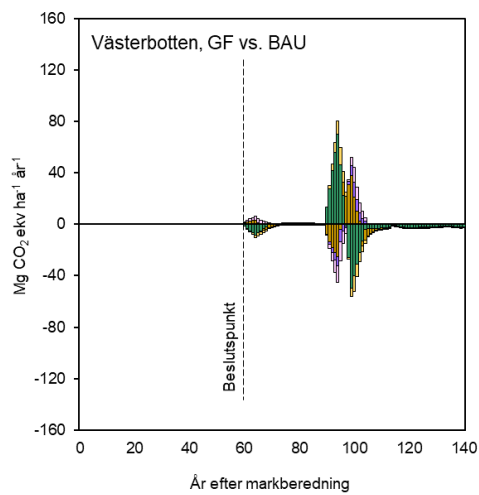
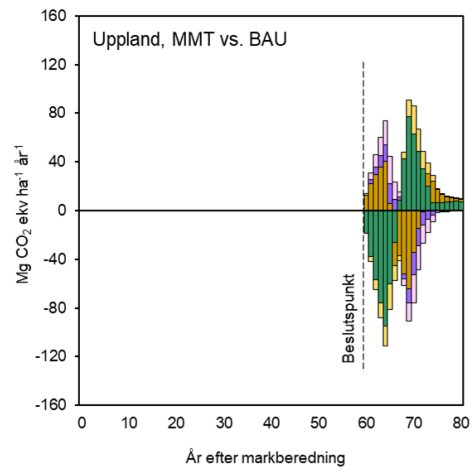
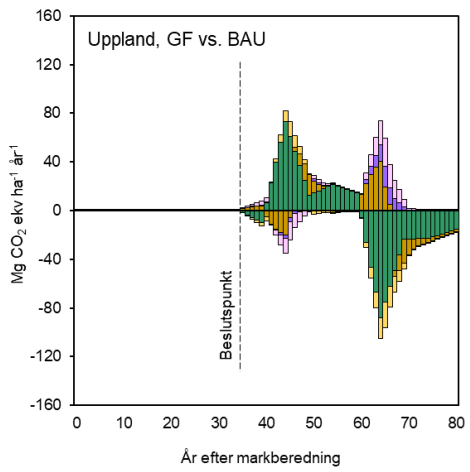
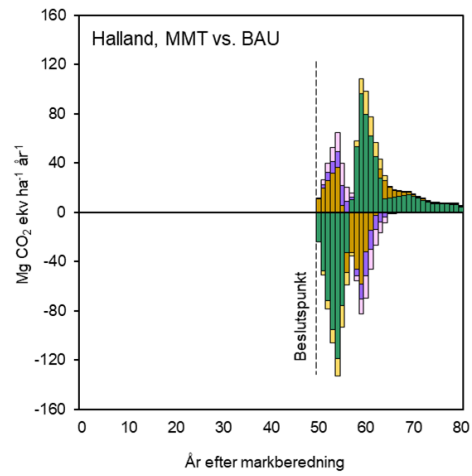
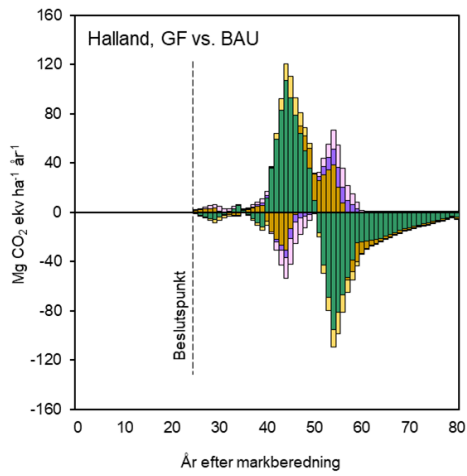
Figur 8. Det genomsnittliga årliga växthusgasflödet under en omloppstid per fall, region och hektar.

BAU- och MMT-fallen uppvisade den största genomsnittliga inbindningen av växthusgaser över en omloppstid oavsett region. Skillnaden dem emellan var liten. För typbestånden i Halland och Uppland var inbindningen lägst för GF-alternativet. Det är tydligt att substitutionseffekterna är lägre i GF-alternativet, men också att emissionerna i värdekedjan blev mindre. Det hyggessfria fallet (HFB) hade något lägre inbindning än BAU och MMT på typståndorterna i samtliga regioner.

Även i Västerbotten gav BAU- och MMT-fallen den största genomsnittliga inbindningen, men där var storleksordningen på flödena betydligt lägre och skillnaden mellan olika fall i absoluta tal liten.

Klimat effektiv skogsskötsel för en enskild markägare

Under en skogs omloppstid från hyggessfas till slutavverkning uppkommer flera tillfällen då en enskild skogsägare behöver ta beslut om skötselåtgärder som påverkar den framtida skogens utveckling, och genom det även framtida växthusgasflöden och i förlängningen klimatets utveckling. När skogen börjar närma sig ålder för en förstagallring kan beslut tas att gallra eller att låta skogen fortsätta växa till förmån för en tidigarelagd slutavverkning. I ett äldre bestånd kan beslut tas att förlänga omloppstiden. I beslutspunktsanalysen i denna studie belystes effekten av dessa två val genom att jämföra växthusgasflödena vid GF- respektive MMT-fallen med BAU-fallet (Figur 9).

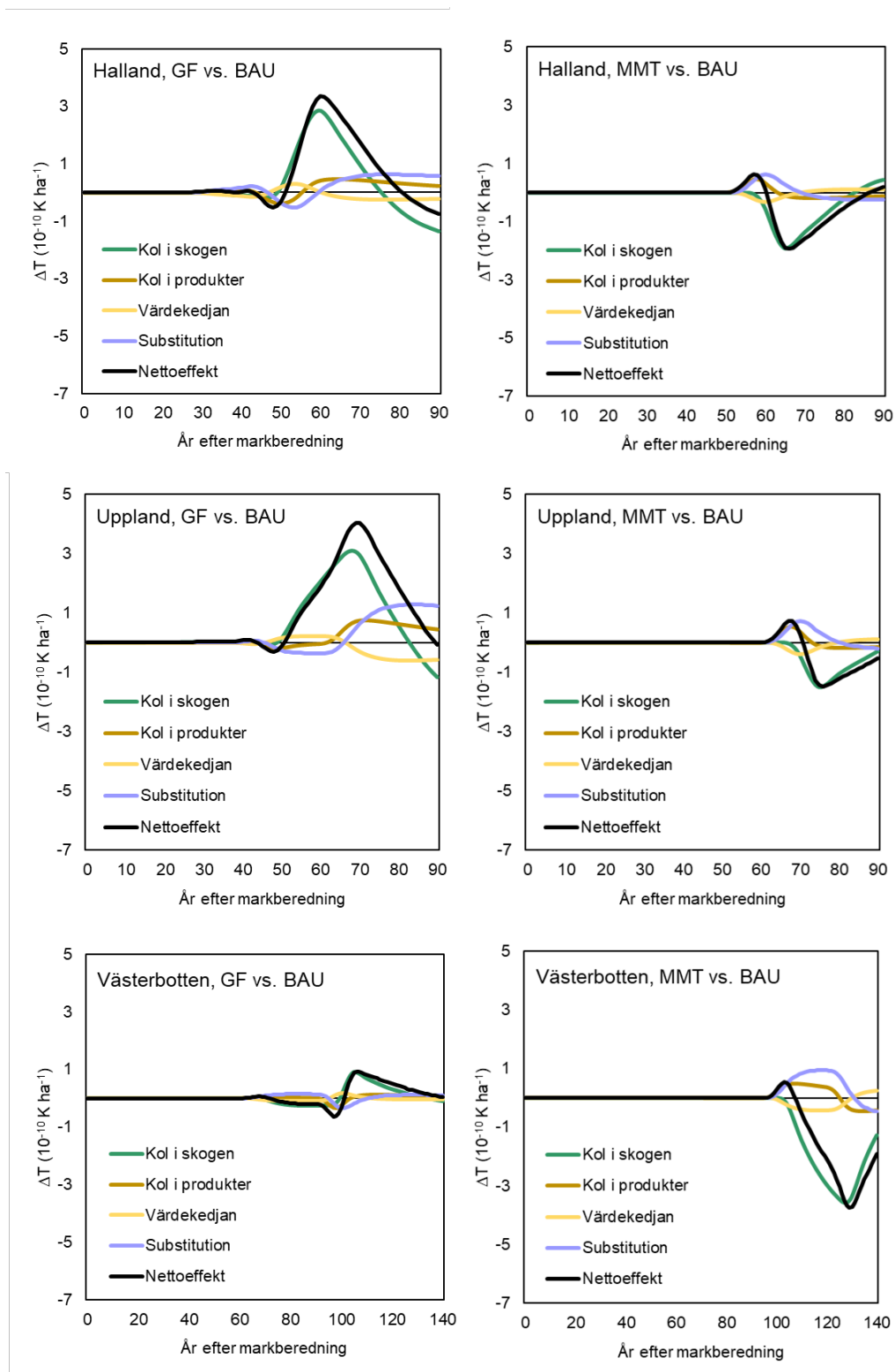


- Kol i skogen
- Kol i produkter
- Värdekedjan
- Substitution – Sågtimmer
- Substitution – Massa, energi & övrigt

Figur 9. Årliga växthusgasflöden för GF- och MMT-fallen relativt BAU-fallet för de tre regionerna. Negativa värden anger ett större växthusgasupptag för GF eller MMT jämfört med BAU. Observera att tidsskalan för Västerbotten är längre än för de två sydligare regionerna och substitution för "övrigt" här är inkluderad i kategorin massa & energi.

I början av omloppstiden, innan tid för beslutspunkt, fanns inga skillnader i klimatpåverkan för GF-fallet jämfört med BAU-fallet (Figur 9, vänster kolumn). Först när den första gallringen genomfördes kunde en förändring i växthusgasflödena observeras gentemot GF-fallet. Effekterna av den uteblivna gallringen var relativt små jämfört med de större skillnaderna som kunde ses några år senare, då slutavverkningen kom betydligt tidigare för GF-fallet. Tiden efter GF-fallets slutavverkning kännetecknades av höga förluster (utsläpp av det biogena kolförrådet i skogen i GF-fallet relativt BAU-fallet). Under de efterföljande årtiondena, när slutavverkningen skedde i BAU-fallet, ändrades detta mönster och GF-fallet redovisar en skoglig kolfördel vid en jämförelse med BAU-fallet.

När man jämför fallet med en förlängd omloppstid (MMT) med BAU-fallet syns återigen inga effekter förrän den slutliga avverkningen i BAU-fallet inträffar (Figur 9, höger kolumn). Vid denna tidpunkt skulle MMT-fallet leda till en ytterligare ökad inbindning av kol i skogen, eftersom skogen ännu inte har avverkats. Under efterföljande årtionden sker dock även slutavverkningar enligt MMT-fallet, vilket leder till ett utsläpp av växthusgaser. I allmänhet finns det ett motsatt samband mellan en vinst i skogskol och fossila skogsindustriutsläpp å ena sidan, och en förlust i kol i produkterna och fossila utsläppsreduceringar från substitutionseffekter.



Figur 10. Den atmosfäriska temperaturförändringen för GF- och MMT-fallen relativt BAU-fallet för de tre regionerna. Observera att tidsskalan för Västerbotten är längre än för de två sydligare regionerna.

De resultat som kan dras från beslutspunktsanalysen baserat på växthusgasflödena överensstämmer i stort med den analys som baseras på den atmosfäriska temperaturförändringen (Figur 10). Sammantaget gör dock trögheten i det atmosfäriska

systemet att effekten av växthusgasutsläppen och kolinbindningen skjuts upp några år. Dessutom, om till exempel utsläppen överskrider inbindningseffekterna, fungerar nettotemperaturförändringen fortfarande som ett nettoutsläpp under några decennier, vilket kan observeras när man jämför GF med BAU-fallet för Halland och Uppland.

Diskussion

Klimat effektivitet i olika skalor

I den stora skalan är skogssektorn viktig för Sveriges klimatarbete. I Naturvårdsverkets rapportering av de årliga territoriella utsläppen står markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk, den så kallade LULUCF-sektorn (Land-use, land-use change and forestry), för stora kolsänkor. År 2022 uppgick de till 41,2 miljoner ton koldioxidekvivalenter (Naturvårdsverket 2024). En medelsvensks konsumtionsbaserade växthusgasutsläpp låg 2021 på 8,4 ton (Naturvårdsverket 2023).

I den lilla skalan, för en enskild skogsägare, kan också skogen spela en stor roll. Givet de klimatteffekter som redovisas i den här rapporten har den enskilde markägarens val av skötselmetod betydelse utifrån ett klimatperspektiv. Det är inte något som bara påverkar i marginalen utan det har ett signifikant värde, både för den enskilda markägaren, och aggregerat upp på samhällsnivå. Hur olika val i det enskilda brukandet påverkar kol och klimat blir tydligt när konsekvenser av ett vägval, en så kallad beslutspunkt, illustreras. Står den enskilda skogsägaren idag vid en beslutspunkt kan studien hjälpa till ett mer informerat beslut. Man bör dock notera att osäkerheterna kring antaganden och systemförändringar ökar med tiden. Om 50 år kan mycket ha hänt som påverkar en sådan beslutssituation.

Resultaten pekar på vad som är klimat effektiv skogsskötsel utifrån studiens upplägg, antaganden och förutsättningar. Lärdomar från vad som påverkar resultaten och när effekter uppstår i de tre typständerna och de fyra skötselprogrammen kan användas vid diskussioner kring klimat effektiv skogsskötsel i framtiden. Det finns inget entydigt svar på vad som är den mest klimat effektiva skogsskötseln. Dock belyser den här studien att, i ett landskapsperspektiv där kolförändringar i skogen jämnar ut sig, blir substitutionseffekterna, kol i produkter samt emissioner i värdekedjan viktiga, förutsatt att effekterna kvarstår på sina nuvarande nivåer även i framtiden. Ett hyggesfritt system med blädningsbruk leder till mindre, men också jämnare kolflöden över tid. Översatt till temperaturrespons spelar de svenska skogarna en viktig roll, där det är tydligt att oavsett hur de brukas kommer de att bidra till en klimatkylande effekt över tid, dock av olika magnitud och i olika tidsskalor.

Vid bedömning av vad som är klimatomått optimal skötsel spelar tidsperspektivet också roll. Man kan argumentera att den skogsskötsel som över tid ger de bästa klimatomått fördelarna är att föredra, alltså de alternativ som i snitt ger det bästa årliga växthusgasflödet. Å andra sidan kan man argumentera för att en bättre växthusgasbalans i närtid är mer prioriterat, även om det kan vara på bekostnad av sämre balans över tid.

Resultaten från studien bekräftar tidigare studier som säger att ju längre söderut i Sverige, desto större inverkan har skogsbruket på förändringen av klimatteffekterna. (Skytt m.fl. 2021, Petersson m.fl. 2022).

Dessutom bekräftar studiens resultat tidigare konstateranden kring att vinsten i biogen kollagring i träprodukter tillsammans med den ytterligare substitutionseffekten inte isolerat kan kompensera för förlusten av biogent kol i skogens ekosystem när avverkning sker (Soimakallio m.fl. 2022).

Vid diskussion kring klimateffektivitet bör poängteras att den här studien bygger på konsekvenser av kolförändringar som drivande krafter till temperaturresponser. Studien har inte beaktat att en förändrad skogsskötsel också påverkar de biogeofysiska förutsättningarna, till exempel ytans albedo, mängden areosoler eller atmosfärisk turbulens. Det råder idag en osäkerhet kring hur stora dessa effekter är.

Produkter, cirkularitet och substitution

Resultaten visar att vilka produkter som de olika skötselalternativen levererar påverkar den årliga klimateffekten. I Halland och Uppland är det tydligt att det gallringsfria systemet som levererar relativt sett sämre virke, alltså mindre timmer och mer massa, vid slutavverkning också får lägre substitutionseffekter och mindre kol i produkter. Det blir därför viktigt att beakta att olika skötsel också resulterar i en råvara med skilda egenskaper och kommer därigenom att påverka vilka olika typer av produkter som kan tillverkas.

En sänkning av minimidiametern för sågtimmer från 150 till 100 mm gav en klimatkylande effekt, dock av mindre magnitud än flera av förändringarna kopplade till ett ändrat skogsskötselprogram. Den extra timmervolymen som möjliggjordes var dock inte så stor, på grund av den relativt sett mindre volymen i klena dimensioner samt det sämre sågutbytet i dessa. Förutsatt att det finns en industri och en avsättning för klintimmer är det en intressant förändring, eftersom den kan realiseras snabbt utan en långsam skoglig omställning.

Framtidsanalyser är alltid osäkra och den här studien har visat att vilka produkter som kommer ut från systemen har stor påverkan på resultaten. Det är inte orimligt att tänka att efterfrågan på mer långlivade och klimatsmarta produkter kommer att öka. Ett framtida mer cirkulärt samhälle som värdesätter och hushållar med de gröna kolatomerna bättre motiverar en skog som är duktig på att fånga in kol. Idag är många av massaindustrins produkter inte långlivade, även om de fyller ett stort samhällsbehov. Å andra sidan kan de redan idag användas till mer långlivade produkter, till exempel träfiberisolering i byggnader, som då blir en kolsänka för lång tid och hjälper till att öka mängden skogligt kol i samhället. Användarfasen och minskad konsumtion bör inkluderas när ett klimateffektivt samhälle diskuteras. Idag har många byggnadsprodukter en relativt kort livslängd. De byts många gånger ut långt innan den tekniska livslängden är uppnådd. Orsaken kan vara att, i ett historiskt perspektiv, är byggnadsmaterial idag relativt billigt i jämförelse med arbetstid, vilket motverkar ett resurseffektivt tänk.

Vid analys av resultaten är det rimligt att fundera kring vilka av komponenterna som kan förändras och påverkas av olika faktorer. Utsläppen i värdekedjan är en sådan komponent där mycket fokus idag läggs på energieffektivitet och fossilfrihet vilket bör påverka framtida resultat.

Substitutionseffekterna, alltså vad de skogliga alternativen har möjlighet att ersätta, kommer med största sannolikhet också förändras över tid. I studien antogs de vara konstanta över studietiden, men rimligen sker förändringar också i de sektorer som idag använder, eller i framtiden kommer att använda, skogliga alternativ. Det pågår till exempel ett ambitiöst klimatarbete i både cement- och stålindustrin. Det är inte troligt att

klimatavtrycket av de produkter som idag substitueras ser lika ut i framtiden. Å andra sidan kan behov av gröna kolatomer uppstå i andra sektorer som idag inte använder skoglig råvara, både nationellt och globalt, vilket kan motivera fortsatta substitutionseffekter. I tillägg kan en smart kaskadanvändning möjliggöra större substitutionseffekter fler gånger om träfibern maximerar klimatvärdet och dessutom används flera gånger. Ett mer cirkulärt tänkande i design och användande av träbaserade produkter kan motivera högre substitutionseffekter utifrån perspektivet av skogssektorn, medan ett generellt sett klimateffektivare eller resurssnålare samhälle motiverar lägre substitutionseffekter.

Kvaliteten på skattningarna för substitutionseffekterna och dess emissioner kommer också påverka resultatet. Dessa är väldigt situationsspecifika och litteraturvärden som används reflekterar situationen kring 2019–2022 och kan därmed ha förändrats.

Avvägningar och målkonflikter kring val av skötselprogram

I verkligheten finns ofta ett behov av att vara både situationsanpassad och pragmatisk i sitt brukande. Verkliga beslut bygger alltid på avvägningar mellan en rad olika preferenser och faktorer. Klimateffektivitet är såklart inte det enda som påverkar hur man prioriterar sin skogsskötsel. Det finns en rad andra aspekter där de ekonomiska ramarna är väldigt viktiga för många skogsägare.

De simuleringar som gjorts i Heureka inkluderar skillnad i mortalitet för bestånden. Däremot tas ingen hänsyn till storskaliga förändringar i risk för till exempel omfattande barkborreskador, storm eller brand som induceras av den principiellt förändrade skötseln. Motiv för att överväga gallringsfria system kan vara höga drivningskostnader eller stora risker med att låta skogen stå länge. Privatekonomiskt och med beaktande av rådande ränteläge och riskvärdering kan det vara intressant att skapa en intäktsmöjlighet tidigare i omloppscykeln. Utifrån ett klimatperspektiv är det dock inte motiverat. Exempel på skog brukad med gallringsfria system finns för Sitkagran i Skottland. Ett gallringsfritt skogsbruk leder ofta till kortare omloppstider och därmed även mindre risk för allvarliga stormskador (Gardiner 2021), men också genom att gallringstillfället i sig öppnar upp för en ökad skaderisk.

Skötselprogrammet som siktar mot en maximerad medeltillväxt, alltså en förlängd omloppstid, kan ha klimatomässiga förtjänster enligt studien, speciellt om en klimatkylande effekt i närtid är prioriterad och ett beslut om förnygringsavverkning är nära förestående. För den enskilde skogsägaren kan det dock leda till osäkerhet och ökade risker för skogsskador så som exempelvis brand, barkborre och storm.

När det gäller HFB förutsätter den här studien ett flerskiktat bestånd lämpligt för skötsel med hyggesfria metoder som ingångsläge. För enskiktade trakter som brukats med trakthyggesbruk över tid krävs en längre övergångsperiod innan man hamnar i det startläget. Den övergångsfasen har inte utvärderats i den här analysen.

De skötselalternativ som studeras kan även innebära påverkan på andra ekosystemtjänster som kan påverka det enskilda brukandet. En förlängd rotationsperiod kan exempelvis ses som fördelaktig för andra ekosystemtjänster.

Modellering av blädning

En metodmässig utmaning med att modellera skogstillståndets utveckling för blädningbrukande är att de hyggesfria metoderna har liten empiri att bygga på. De är inte särskilt väl dokumenterade och beskrivna i tidigare försök och skogliga

uppföljningar. Det finns osäkerheter både i hur Heureka hanterar dem samt vad som produktmässigt kommer ut från dem. Detta beror bland annat på hur lyckosam en naturlig föryngring är i ett blädningssystem, som i våra analyser har antagits vara tillfredställande. Antagandet om lägre virkesproduktion i HFB, 80 procent av BAU, är inte en naturlag utan det bör vara möjligt att öka virkesproduktionen i dessa system med rätt fokus, kunskap och insatser.

Småskaliga skador såsom självgallring och enstaka träd som förloras i stormar är inkluderat i analyserna i Heureka, men i övrigt togs ingen hänsyn till att olika skötselprogram kan innebära ökade risker för storskaliga skador på skogen. Eventuella skador vid återkommande blädningsbruk kan exempelvis leda till ökad risk för röta, som i sin tur även kan påverka produktutfallet. En förlängd omloppstid kan leda till risk för ökad dödlighet, genom till exempel snöbrott, brand, stormskador samt barkborreangrepp.

Hantering av markkol

Eventuella kolförrådsförändringar i marken mellan olika skötselprogram är inte helt jämförbara. En anledning är den modell som användes för att simulera kolförrådet i Heureka (Q-modellen) har ett utgångsläge där markens kolpooler, såsom färsk förna, humus och stubbar samt rötter av olika ålder och kvalitet, saknas. För att bygga upp detta kan modellen först simuleras under en period. I den här studien användes därför den andra omloppstiden i BAU-, GF- och MMT-fallen och andra perioden i HFB-fallet för att beskriva utvecklingen av det biogena kolet. Detta innebär att markkolsförhållandena i startläget har en individuell historik för de olika fallen. En utmaning är hanteringen av pooler som bryts ner långsamt, till exempel stubbar. Om denna försimulering i stället hade gjorts för en så lång tidsperiod att ett jämviktsläge nåtts (steady-state) för respektive skogsskötselprogram och detta förhållande skulle användas som utgångspunkt, skulle följden bli att det därefter inte skulle gå att se någon trend i markkolförrådsförändringar, även om det finns en dynamik under en omloppstid framför allt orsakat av tillförsel av stubbar, rötter och grenar vid avverkningar, men även det naturliga förnafallet.

I denna studie har effekterna på biogent kol i skog och mark redovisats sammanslagna och inte särredovisade. Effekten på markens kolförråd från Heureka-simuleringarna var i sammanhanget liten och uppvisade mindre dynamik än biomassans kolförråd.

Slutsatser

- För en enskild markägare har val av skötsel en direkt påverkan på klimateffekten, och det är vid de enskilda beslutspunkterna (gallring respektive föryngringsavverkning) som hen har en möjlighet att påverka den framtida utvecklingen och därigenom klimateffektiviteten för det enskilda beståndet över tid.
- Ett aktivt skogsbruk med uttag och användning av de skogliga produkterna, oaktat om trakthyggesbruk eller hyggesfria metoder används, kommer leda till en klimatkylande effekt över tid, främst på grund av skogarnas förmåga att binda koldioxid. Den klimatkylande effekten är dock av olika magnitud och ser olika ut över tid beroende på var i landet och på vilket sätt brukandet sker.
- Skötselprogram med högst volymproduktion ger den största klimatkylande effekten över tid. Den studerade hyggesfria metoden hade en lägre klimatkylande effekt än de trakthyggesbruksbaserade alternativen, givet den antagna lägre skogsproduktionen. Däremot hade det hyggesfria alternativet en mindre klimatmässig fluktuation.
- Val av skogsskötselprogram påverkar vilka produkter som kan levereras. Den här studien visade att det i sin tur har stor påverkan på klimateffekten. Det är tydligt att den gallringsfria metoden, som levererar mindre timmer och mer massaved, får sämre klimateffekt på grund av detta.
- Klimateffekten påverkades av såväl tidsskalan som utgångsläget. Klimateffekten för de trakthyggesbaserade skötselprogrammen varierade mer över tid, vilket innebar att beroende på i vilket skede av brukandet man är och när man vill prioritera en stor klimatkylande effekt kan olika system vara att föredra. För dessa skötselprogram var även ökningen av kol lagrat i trädbiomassa betydelsefull eftersom det utgick från ett kalhygge med liten biomassa.
- Att öka timmeruttaget genom att sänka minimidiametern för timmer hade en relativt liten effekt på klimatnyttan. Åtgärden bör ändå inte negligeras då det är en klimatkylande åtgärd som kan realiserats utan stora och långsamma skogliga förändringar.

Referenser

- Ericsson, N., C. Porsö, S. Ahlgren, Å. Nordberg, C. Sundberg, & P.-A. Hansson. 2013. Time-dependent climate impact of a bioenergy system - methodology development and application to Swedish conditions. *GCB Bioenergy*, Vol. 5(5): 580–90. doi: 10.1111/gcbb.12031.
- Ekholm, A., Axelsson, P., Hjältén, J., Lundmark, T., & Sjögren, J. 2022. Short-term effects of continuous cover forestry on forest biomass production and biodiversity: Applying single-tree selection in forests dominated by *Picea abies*. *Ambio*, 51(12), 2478-2495.
- Fahlvik, N., Elfving, B., & Wikström, P. (2014). Evaluation of growth functions used in the Swedish Forest Planning System Heureka. *Silva Fennica*, 48(2).
- Forster, P.; T. Storelvmo; K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer (2021): The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Fredriksson, M. 2023. Personlig kommunikation.
- Gardiner, B. 2021. Wind damage to forests and trees: a review with an emphasis on planted and managed forests, *Journal of Forest Research*, 26:4, 248-266, DOI: 10.1080/13416979.2021.1940665
- Hyll, K., Möller, J., Eriksson, I., Arlinger, J., Wilhelmsson, L., Ohlström, A., Lindgren, N. 2024. Prediktion av egenskaper hos virke baserat på skördardata. Arbetsrapport 1202-204. Skogforsk.
- ISO 14040. <https://www.sis.se/produkter/ledningssystem-e07bofe8/ledningssystem-for-miljo/sseniso140402006/>
- ISO 14044. <https://www.sis.se/produkter/ledningssystem-e07bofe8/ledningssystem-for-miljo/sseniso140442006/>
- Lämås, T., Sängstuvall, L., Öhman, K., Lundström J., Årevall, J., Holmström, H., Nilsson L., m.fl. 2023. The multi-faceted Swedish Heureka forest decision support system: context, functionality, design, and 10 years experiences of its use. *Front. For. Glob. Change*, Vol. 6. doi: 10.3389/ffgc.2023.1163105.
- Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Skogstaxering, Rapport 45. 73 pp. ISSN 0348-0496. (In Swedish).
- Möller, J.J., Bhuiyan, N., Arlinger, J., Hannrup, B., Eriksson, I., & Söderberg, J. 2024. hprYield – beräkningsmodul för generering av geografiskt uppdelade nyckeltal baserat på skördardata. Opublicerat manuskript. Skogforsk.
- Naturvårdsverket 2024. Nettoutsläpp och nettoupptag av växthusgaser från markanvändning (LULUCF), [<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/klimat/vaxthusgaser-nettoutslassp-och-nettoupptag-fran-markanvandning/>], Uppdaterad 12 Jan 2024.

Naturvårdsverket 2023. Konsumtionsbaserade växthusgasutsläpp per person och år, [<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/konsumtion/vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-per-person>], Uppdaterad 17 Okt 2023.

<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/konsumtion/vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-per-person>

Ogemark, T., Arlinger, J., Sondell, J. 2000. Användarhandledning - Aptan. Stencil Skogforsk.

Petersson, H., D. Ellison, A. Appiah Mensah, G. Berndes, G. Egnell, M. Lundblad, T. Lundmark, A. Lundström, J. Stendahl, and P.-E. Wikberg. 2022. On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden. *GCB Bioenergy*, Vol. 14(7): 793–813. doi: 10.1111/gcbb.12943.

Petersson, H., and Ståhl, G. 2006. Functions for below-ground biomass of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21(S7): 84-93. <http://dx.doi.org/10.1080/14004080500486864>

Schulte, M., R. Jonsson, T. Hammar, J. Stendahl, and P.-A. Hansson. 2022. Nordic forest management towards climate change mitigation: time dynamic temperature change impacts of wood product systems including substitution effects. *Eur J Forest Res.* doi: 10.1007/s10342-022-01477-1.

Skytt, T., G. Englund, and B. G. Jonsson. 2021. Climate mitigation forestry—temporal trade-offs. *Environmental Research Letters*, Vol. 16. doi: 10.1088/1748-9326/ac30fa.

Soimakallio, S., H. Böttcher, J. Niemi, F. Mosley, S. Turunen, K. J. Hennenberg, J. Reise, and H. Fehrenbach. 2022. Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon. *Global Change Biology Bioenergy*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12981>.

Söderberg, J., Willén, E., Möller, J.J., Arlinger, J. och Bhuiyan, N. 2017. Utvärdering av utbytesprognoser med skogliga laserskattningar och skördardata – resultat från tre fallstudier. Arbetsrapport 937. Skogforsk.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>

Wikström, P., Edenius, L., Elfving, B., Eriksson, L. O., Lämås, T., Sonesson, J., Öhman, K., Wallerman, J., Waller, C., Klintebäck, F. 2011. The Heureka forestry decision support system: an overview.

Ågren, G.I., and Hyvönen, R. 2003. Changes in carbon stores in Swedish forest soils due to increased biomass harvest and increased temperatures analysed with a semi-empirical model. *Forest Ecology and Management* 174(1): 25-37. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00025-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00025-7)

Ågren, K., Wilhelmsson, L., Högbom, L., Nordström, M. och Sonesson, J. 2023. Beräkningar av kolbalanser för Sveaskogs innehav, Arbetsrapport 1156. Skogforsk.