

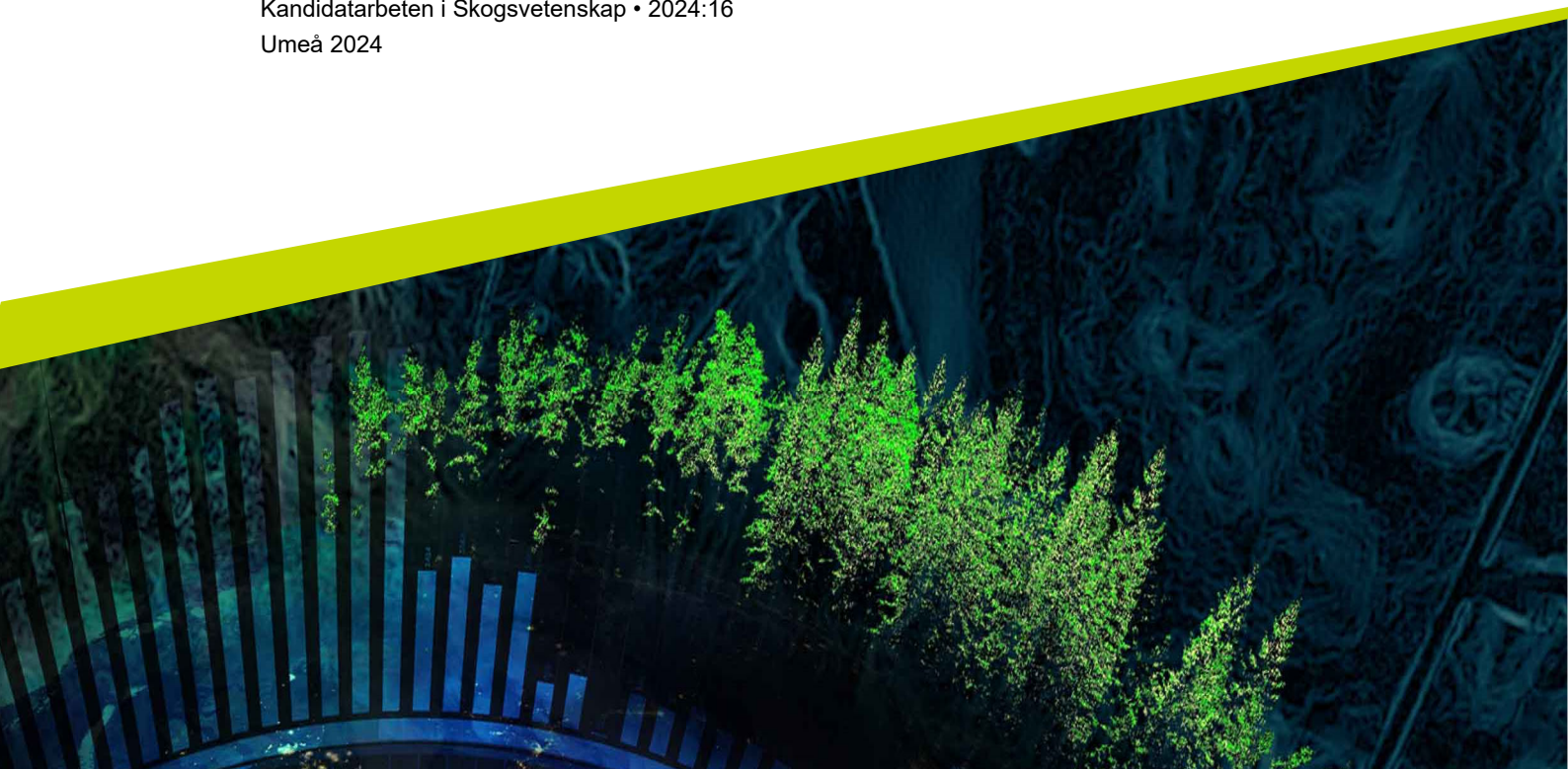


Kollagrets roll i skogsskötseln

Strategier för ett kort-, medellångt- och långt tidsperspektiv

Moa Olsson & Klara Logård

Kandidatarbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Fakulteten för skogsvetenskap
Institutionen för skogens ekologi och skötsel
Skogsvetarprogrammet
Kandidatarbeten i Skogsvetenskap • 2024:16
Umeå 2024



Kollagrets roll i skogsskötseln. Strategier för ett kort-, medellångt- och långt tidsperspektiv.

Moa Olsson & Klara Logård

Handledare: Karin Öhman, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning

Examinator: Torgny Lind, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning

Omfattning: 15 hp

Nivå och fördjupning: Grundnivå, G2E

Kurstitel: Självständigt arbete i Skogsbruksvetenskap

Kurskod: EX1015

Program/utbildning: Skogsvetarprogrammet

Kursansvarig inst.: Institutionen för skogens ekologi och skötsel

Utgivningsort: Umeå

Utgivningsår: 2024

Upphovsrätt: Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.

Serietitel: Kandidatarbeten i skogsvetenskap

Delnummer i serien: 2024:16

Nyckelord: Kollager, Kolförråd, Heureka, PlanVis, Skötselsystem, Skogsskötsel, Diskontering

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för skogsvetenskap

Institutionen för skogens ekologi och skötsel

Sammanfattning

Skogens roll för att minska risken för ett varmare klimat är omtvistad. Vissa menar att det är viktigt att minska avverkningarna i skogen och fokusera på att ett stort kollager. Andra hävdar att störst klimatnytta fås från skogen genom substitutionseffekten, vilket kan betyda att skogen bör brukas som idag eller intensivare. Vad forskningsresultaten visar beror helt på vilka perspektiv som används. Det kan vara om det är ett stort kollager eller om det är kolinbindningen som är det viktiga, om man ser på landskapsnivå eller beståndsnivå, vilket tidsperspektiv man har, om substitution vägs in eller inte och hur de andra ekosystemtjänsterna vägs in. Det är således svårt att säga på vilket sätt skogen ska brukas för störst klimatnytta.

Denna studie syftar till att undersöka hur skötseln av skogen förändras beroende på när det är viktigast att maximera kolförrådet. Detta görs utifrån tre olika tidsperspektiv: kort, medellångt och långt. För att vikta skötseln beroende på tidsperspektivet diskonterades kolförrådet till dagens värde med olika räntor som representerar varje tidshorisont. Beslutsstödsystemet Heureka PlanVis användes som analysverktyg, där det skapades fyra scenarion med olika förutsättningar för hur skogen fick skötas.

Resultaten visade på att för att ha ett stort kollager i skogen är det generellt sett bra att låta skogen stå, samt att gödsla om möjlighet finns. Med ett kort tidsperspektiv, där inga avverkningskrav fanns, premierades att låta skogen stå orörd. När det fanns avverkningskrav premierades i stället hyggesfriskötsel framför att låta skogen stå, men där var resterande arealer mer fördelade över olika förlängda omloppstider. Vid medellångt tidsperspektiv utan avverkningskrav premierades också att låta skogen stå, men i fallet där gödsling tilläts sköttes relativt stor andel med en förlängd omloppstid på 41–50 år. Vid avverkningskrav sköttes den största andelen fortfarande genom att låta skogen stå orörd, men även en stor del sköttes med hyggesfri skötsel och olika förlängda omloppstider. Vid ett långt tidsperspektiv premierades för alla scenarion att låta skogen stå.

Abstract

The role of forests in the climate debate is disputed. Some argue that it is important to reduce forest harvesting and focus on maintaining a large carbon stock. Others claim that the greatest climate benefit from forests comes from the substitution effect, which may mean that forests should be managed similarly as today or even more intensively. What research results shows depends entirely on the perspectives used. It may involve whether a large carbon stock or carbon sequestration is important, whether one looks at the landscape level or the stand level, the time perspective considered, whether substitution is factored in or not, and how other ecosystem services are weighed in. Therefore, it is difficult to say how forests should be managed for the greatest climate benefit.

This study aims to investigate how forest management changes depending on when it is most important to maximize the carbon stock. This is done from three different time perspectives: short-, medium-, and long-term. To weigh management depending on the time perspective, the carbon stock was discounted to its present value with different interest rates representing each time horizon. The decision support system Heureka PlanVis was used as an analysis tool, where four scenarios with different conditions for forest management were created.

The results showed that to maintain a large carbon stock in the forest, it is generally beneficial to let the forest be unmanaged and to fertilize if possible. In a short-term perspective, where there were no harvesting requirements, the favoured management strategy was to let the forest be unmanaged. When there were harvesting requirements, continuous cover forestry was preferred and the remaining areas were more distributed over various extended rotation periods. In the medium-term perspective without harvesting requirements, the unmanaged strategy was also favoured. But in the case where fertilization was allowed, a relatively large proportion was managed with an extended rotation period of 41–50 years. With harvesting requirements, the largest proportion was still unmanaged, but also a significant portion under continuous cover forestry and various extended rotation periods. In the long-term perspective, letting the forest be unmanaged was favoured in all cases.

Tack

Denna uppsats är ett kandidatarbete motsvarande 15 hp på Skogsvetarprogrammet, skriven under våren 2024.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Karin Öhman, institutionen för skoglig resurshushållning, SLU. Hennes vägledning i Heureka, feedback på våra idéer och värdefulla tips har varit mycket uppskattat under vägens gång.

Vi vill även rikta ett tack till varandra för ett bra samarbete, många skratt och stöttning under arbetet med projektet.

Umeå, 21 maj 2024
Moa Olsson & Klara Logård

Innehållsförteckning

1. Inledning	11
1.1 Syfte och frågeställning	12
2. Bakgrund	13
2.1 Sveriges skog	13
2.2 Kolet och skogen	13
2.3 Hållbart skogsbruk inom EU	15
2.4 Sveriges skogsbruk: Balans mellan hållbarhet och resursutnyttjande	16
2.5 Tidigare forskning	17
3. Metod	19
3.1 Data	19
3.2 Heureka	20
3.3 Tillvägagångssätt	21
3.3.1 Scenarion	22
3.3.2 TPG: domänindelning	23
3.3.3 TPG: skötselstrategier	23
3.3.4 Optimering	24
3.3.5 Indikatorer	27
3.4 Avgränsningar	27
4. Resultat	28
4.1 Area per skötselstrategi	28
4.2 Totalt kollager	29
4.3 Avverkad volym per period	31
4.5 Medelslutavverkningsålder	32
4.6 Gödslad areal	33
5. Diskussion	34
5.1 Tillförlitlighet och vidare studier	34
5.2 Val av skötselprogram	35
5.3 Gödslings påverkan på kollagret	36
5.4 Svårigheten att påskynda större kollager	37
5.5 Avverkningsvolym	37
5.6 Samband mellan när ett stort kollager är viktigt och avverkningsålder	38

6. Slutsatser	39
Referenser.....	40
Bilaga 1. Kollager	45

Tabellförteckning

Tabell 1. De fyra olika scenarierna med scenarionamn, vilka kolräntor som kommer simuleras, om det är tillåtet med gödsling och om det finns avverkningskrav. 23	23
Tabell 2. Skötselstrategierna kopplade till respektive scenario. Parentesen som följer efter skötselstrategin är hur de namnges framöver i rapporten.....	23
Tabell 3. Förklaring av variabler till ekvation 2, 3, 4, 5, 6 och 7	25

Figurförteckning

Figur 1. Ålderklassfördelning på fastigheten.....	19
Figur 2. Ståndortsindex på fastigheten.	20
Figur 3. Det diskonterade värdet år 0 av ett kollager på 567 000 ton vid olika tidpunkter och räntesatser. Vid kolränta 50 % minskar värdet på kollagret snabbast. Vid kolränta 10 % minskar värdet på kollagret långsammare medan en kolränta på 0 % gör att värdet på kollagret är konstant över tid och är lika mycket värt idag som om 100 år.....	26
Figur 4. Arealen i hektar per skötselstrategier för de fyra scenarierna vid tre olika räntor. Skötselstrategier som efterföljs av "g" innebär att gödsling varit tillåten.	28
Figur 5. Totalt kollager i ton under varje period för de fyra scenarierna vid tre olika räntor.	29
Figur 6.. Totalt avverkad volym (m ³ fub) per period för de fyra scenarierna vid tre olika räntor.....	31
Figur 7.. Slutavverkningsåldern för respektive scenario och ränta, jämfört med dagens medel för Götaland. Krysset i varje box representerar medel slutavverkningsåldern. Utan krav (Uk), Avverkningskrav (Av), Gödsling (G) och Gödsling med Avverkningskrav (GAV).....	32
Figur 8. Total gödslad areal (ha) för de två scenarierna som tillåter gödsling vid tre olika kolräntor. Eftersom ett bestånd kan gödslas mer än en gång kan den totala arealen som är gödslad överstiga den totala arealen på fastigheten.....	33

Förkortningar

GROT	Grenar och toppar
LSÅ	Lägsta slutavverkningsålder
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
m ³ fub	Fast kubikmeter under bark
m ³ sk	Skogskubikmeter
SVL	Skogsvårdslagen
TPG	Treatment program generator

1. Inledning

Klimatförändringarna är ett högaktuellt och omdiskuterat ämne. De förändringar som klimatförändringarna medför har redan fått en påverkan på många platser runt om i världen, med negativa effekter på exempelvis människors hälsa, mat- och vattentillgång, ekonomi men även för naturen i stort. Den globala uppvärmningen drivs främst av mänskliga aktiviteter i form av utsläpp av koldioxid till atmosfären (IPCC 2023). För att bromsa uppvärmningen ses skogarna som en viktig del av lösningen, då koldioxid binds in och lagras i skogen via fotosyntes. Därmed utgör skogen en av de största kolsänkorna ur ett globalt perspektiv (Pan et al. 2011).

Åsikterna om hur skogen bör skötas för att skapa den största klimatnyttan går dock isär. Vissa menar att det är viktigt att prioritera ett stort kollager genom att minska trakthyggesbruket och premiera andra skötselmetoder. Andra hävdar att dagens skogsförvaltning bör fortsätta likt idag för att bibehålla en hög tillväxt och gynna substitution.

Forskare med ett mer långsiktigt perspektiv förespråkar att en stor kolinbindning ska ske i skogen på lång sikt. Ett av huvudargumenten för att fortsätta bruka skogen liknande dagens skogsbruk är substitutionseffekten (Ludmark et al. 2014; Petersson et al. 2022). Detta för att gradvis ersätta de fossila resurserna, och samtidigt främja högre tillväxt och kolinbindning i den yngre skogen. Då äldre träd växer långsammare anser de att enbart låta skogen stå är en dålig idé, eftersom det kan leda till att skogarna på landskapsnivå inte klarar av att binda in önskade kolmängder på längre sikt (Skogforsk 2019; Bergh et al. 2020). Denna grupp av forskare menar också att på en landskapsnivå leder inte ett kalhygge till ökade utsläpp från skogen då det kompenseras av växande bestånd bredvid.

Andra, med ett mer kortsiktigt perspektiv, menar i stället att det är bättre att minska brukandet av skogen och låta en större andel stå orörd. Detta för att hålla uppvärmningen under Parisavtalets 1,5 - 2°C mål. Ett antal forskare har i Aftonbladets serie *10 år- en debattserie om klimatet* skrivit: ”Vi behöver arbeta för ökad lagring av och upptag av kol i skogar genom att i högre grad låta skogen stå och göra sitt arbete som bindare av koldioxid.” (2021). Allt handlar i slutändan om i vilken skala och i vilket tidsperspektiv skogen ses på, som i sin tur påverkar åsikterna om hur skogen bör skötas.

1.1 Syfte och frågeställning

Syftet med denna studie är att undersöka om den optimala skötseln av skog skiljer sig beroende på om det är viktigast att maximera kolförrådet under kort-, medellång- eller lång tid. Anledningen till studien är att öka förståelsen för hur skogsbruket kan optimeras för att maximera kolförrådet.

Forskningsfrågor:

- Vilket är det mest optimala sättet att sköta skogen för att maximera kolförrådet?
- Hur påverkas kollagret och skötseln av skogen givet att uttag av virke ska ske?
- Hur påverkas kollagret och skötseln av skogen givet att gödsling är en valbar skötselåtgärd?

För att undersöka detta används det skogliga beslutsstödsystemet Heureka PlanVis. Där skapas fyra scenarion med olika förutsättningar för hur skogen får brukas men med samma mål, det vill säga att maximera kolförrådet under kort-, medellång- och lång tid. Utifrån scenarierna analyseras hur de genererade skötselstrategierna förändras beroende på när kollagret bör maximeras. För att inkludera hänsyn till kolförrådet på kort-, medellång- och lång tid har vi i denna studie diskonterat framtida kolförråd till dagens datum med hjälp av olika räntesatser.

2. Bakgrund

2.1 Sveriges skog

Sverige är ett land med en stor andel skogsbeklädd mark. Av den totala ytan på 40,7 miljoner hektar, täcks två tredjedelar av arealen med skog vilket motsvarar 27,9 miljoner hektar. Av detta är 23,5 miljoner hektar produktiv skogsmark där barrskog dominerar. Produktiv skogsmark innebär att det krävs potential för en genomsnittlig virkesproduktion på minst en skogskubikmeter per hektar och år. Med en skogsmarksandel på 69 % av den totala ytan (Skogsdata 2023) rankas Sverige som det land i Europa med näst högst skogsandel efter Finland (SCB 2023).

Skogen i Sverige är en del av det boreala barrskogsbältet, vilket sträcker sig runt den norra delen av jorden mellan breddgraderna 50° och 70° N. Den boreala skogen kännetecknas ofta av relativt låg nederbörd med kalla vintrar och milda somrar vars trädslagsfördelning domineras av barrskog (Chapin et al. 2011). Den boreala skogen är indelad i sub-zoner beroende på den rådande klimat- och vegetationszonen, där lövskogsinslag ökar längre söderut. I de sydligaste delarna av Sverige finns även en mindre del av nemoral skog, huvudsakligen bestående av lövskogar (Skogsstyrelsen 2020).

Skogen utgör en stor kolsänka globalt sett, där de boreala och tropiska skogarna utgör det största kollagret (Pan et al. 2011). Det förutspås dock att den boreala skogen är en av skogstyperna som kan vara speciellt känslig för klimatförändringar till följd av en stigande medeltemperatur (IPCC 2007).

2.2 Kolet och skogen

Nivån av koldioxid i luften är högre än vad den varit på över två miljoner år, och den fortsätter att stiga. Tillsammans med andra växthusgaser bidrar koldioxiden till att öka jordens medeltemperatur. Sedan förindustriell tid, under perioden 1850 – 1899, har den genomsnittliga temperaturen ökat ungefär 1,1 grad under åren 2011–2020 vilket har en märkbar effekt på klimatet. Dessa effekter inkluderar exempelvis en ökad risk för extremväder, smältande glaciärer, torka, bränder och översvämningar. Det uppskattas att mellan 3,3 och 3,6 miljarder människor lever i områden som är extra utsatta för klimatförändringar (IPCC 2023), och med ett förändrat klimat finns en ökad risk för störningar. I en studie av van Lierop et al.

(2015) observerades exempelvis en ökande trend för skogsbränder i den boreala skogen vilket inte bara kan hota den biologiska mångfalden och de som lever i närheten, utan även resulterar i koldioxidutsläpp och en minskad kolinbindning.

Det är under skogens tillväxt som koldioxid binds in genom fotosyntes. Kolet lagras i träden, såsom i barr, löv, grenar, stammar och rötter, samt i jordmänen och i dött organiskt material. Den största delen av kollagret finns som markkol, medan resterande lagras i träden (Bergh et al. 2020).

Det finns några centrala begrepp som behöver förklaras för att förstå hur skogar påverkar och påverkas av atmosfärens koldioxidnivåer. Kolinbindning innebär att koldioxid tas upp från atmosfären och binds in som kolföreningar via växter. Kollager innebär den mängd kol som är lagrad i skogen vid ett visst tillfälle. Detta inkluderar både terrestra miljöer, alltså på land, och våtmarker. Utsläpp av koldioxid till atmosfären sker vid olika störningar såsom bränder, stormar och torka (European Environment Agency 2022), samt efter avverkning av skog där nedbrytning av kvarlämnade växtdelar och förbränning av produkter frigör kol (Bergh et al. 2020). När kol frigörs från ett ekosystem till atmosfären kallas det för en kolkälla (European Environment Agency 2022). Om nettoupptaget av koldioxid är positivt, vilket innebär att mer koldioxid tas upp från atmosfären än vad som släpps ut, kallas det för en kolsänka (European Environment Agency u.å). Skogen kan både vara en kolsänka och en kolkälla beroende på vilken fas den befinner sig i och vilka åtgärder som görs.

I en studie gjord av Peichl et al. (2022) undersöktes ett område i norra Sverige och de boreala skogarnas roll som antingen kolsänkor eller kolkällor. Studien fokuserade på skogsområden från nyligen avverkade hyggen till äldre bestånd på cirka 200 år. Forskarna analyserade både koldioxidupptag av vegetationen och markens utsläpp av koldioxid. Resultatet visade att hyggen är kolkällor under de första åren vilket främst beror på att den vegetation som binder kol försvinner, inte att marken släpper ut mer koldioxid än när den var skogsbeklädd. Inom 10 år efter avverkning blir däremot hyggen en kolsänka, och vid ett nyblivet hygge är det markvegetationen, såsom örter och gräs, som står för det största koldioxidupptaget. Eftersom tillväxten i skogsbestånden är den avgörande faktorn för kolupptaget, påverkar skogsbrukets metoder kolbalansen. Resultatet från studien visar också att äldre träd fortsätter att ta upp koldioxid och att en fördelaktig omloppstid, om inte allvarliga störningar sker, ligger runt 100–120 år ur kolinbindningssynpunkt.

Skogen bidrar till klimatnytta genom att binda in koldioxid från atmosfären och lagra den i vegetationen, produkter, i mark eller död ved samt när skogen används för att substituera andra fossilbaserade produkter (Bergh et al. 2020). Enligt Hannerz et al. (2024) definieras den totala klimatnyttan som när värdet från

substitution och kolsänkor vägs samman. Att använda skogen för att göra mest nytta kan ses på olika sätt. Antingen kan produkter skapas som lagrar kol under olika långa tidsperioder, beroende på produkt. Genom att använda sig av materialet från skogen samt tillverka träprodukter går det att ersätta andra fossilbaserade och utsläppskrävande produkter, vilket kallas för substitutionseffekten (Bergh et al. 2020). Men skogen kan också betraktas som en kolsänka om den får stå och fortsätta växa, även om nettoupptaget av koldioxid på längre sikt minskar i äldre skogar (Islam et al. 2024). Om skogen låts vara intakt minskar möjligheten för substitution, men om avverkningsnivån ökar så minskar kolförrådet i skogen (Bergh et al. 2020).

2.3 Hållbart skogsbruk inom EU

Det finns flera internationella riktlinjer om hur skogen bör skötas, som ofta fokuserar på hantering av skogen med hänsyn till klimat- och biodiversitetshotet. I EU:s Gröna giv, som inkluderar skogsstrategin för år 2030, betonas vikten av att främja hållbart skogsbruk och hållbar användning av träprodukter. Denna strategi strävar också efter att skapa incitament för skogsägare att nyttja skogen som en kolsänka (Näringsdepartementet 2021). Inom ramen för EU:s gröna giv ingår bland annat 55 %- paketet, som syftar till att minska EU:s nettoutsläpp av koldioxid med 55 % till år 2030. För att uppnå dessa mål spelar sektorn för markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk (LULUCF) en central roll (Rådet för Europeiska unionen, 2021/8440). Enligt LULUCF-förordningen förväntas Sverige öka sina kolsänkor inom markanvändningssektorn från 39,55 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år (mätt under referensåren 2016–2018) med ytterligare 3,995 miljoner ton fram till år 2030 (Wikberg et al. 2023).

I EU:s Gröna giv ingår även bioekonomistategin som bland annat lyfter upp skogen som en förnybar resurs som ska kunna ersätta fossila material. Att producera långlivade produkter och att marknaden ska vara cirkulär med en hög andel återvunnet trä anses viktigt (EU-Kommisionen 2022/283).

Parallellt med dessa mål betonas också vikten av att hantera hotet mot den biologiska mångfalden. Högst aktuellt rörande biodiversitetshotet är konventionen om biologisk mångfald (CBD) som strävar efter att avsätta 30 % av land- och vattenarealerna till år 2030 (CBD 2020). Det målet skulle på sikt kunna leda till högre krav på avsatta arealer inom skogsbruket. Skogen ska alltså binda in mer kol och skötas hållbart samtidigt som hållbara träprodukter ska ersätta de fossila.

2.4 Sveriges skogsbruk: Balans mellan hållbarhet och resursutnyttjande

Trycket på skogen som resurs har ökat på grund av den växande efterfrågan på biobaserade produkter och virke, med allt från trähus och kläder till drivmedel och batterier. Trots att endast 1 % av världens skogar finns i Sverige, genererar landet hela 4 % av världens trä- och massaprodukter. Detta gör Sverige till den fjärde största exportören på den globala träråvarumarknaden (Skogsindustrierna 2022). I Sverige utnyttjas i näst intill alla fall hela trädet ovan rot. Stammen blir timmer och massaved, och toppar och grenar (GROT) som tas ut i 30 % av slutavverkningarna (Skogsdata 2023) blir biobränsle, men används annars för att skydda marken från körskadorna.

Ett föränderligt klimat, tillsammans med den ökande efterfrågan på träråvara, gör skogsfrågan alltmer komplex. Tidigare har ökad skogstillväxt betraktats som en följd av både ett varmare klimat och effektiva skogsvårdsåtgärder (Fridman et al. 2022). Emellertid tycks klimatförändringarna nu presentera fler utmaningar än tidigare förväntat, med ökad risk för skador från torka, stormar, insekter, betande djur och patogener, vilket kan hämma den ökade tillväxten i skogen (Fridman et al. 2022; Martinez-Garcia et al. 2024; Pongratz et al. 2021). Skogen är i viss mån en begränsad resurs, vilket Thomas Lundmark (2020) sammanfattar genom att ställa frågan “Räcker skogen till allt? “

Skogsbruket står inför utmaningen med att balansera uttag av virke och samtidigt bibehålla ett högt kollager och hög kolinbindning. Idag är den dominerande skötselmetoden i Sverige trakthyggesbruk med en genomsnittlig omloppstid på 100 år (Skogsdata 2023), även om omloppstiderna varierar beroende på de olika lägsta slutavverkningsåldrarna (LSÅ) i landet. Enligt Skogsstyrelsens kunskapsunderlag *Effektanalys av några skogliga åtgärders påverkan på kolsänkan* (2023) kan förlängda omloppstider vara en lösning för att bibehålla ett högt kollager och en relativt hög kolinbindning. Vi kan dock idag se trender på att skogar avverkas vid allt yngre åldrar närmare LSÅ jämfört med tidigare (Skogsdata 2023). Som en konsekvens minskar möjligheten att höja slutavverkningsåldrarna för att bibehålla ett stort kollager. Skogsstyrelsen presenterar även alternativ som att etablera skog på jordbruksmark och att använda snabbväxande träd samt åtgärder som gödsling och rensning av gamla skogsdiken, för att påskynda kolinbindningen (Skogsstyrelsen 2022a; Skogsstyrelsen 2022b).

Hur Sveriges skogar sköts och vilka mål som strävas mot är däremot till stor del upp till varje skogsägare, så länge de håller sig till skogsvårdslagen (SVL). Skogsvårdslagen bygger till stor del på principen “frihet under ansvar”, vilket ger

stora möjligheter att bruka skogen som man själv vill, men kräver också skoglig kunskap. Det stora antalet enskilda skogsägare i Sverige leder därmed i viss mån till ett diversifierat skogsbruk, men då det saknas incitament för att prioritera andra värden än virkesförsäljning kan det vara svårt att motiveras till åtgärder som främjar exempelvis kolinlagring (Gong et al. 2022) eller biodiversiteten i skogen.

2.5 Tidigare forskning

Eftersom skogen betraktas som en central del av klimatomställningen bedrivs omfattande forskning om skogens potential för att gynna klimatet. En utmaning med skogen är de långa omloppstiderna, vilket betonar vikten av att fatta välgrundade och långsiktiga beslut.

I en studie av Assmuth och Tahvonen (2018) undersöktes det optimala kollagret i skogar i likåldriga och olikåldriga bestånd. Eftersom kol inte har något etablerat ekonomiskt värde, jämförbart med exempelvis timmer, använde forskarna priser för att värdera kolet. Resultaten visade att genom att fokusera på att maximera kollagret i skogen, sköts gallringar framåt i tiden vilket resulterade i en ökande stående volym. Att tillskriva kol ett ekonomiskt värde påverkade också omloppstiden, som antingen förlängdes eller förkortades beroende på den använda räntesatsen och mängden kol som förväntades frigöras från diverse träprodukter. Införandet av ett pris på kol visade att kontinuitetsskogsbruk i vissa fall premierades framför trakthyggesbruk för att maximera kollagret.

I en studie av Lundmark et al. (2016) jämfördes i stället klimatnyttan med tanke på kolbalans för två olika skötselsystem, trakthyggesbruk och kontinuitetsskogsbruk (CCF), på ett heterogent granbestånd. Där fann man att den viktigaste faktorn ur klimatsynpunkt handlade om hur mycket biomassatillväxt som fanns i skogen och hur produktanvändningen såg ut, snarare än valet av skötselsystem.

I en annan studie som också fokuserade på effekter av skogliga skötselsystem, undersökte Jörgensen et al. (2021) hur olika skötselmetoder påverkade kolinlagringen i ett tallbestånd i Sverige. Resultaten visade att gallring av bestånd ledde till en minskad kolackumulering, oavsett om hänsyn togs till det kol som fanns i de avverkade träden eller inte. Gödsling gav en betydande ökning av trädens tillväxt, men kompenserade inte för den förlust av kol som skedde vid gallringen. Det kunde också ses att organiskt kol i markskiktet ökade efter gödsling. Metoden med att gödsla och inte gallra ökade koluttaget mest, och forskarna menar att detta skulle kunna vara en lösning för att bromsa klimatförändringarna.

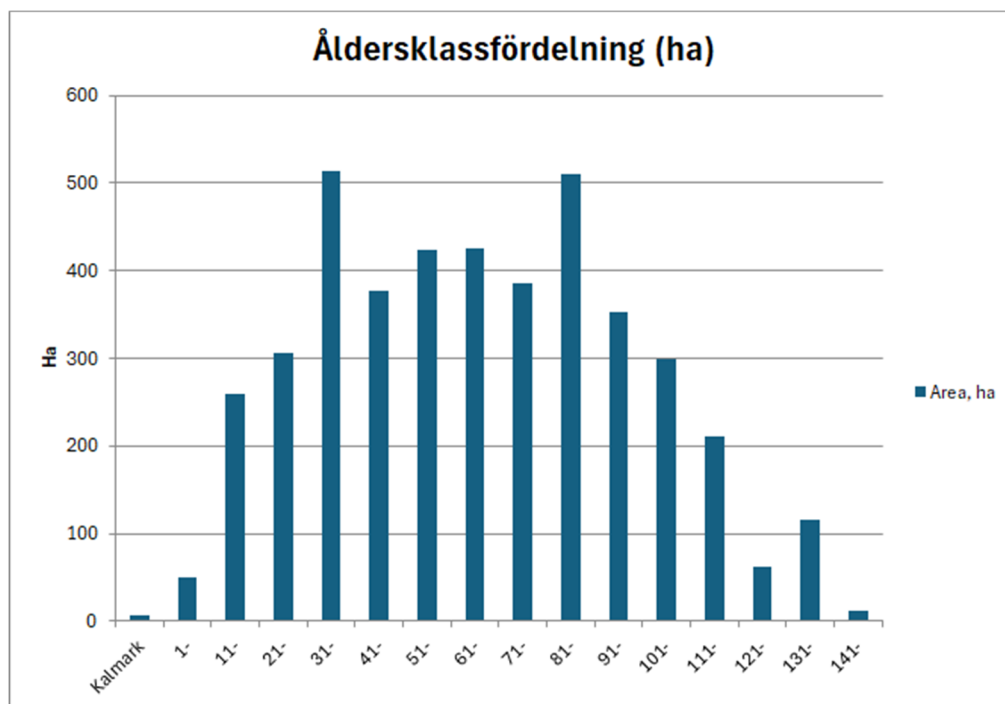
Det som tidigare inte har undersökts är att under planeringsfasen, med hjälp av ett beslutsstödsystem, diskontera framtidens kolförråd till dagens värde och se hur skötseln förändras beroende på när ett stort kolförråd är önskvärt.

3. Metod

3.1 Data

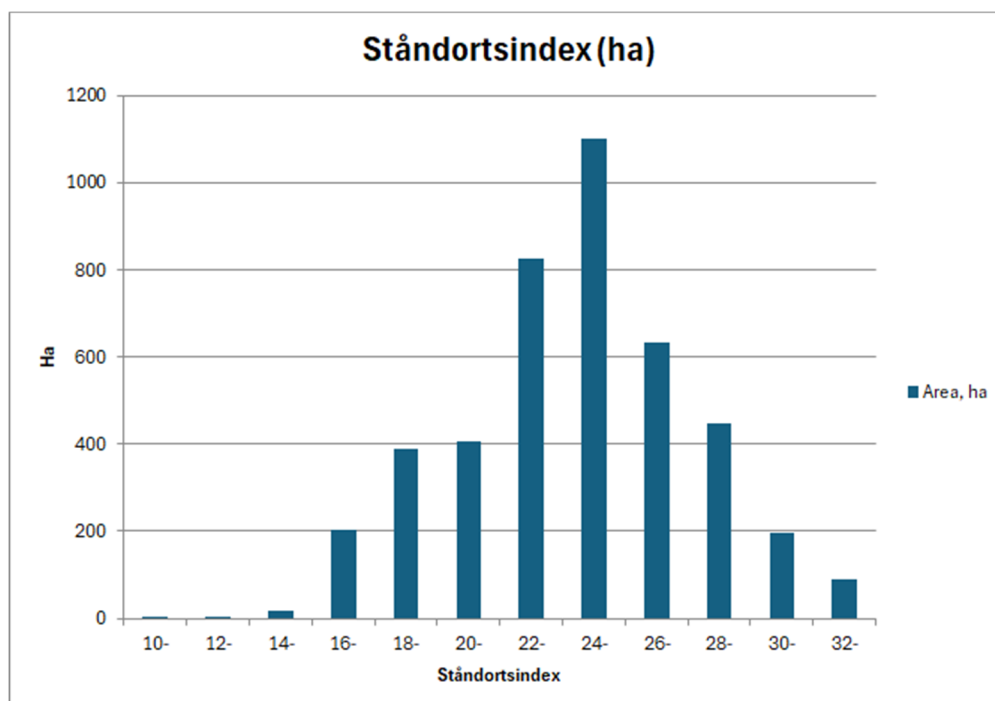
Datat för analysen är hämtat från Göteborgs stadsskogar i Rödbo. Det omfattar 4 616 hektar, varav 4 422 hektar uppdelat på 1 437 avdelningar är produktiv skogsmark och 494 hektar är impediment.

Fastighetens ingående totala volym är 672 081 m³sk med en genomsnittlig volym på 152 m³sk/ha, baserat på den produktiva arealen. Åldersfördelning är någorlunda normalfördelad, men med toppar i åldersklassen 31 till 41 år och 81 till 91 år. Den största skogsarealen ligger inom åldersklassen 21 till 111 år, och området under 20 år uppgår till 318 hektar. Medelåldern för fastigheten är 62 år.



Figur 1. Ålderklassfördelning på fastigheten.

Ståndortsindex varierar mellan SI 14 och 31 med majoriteten runt SI 22 till 26, och med en medelbonitet på 6,45 m³sk/ha.



Figur 2. Ståndortsindex på fastigheten.

Trädslagsfördelningen domineras av tall och gran, som utgör 37 % respektive 16 % av fastigheten. Därtill utgör björk 13 %, ek 9 % och övrigt löv 22 % av trädslagsfördelningen.

Det ingående totala kollagret uppgick till 567 000 ton kol för hela fastigheten. Det inkluderar kol i stående biomassa, stubbar, rötter, död ved och i marken.

3.2 Heureka

För att genomföra studien användes Heureka PlanVis som är ett beslutsstödsystem byggt för skogliga simuleringar, utvecklat vid Sveriges lantbruksuniversitet (Lämås et al. 2023). Analyser kan göras för hela landskap ned till enskilda bestånd. Genom regressionsmodeller simulerar systemet bland annat enskilda träd eller trädgruppers framtida tillväxt, mortalitet och inväxning. Modellerna baseras på empiriska data från riksskogstaxeringen samt provytor från fasta försök (Fahlvik 2014). Systemet innehåller även olika klimatscenarier, skadeindex och möjlighet till att planera med spatial hänsyn (Eggers & Öhman 2020). Verktöget används bland annat för att skapa prognoser och analyser om skogens ekonomi, virkesproduktion, kolinlagring, rekreationsvärden och naturvärden.

Heureka PlanVis kan användas för strategisk och taktisk planering där skogliga data från skogsbestånd används för att analysera olika skogsskötselprogram. Användandet av programmet sker i ett antal steg, där först skogliga data analyseras.

Därefter används TPG-modulen (Treatment program generator) där skogen delas in i specifika domäner. En domän innebär att bestånd, utifrån deras ingående tillstånd, grupperas utifrån användarens olika villkor (t.ex. ålder, trädslag eller ståndortsindex) (Heureka Wiki 2024a). Dessa tilldelas därefter skötselstrategier, som efter användarens önskemål beskriver hur skogen ska skötas (omloppstider, förnyngningsmetoder och antalet lämnade högstubbar är ett urval av valbara inställningar). I TPG-körningen genereras ett valt antal skötselprogram som beskriver en sekvens åtgärder, i perioder om fem år där de möjliga skötselåtgärderna kan ske vid olika tidpunkter. Desto större antal skötselprogram som väljs desto högre är sannolikheten att hitta det optimala programmet i optimeringen, men till kostnad av en mer tidskrävande skötselprogramgenerering.

Därefter kommer optimeringsmodulen. Där väljs bland annat målfunktionen som beskriver vad simuleringen antingen ska maximera eller minimera. Därefter bestäms parametrar, kontovariabler och restriktioner för att uppnå eventuella specifika mål. Bland de genererade skötselprogrammen från TPG:n kommer det bästa alternativet väljas. Detta utifrån hur väl de uppfyller användarens objektfunktion och restriktioner för att skapa en optimerad skötselplan.

Resultatet kan sedan analyseras via olika indikatorer och resultatvariabler i resultatmodulen. Fördelen med Heureka är att flera mål kan prioriteras samtidigt och snabbt genom programmering.

Kolmängder i Heureka räknas ut genom olika funktioner. För kolmängder i trädet ovan jord används trädslagsvisa biomassa-funktioner, och därefter används ett omräkningstal för att gå från torrsbstans biomassa till mängd kol. I död ved räknas mängden kol ut genom att baseras på den ingående mängden död ved, tillförsel av ny samt nedbrytning, där nedbrytningen baseras på en exponentialfunktion med olika värden beroende på trädslag. I marken räknas mängden kol ut genom den ingående mängden, inklusive nedbrytningen, av rötter, stubbar och förna. Heureka använder sig också av Q-modellen för att beräkna kol i förna och humusskikt (Heureka Wiki 2024b).

I denna rapport användes Coin Or CBC/ CLP som lösare i optimeringen. Heureka stödjer både linjärprogrammering (LP) och heltalsprogrammering (MIP). I detta arbete användes LP.

3.3 Tillvägagångssätt

För att inkludera hänsyn till kolförrådet under kort-, medellång- och lång tid har vi i denna studie diskonterat framtida kolförråd till dagens datum. Vid diskonteringen

representerades detta av tre diskonteringsräntor (framöver kallat kolräntor) på 50 %, 10 % och 0 %, som alltså symboliserar tidsperspektiven kort-, medellång-, och lång tid.

Diskontering är en metod som främst tillämpas inom ekonomi för att bedöma nuvärdet av framtida investeringar vid olika tidpunkter, och vilar på teorin om att pengarnas värde är större idag än imorgon. Inom skogsbruket används det bland annat som ett nyckeltal för att jämföra olika fastigheter eller för att utvärdera vilka skötselåtgärder som kommer ge det största nuvärdet och där med vara den bästa investeringen ur ett ekonomiskt perspektiv.

Nettonuvärde (1) fås genom att summera alla nettointäkter för varje år (t) som i sin tur divideras med diskonteringsfaktorn (2). Diskonteringen leder till att framtidens nettointäkter är mindre värda än dagens. För varje år kommer alltså ursprungsvärdet att sjunka med den valda räntan (r). På så sätt går det att jämföra investeringarnas värde även om de kostar olika och har olika inkomster vid olika tidpunkter. Vanligtvis maximeras nuvärdet. När det kommer till skog kan olika sköselförslag utvärderas för att se vilken åtgärd som ger den högsta avkastningen och vilket år åtgärden bör utföras. Det är även vanligt att lägga på en fast kostnad för markvärdet.

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{(B_t - C_t)}{(1 + r)^t} \quad (1)$$

$$d = \frac{1}{(1 + r)^t} \quad (2)$$

3.3.1 Scenarion

Fyra scenarion skapades i Heureka PlanVis, där varje scenario utgjordes av olika förutsättningar för hur skogen fick brukas men med samma mål, det vill säga att maximera kolförrådet under kort-, medellång- och lång tid (tabell 1).

Varje scenario simulerades med de tre kolräntorna på 0 %, 10 % och 50 %. I det första scenariot var gödsling inte tillåten och inget avverkningskrav fanns. Detta scenario definierades som *Utan krav*. I det andra scenariot var gödsling inte heller tillåten, men det fanns ett avverkningskrav på 45 000 m³fub/period. Detta scenario definierades som *Avverkningskrav*. I det tredje scenariot var gödsling tillåten, men det fanns inget avverkningskrav. Detta scenario definierades som *Gödsling*. I det sista scenariot var gödsling tillåten, och det fanns ett avverkningskrav på 45 000 m³fub/period. Detta scenario definieras som *Gödsling med avverkningskrav* (tabell 1).

Tabell 1. De fyra olika scenarierna med scenarionamn, vilka kolräntor som kommer simuleras, om det är tillåtet med gödsling och om det finns avverkningskrav.

Scenario	Kolränta (%)	Tillåten gödsling	Avverkningskrav per period (m ³ fub/period)
<i>Utan krav</i>	0, 10, 50	Nej	-
<i>Avverkningskrav</i>	0, 10, 50	Nej	45 000
<i>Gödsling</i>	0, 10, 50	Ja	-
<i>Gödsling med avverkningskrav</i>	0, 10, 50	Ja	45 000

3.3.2 TPG: domänindelning

I TPG:n i Heureka skapades en domän som innehöll alla avdelningar på fastigheten, dit alla skötselstrategier kopplades. Detta för att inte sätta för hårda begränsningar i simuleringen. Domänindelningen var densamma för alla fyra scenarier.

3.3.3 TPG: skötselstrategier

Till varje scenario kopplades skötselstrategier, där skötselstrategierna beskriver hur skogen får skötas (tabell 2). För scenariot *Utan krav* och *Avverkningskrav* skapades sju skötselstrategier. Fem av dessa definierades som olika antal år efter lägsta tillåtna slutavverkningsålder (LSÅ). De två återstående var *Låt stå* samt *Hyggesfritt*.

För scenariot *Gödsling* och *Gödsling med avverkningskrav* skapades tolv skötselstrategier. Tio av dessa definierades lika med olika antal år efter LSÅ, men med skillnaden att hälften gödslades och den andra hälften gödslades inte. Den gödslingsform som användes var gödsling vart 10:e år fram till 10 år före slutavverkning. De två återstående skötselstrategierna, *Hyggesfritt skogsbruk* och *Låt stå*, gödslades aldrig.

I skötselstrategin *Låt stå* utfördes inga skötselåtgärder och för *Hyggesfritt* användes Heurekas Uneven-aged (CCF) inställning. Där är det framför allt selektiv huggning i form av höggallring som utförs. Programmen med antal år efter LSÅ symboliserar förlängda omloppstider.

Tabell 2. Skötselstrategierna kopplade till respektive scenario. Parentesen som följer efter skötselstrategin är hur de namnges framöver i rapporten.

Scenario	Skötselstrategi: Ogödslad	Skötselstrategi: Gödslad
<i>Utan krav och Avverkningskrav</i>	0 – 10 år efter LSÅ (0–10)	
	11 – 20 år efter LSÅ (11–20)	
	21 – 30 år efter LSÅ (21–30)	
	31 – 40 år efter LSÅ (31–40)	
	41 – 50 år efter LSÅ (41–50)	
	Hyggesfritt skogsbruk (Hyggesfritt) <i>Låt stå</i>	
<i>Gödsling och Gödsling med avverkningskrav</i>	0 – 10 år efter LSÅ (0–10)	0 – 10 år efter LSÅ (0–10 g)
	11 – 20 år efter LSÅ (11–20)	11 – 20 år efter LSÅ (11–20 g)
	21 – 30 år efter LSÅ (21–30)	21 – 30 år efter LSÅ (21–30 g)
	31 – 40 år efter LSÅ (31–40)	31 – 40 år efter LSÅ (31–40 g)
	41 – 50 år efter LSÅ (41–50)	41 – 50 år efter LSÅ (41–50 g)
	Hyggesfritt skogsbruk (Hyggesfritt) <i>Låt stå</i>	

Vid TPG-körningen sattes 21 perioder vilket motsvarar 100 år och det genererades upp till 20 skötselprogram per skötselstrategi, med en diskonteringsränta på 3 %.

3.3.4 Optimering

I optimeringen skapades en kontovariabel som diskonterade det totala kollagret till vald ränta för varje period (3). Denna var även målfunktionen som skulle maximeras. För att göra detta räknades först en diskonteringsfaktor ut (4). Denna härleddes från Ekvation 1 och 2 där NPV beskrivs.

$$\text{Max DKL} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{p=0}^P K_{ijp} A_i x_{ij} \widehat{d}_p \quad (3)$$

$$\widehat{d}_p = \frac{1}{(1 + \hat{r})^{p*5-2,5}} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J_i} v_{ijp} A_i x_{ij} \geq 45\,000 \quad \forall p > 1 \in P \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{J_i} x_{ij} = 1 \quad (6)$$

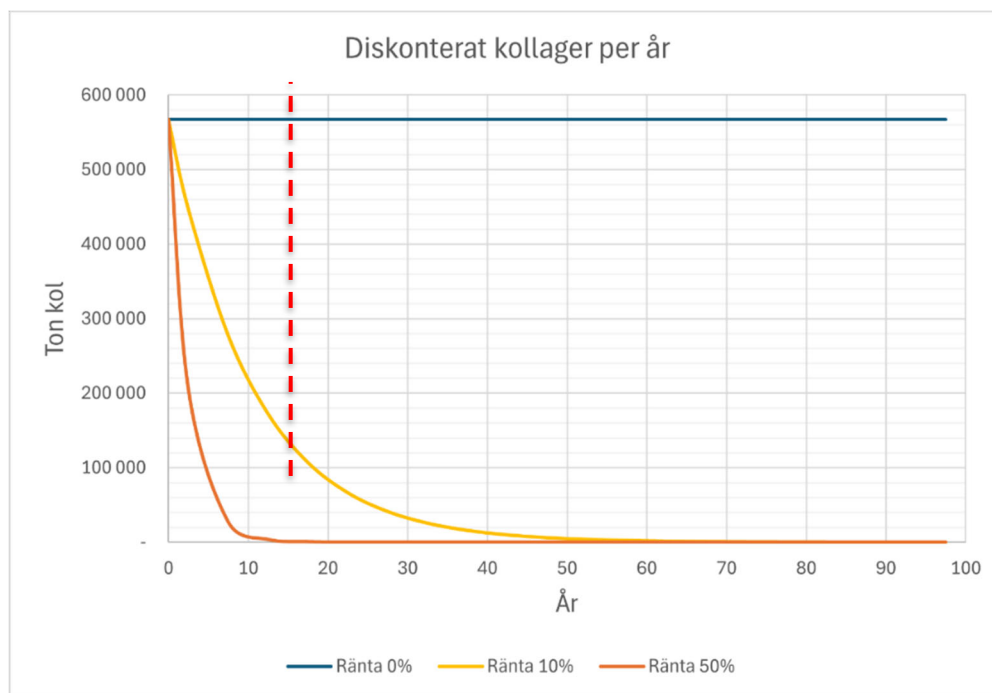
$$x_{ij} \in [0,1] \quad (7)$$

Tabell 3. Förklaring av variabler till ekvation 2, 3, 4, 5, 6 och 7

Variabel	Förklaring
DKL	Diskonterat kollager (ton)
K_{ijp}	Kollagret (ton) i bestånd i som sköts med skötselprogram j i period p . Det totala kollagret är summan av kollagret i jorden, död ved, träd, stubbar och rötter (<i>Total carbon stock</i>)
A_i	Area (ha) för bestånd i
x_{ij}	Beslutsvariabel. Andelen av bestånd i som sköts med skötselprogram j
\widehat{d}_p	Diskonteringsfaktor för kollagret period p
\hat{r}	Kolränta, där $\hat{r} = 0,0; 0,1$ eller $0,5$
p	Antal perioder efter beräkningsperiodens början
v_p	Totala avverkade volymen (m ³ fub) för hela fastigheten i period p

Diskonteringsfaktorerna (4) räknades ut i Excel. Tre kolräntor (\hat{r}) användes för att differentiera värderingen av kollagret på fastigheten och för att kunna observera förändringar i preferenser över tid. De kolräntor som användes bestämdes genom att multiplicera det ingående kollagret med diskonteringsfaktorn (\widehat{d}_p) för varje år efter beräkningsperiodens början och därmed se hur värdet av kollagret förändrades över tid (figur 1). Genom att ändra kolräntan i diskonteringsfaktorn (4) gick det att se hur kollagrets värde förändrades med hänseende till kort-, medellång- och lång tid.

De tre kolröntorna som bestämdes var 0 %, 10 % och 50 %. En kolränta på 0 % indikerar att tidsaspekten är irrelevant, där kollagret nu och i framtiden värderas lika. I denna studie representerar det de långsiktiga perspektivet. En kolränta på 10 % representerar ett medellångt perspektiv. En kolränta på 50 % indikerar att tidsaspekten spelar roll, där kollagret på kort sikt värderas högre än kollagret på lång sikt (figur 1). Till exempel, ett kollager på 567 000 ton år 20, är vid en kolränta på 50 % värt 170 ton vid dagens datum. Vid en kolränta på 10 % är kollagret värt 84 000 ton vid dagens datum, och med en kolränta på 0 % värderas alltid kollagret till sitt faktiska värde. Detta visas med den sträckade röda linjen i figur 1.



Figur 3. Det diskonterade värdet år 0 av ett kollager på 567 000 ton vid olika tidpunkter och räntesatser. Vid kolränta 50 % minskar värdet på kollagret snabbast. Vid kolränta 10 % minskar värdet på kollagret långsammare medan en kolränta på 0 % gör att värdet på kollagret är konstant över tid och är lika mycket värt idag som om 100 år.

Utifrån de tre kolröntorna skapades diskonteringsfaktorer likt Ekvation 4. Diskonteringsfaktorernas värde infogades som parametrar i optimeringsmodulen, en för vardera kolränta.

Eftersom det var fyra scenarion var restriktionerna i optimeringsmodellen olika. Gemensamt för alla scenarion var att det fanns en restriktion som krävde att alla delar av ett bestånd tilldelades ett skötselprogram (6). För de två scenarierna utan avverkningskrav (*Utan krav* och *Gödsling*) var detta den enda restriktionen. För de två scenarierna med avverkningskrav (*Avverkningskrav* och *Gödsling med avverkningskrav*) skapades en restriktion om ett minsta avverkningskrav på 45 000 m³fub/period (5). Detta för att simulera en brukad skog, där inte all skog kunde sättas av till skötselstrategin *Låt stå*. 45 000m³fub var det minsta uttaget som

gjordes när i stället nuvärdet maximerades i en första TPG-körningen där inga krav alls sattes. Medelvolymen som togs ut var då 80 000 m³fub men vi ansåg det som ett för högt krav.

För varje scenario genomfördes tre optimeringar, en för varje kolränta på 0 %, 10 % och 50 %.

3.3.5 Indikatorer

Resultatet från varje optimering analyserades för varje period (vart 5:e år) med följande indikatorer:

- Valda skötselstrategier per areal (*Treatment category*).
- Totala kollagret per period (*Total carbon stock*).
- Totalt avverkad volym per period (*Financial value, Total extracted volume (m³fub)*)
- Slutavverkningsåldrar
- Total gödslad areal

3.4 Avgränsningar

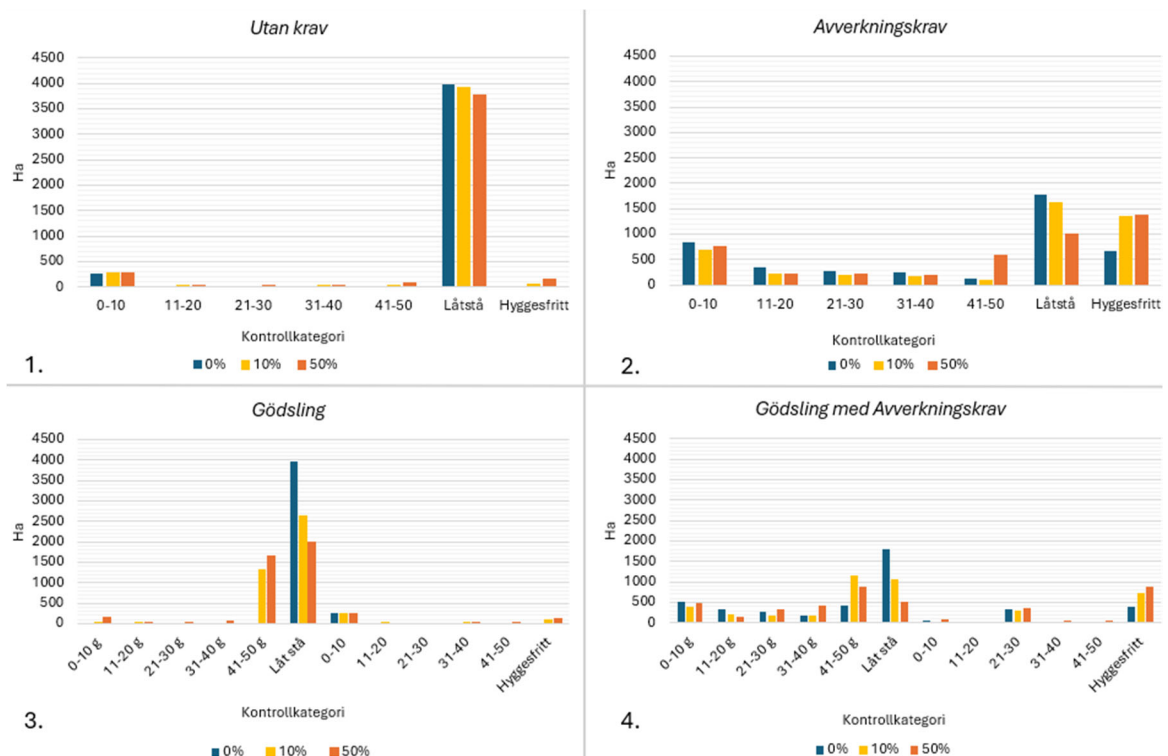
I optimeringen gjordes en avgränsning till att använda endast två restriktioner för att det skulle bli tydligare att se och utläsa eventuella samband mellan resultaten. Det tas i detta arbete inte heller hänsyn till några andra ekosystemtjänster än skogen som ett kollager.

Arbetet avgränsades också från att räkna med substitutionseffekter och lagring av kol i träprodukter vilket kan påverka skötseln av skogen. Anledningen var för att det inte fanns tillräckligt med tid för att göra dessa analyser.

4. Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från studien. För de resultat som redovisas i perioder innebär en period 5 år.

4.1 Area per skötselstrategi



Figur 4. Arealen i hektar per skötselstrategier för de fyra scenarierna vid tre olika räntor. Skötselstrategier som efterföljs av "g" innebär att gödsling varit tillåten.

I det första scenariot *Utan krav* återfinns nästan all areal för alla tre räntor under skötselkategorin *Låt stå*, med en areal mellan 3 700 och 4 000 ha. Endast en liten andel återfinns i skötselkategorin *0-10*, då med en areal på cirka 270 ha för respektive ränta (figur 4.1).

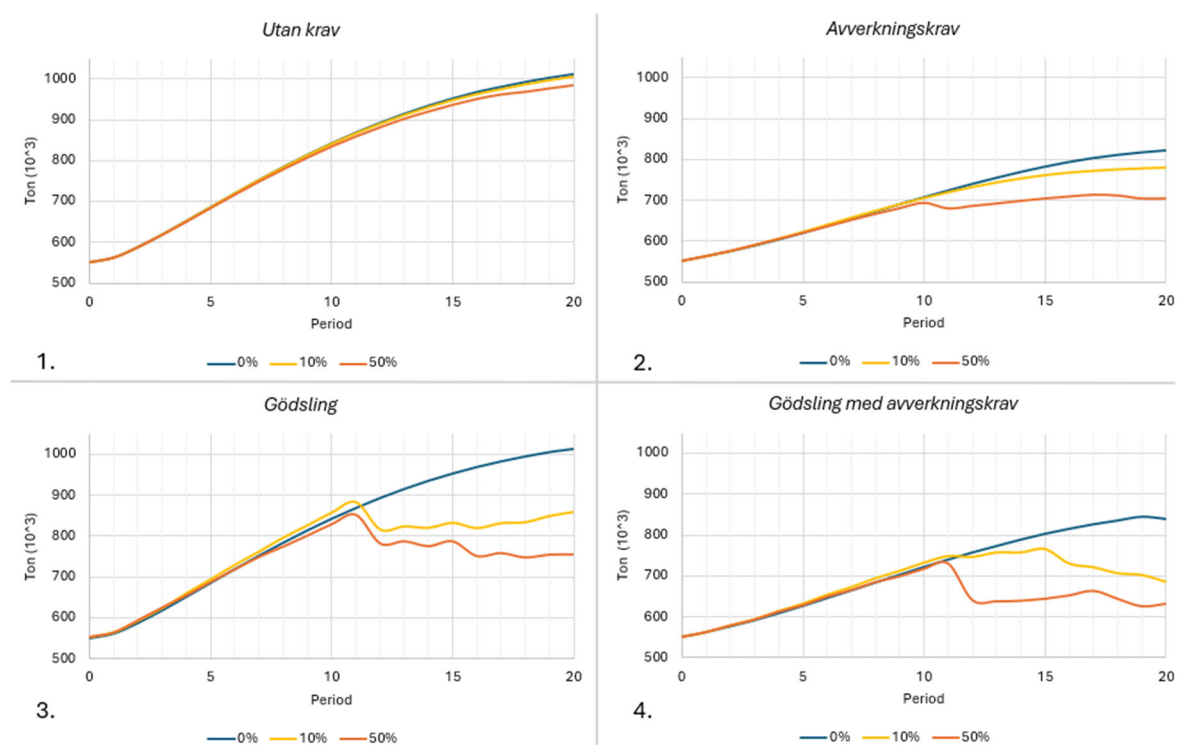
I det andra scenariot *Avverkningskrav* återfinns generellt sett de största arealerna under skötselstrategierna *0-10*, *Låt stå* och *Hyggesfritt*. För kolränta 0 % och 10 % sköts den största arealen med *Låt stå*, på 1 700 ha respektive 1 600 ha. För 50 % återfinns den största arealen under *Hyggesfritt* med en areal på cirka 1 400 ha. För 0 % och 10 % finns den minsta arealen under skötselstrategin *41-50* med en areal

på 140 ha respektive 100 ha. För kolränta 50 % finns den minsta arealen under skötselkategorin 31 – 40 på 180 ha. Resterande arealer är utspridda under de övriga skötselstrategierna med olika förlängda omloppstider för alla tre räntor (figur 4.2).

I det tredje scenariot *Gödsling* återfinns den största arealen för alla tre räntor under skötselstrategin *Låt stå*. För kolränta 0 % finns cirka 4 000 ha under *Låt stå*, vilket är nästan hela den produktiva arealen. För ränta 10 % återfinns 2 600 ha och för 50 % finns cirka 2 000 ha under skötselstrategin *Låt stå*. Därefter är den näst största skötselstrategin 41 – 50 g för 10 % och 50 % på 1 300 ha respektive 1 600 ha, medan den näst största skötselstrategin för 10 % är 0 – 10 på 260 ha. Nästan ingen skog sköts med de övriga skötselstrategierna (figur 4.3).

I det fjärde scenariot *Gödsling med avverkningskrav* återfinns de största arealerna utspridda under olika skötselstrategier med förlängda omloppstider där gödsling är tillåten, *Låt stå* samt *Hyggesfritt*. För 0 % finns den största arealen på 1 800 ha under *Låt stå*. För 10 % återfinns den största arealen på cirka 1 200 ha under kategorin 41 – 50 g, och för 50 % ligger de största arealerna under 41–50 g och *Hyggesfritt* på 870 respektive 880 ha (figur 4.4).

4.2 Totalt kollager



Figur 5. Totalt kollager i ton under varje period för de fyra scenarierna vid tre olika räntor.

Det totala ingående kollagret låg på 567 000 ton kol i samtliga scenarier. Därefter ökar kollagret vid samtliga räntor fram till period 10. För exakta siffror se bilaga 1.

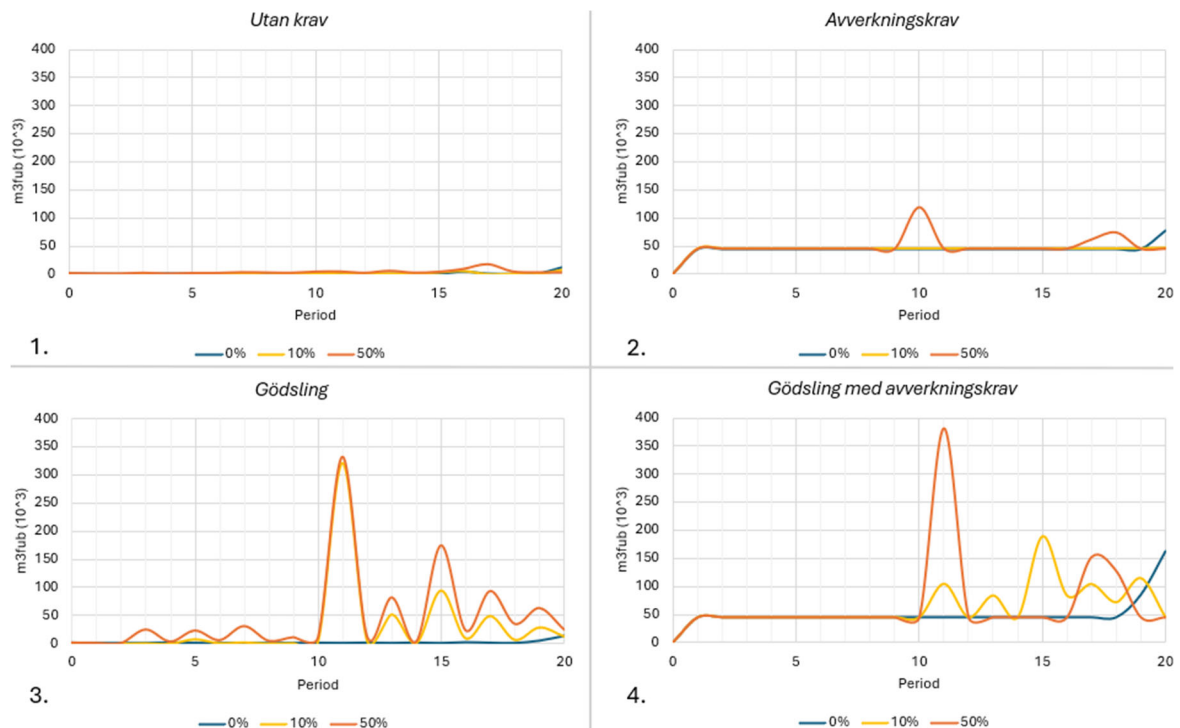
För scenariot *Utan krav* ökar kollagret under hela beräkningsperioden. Kolränta 50 % är marginellt större än de övriga de första tre perioderna och innehar som högst ett kollager på 589 000 ton kol under den tiden i period 2. Sedan är kollagret för ränta 10 % störst i period 5 – 6 där kollagret i period 6 uppgår till 720 000 ton kol. Därefter har 0 % störst kollager beräkningsperioden ut, men fortsatt marginellt. I sista perioden är kollagret för 0 % störst, på 1 011 000 ton kol (figur 5.1).

För scenariot *Avverkningskrav* ökar kollagret långsammare än i *Utan krav*. Vid kolräntan 50 % återfinns ett större kollager än vid de andra räntorna i början av beräkningsperioden, och i period 2 uppnås då ett kollager på 576 000 ton kol. Mellan period 3 – 9 är ränta 10 % högst, där kollagret är 691 000 ton kol i period 9. Efter period 9 har 0 % det högsta kollagret, med 823 000 ton kol i period 20. Vid period 10 sjunker kollagret vid ränta 50 % och förblir relativt konstant på ca 700 000 ton kol beräkningsperioden ut. Vid 10 % avtar kollagrets storlek jämfört med 0 % efter period 11 (figur 5.2).

När gödsling tillåts i scenariot *Gödsling* ökar kollagrets storlek och de olika kolräntorna skiljer sig åt mer än i de övriga scenariona. Kolräntorna följer samma mönster som i de övriga scenariona där 50 % har det högsta kollagret mellan period 0 – 3 och uppnår under den tiden ett kollager på 624 000 ton kol i period 3. 10 % har det högsta kollagret mellan period 4 – 11 och i period 11 lagras 884 000 ton kol i skogen. 0 % innehar det högsta kollagret från period 12 – 20 och når i period 20 ett kollager på 1 012 000 ton kol. Vid elfte perioden minskar kollagret för de två högre kolräntorna (figur 5.3).

I scenariot *Gödsling med avverkningskrav* har de tre kolräntorna ett relativt jämnt kollager fram till period 9 där både 10 % och 50 % har ett högre kollager jämfört med 0 %, om än marginellt. I period 0 – 2 har 50 % det högsta kollagret jämfört med de två övriga räntorna, där lagret som högst uppgår till 580 000 ton i period 2. Ränta 10 % har störst kollager mellan period 3–11 där det högsta kollagret uppnås i period 11 med 747 000 ton kol, därefter planar kurvan ut för att sedan sjunka mot slutet av beräkningsperioden. Efter period 11 är det totala kollagret högst vid 0 % de återstående perioderna. Vid period 19 är kollagret som högst på 844 000 ton kol. I slutet av perioden är skillnaden mellan det högsta och lägsta kollagret (0 % och 50 %) 206 000 ton kol (figur 5.4).

4.3 Avverkad volym per period



Figur 6.. Totalt avverkad volym (m³fub) per period för de fyra scenarierna vid tre olika räntor.

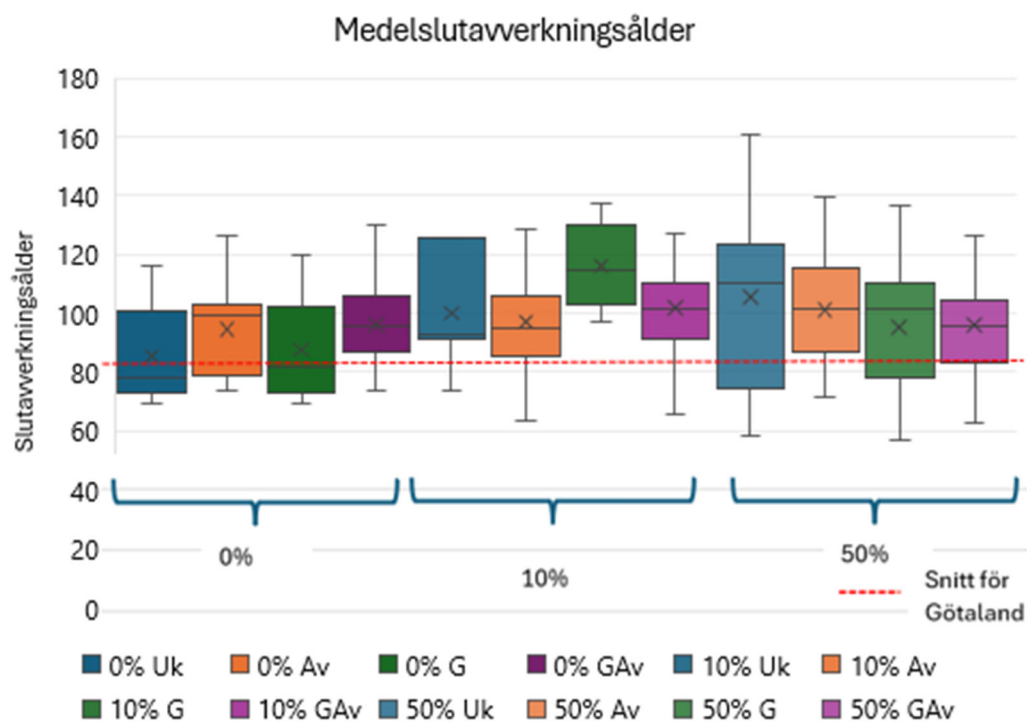
I scenariot *Utan krav* ligger medelavverkningsnivåerna lågt i jämförelse med de andra scenarierna. För kolränta 0 % avverkas i snitt 500 m³fub per period, om man bortser från sista perioden där det avverkas 10 000 m³fub. För 10 % är medelavverkningsnivån högre och i snitt tas 1 500 m³fub ut per period. För 50 % avverkas i snitt 3 000 m³fub per period (figur 6.1).

I scenariot *Avverkningskrav* avverkas det i genomsnitt 46 700 m³fub/period vid ränta 0 %, 45 000 m³fub vid 10 % och 51 000 m³fub vid kolränta 50 %. I period 10 och 18 sticker 50 % ut när det avverkas 118 000 m³fub respektive 74 000 m³fub. I sista perioden avverkar även 0 % avvikande stora volymer på 78 000 m³fub (figur 6.2).

I scenariot *Gödsling* avverkar kolränta 0 % i snitt 1 200 m³fub per period förutom i sista perioden då det avverkas 13 600 m³fub. 10 % avverkar i genomsnitt 14 700 m³fub per period om period 11 utesluts, då det avverkas 322 000 m³fub. Vid ränta 50 % avverkas det i snitt 31 000 m³fub, med undantag från period 11 där det avverkas 333 000 m³fub. För 10 % och 50 % ökar avverkningsvolymerna från beräkningsperiodens mitt, avverkningarna fluktuerar dock mycket mellan varje period (figur 6.3).

I scenariot *Gödsling med avverkningskrav* är avverkningen lika stor för de tre kolröntorna i varje period fram till period 11, med en avverkad volym på 45 000 m³fub per period. Detta motsvarar det avverkningskrav som sattes för varje period. Vid ränta 0 % är avverkningsnivån jämn, med 45 000 m³fub i varje period fram till period 19. I period 19 avverkas 85 000 m³fub, och i period 20 avverkas det 162 000 m³fub. Räntan 10 % avverkar enligt kravet på 45 000 m³fub/period fram till period 11. Medelavverkningen ligger på 63 000 m³fub/period, och avverkningsvolymerna ökar efter period 11 vilket drar upp medelvolymen. För 50 % är avverkningen konstant med 45 000 m³fub för varje period fram till period 11. I period 11 är avverkningen som högst med en avverkad volym på 3 828 000 m³fub. Detta är den största avverkningsvolymen sett utifrån de fyra olika scenarierna. I genomsnitt ligger avverkningsvolymen per period på 68 000 m³fub (figur 6.4).

4.5 Medelslutavverkningsålder



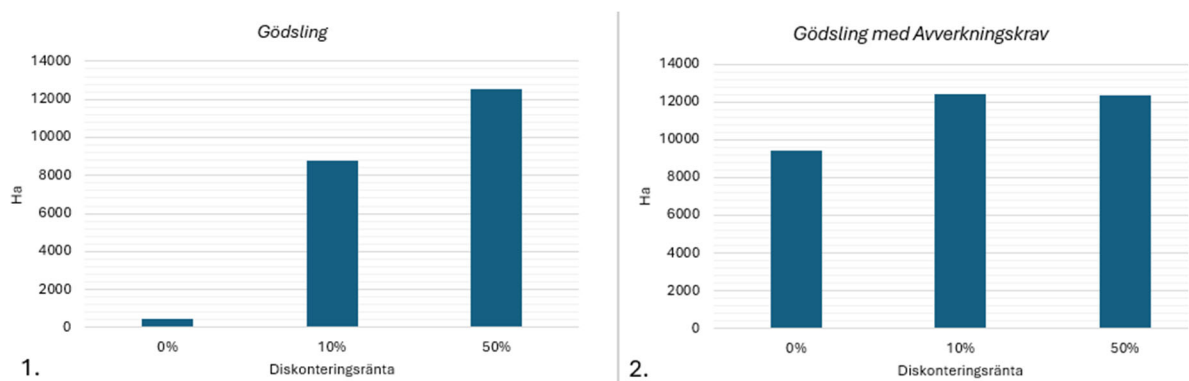
Figur 7.. Slutavverkningsåldern för respektive scenario och ränta, jämfört med dagens medel för Götaland. Krysset i varje box representerar medelslutavverkningsåldern. Utan krav (Uk), Avverkningskrav (Av), Gödsling (G) och Gödsling med Avverkningskrav (GAV).

Slutavverkningsåldrarna skilde sig mellan scenarierna, men generellt ligger alla något över Götalands snitt som år 2019 var 85 år (Skogsdata 2023). I scenarierna är slutavverkningsåldrarna generellt lägre vid ränta 0 % jämfört med de andra kolröntorna (figur 7).

För 10 % räntorna ligger slutavverkningsåldrarna högre än i Götaland. De scenarion med avverkningskrav (*Avverkningskrav & Gödsling med avverkningskrav*) avverkar tidigare än de scenarion som inte har krav på avverkning (*Utan krav & Gödsling*).

Vid scenariot *Utan krav* med ränta 50 % är spridningen störst, från att skog avverkas vid 58 års ålder till 160 år. Generellt ligger medelslutavverkningsåldern mellan 95 – 105 år för 50 % räntorna vilket är högre än snittet i Götaland.

4.6 Gödslad areal



Figur 8. Total gödslad areal (ha) för de två scenarierna som tillåter gödsling vid tre olika kolräntor. Eftersom ett bestånd kan gödslas mer än en gång kan den totala arealen som är gödslad överstiga den totala arealen på fastigheten.

Gödslingen var tillåten att ske vart tionde år fram till tio år innan slutavverkning, vilket gör att samma yta kan ha gödslats flertalet gånger.

I scenariot *Gödsling*, där det saknades avverkningskrav, gödslas cirka 500 ha vid kolränta 0 % vilket var den minsta gödslade arealen. Vid ränta 10 % gödslades cirka 9 000 ha, medan ränta 50 % hade den största gödslade arealen på totalt 12 600 ha (figur 8.1).

I scenariot *Gödsling med avverkningskrav* var den gödslade arealen minst för kolränta 0 %. Där återfanns en gödslad areal på 9 400 ha. Vid 10 % var den gödslade arealen högst, med 12 400 ha. Denna areal skiljer sig marginellt från 50 % där den gödslade arealen var 12 300 ha (figur 8.2).

5. Diskussion

Skogen lyfts upp som en viktig pusselbit för att hantera klimatkrisen. Åsikterna går dock isär om hur skogen bör skötas. Ofta fastnar debatten i om det är viktigt med ett stort kollager på kort sikt för att vi ska nå de uppsatta klimatmålen. Eller om det är klokt att fortsätta bygga upp kollagret över längre sikt, här lyfts substitution som en viktig aspekt. Med hjälp av beslutsstödssystemet Heureka har fyra olika scenarion skapats där diskontering av kollagret till dagens värde har använts som metod för att representera hur skogen bör skötas givet om det är viktigt med ett stort kolförråd under kort-, medellång- och lång tid. Detta representeras av en kolränta på 50 %, 10 % och 0 %. Scenariona som analyserades benämndes som *Utan krav*, *Gödsling*, *Avverkningskrav* och *Gödsling med avverkningskrav*.

5.1 Tillförlitlighet och vidare studier

Sverige är ett långt land där boniteten och trädslagsfördelningen skiljer sig beroende på lokal. Vi kan därmed anta att om studien hade gjorts på en annan fastighet så hade resultatet skilt sig från vårt. Vår studie berör enbart 0,2 % av Sveriges totala produktiva skogsareal. Skogen på fastigheten består dessutom till nära 50 % av lövskog vilket är ovanligt för stora delar av Sverige. Det kan vid vidare analyser på ämnet därför vara klokt att inkludera fler fastigheter från andra delar av Sverige.

Heureka Planvis är ett smidigt verktyg som snabbt kan lösa komplexa optimeringsproblem. Programmet lämpar sig bra för ”vad ” och ”hur” analyser om skogen, då programmet använder sig av maximering och minimering av målfunktioner. Planvis bygger på tillförlitliga modeller som dock främst är anpassade till barrträd. Då vår fastighet består av en stor andel löv så kan det till viss del ha påverkat våra resultat eftersom växtsätten skiljer sig åt mellan barr- och lövträd.

Vid en ny analys är det inte säkert att exakt samma skötsel kommer ske då de simulerade skötselprogrammen kan variera mellan TPG-körningarna. Vi använde oss av 20 program som brukar vara standard och antar därför att tillräckligt många möjligheter fanns för att generera ett tillförlitligt resultat.

I vidare studier på ämnet hade det varit intressant att inkludera olika gallringsstyrkor, substitutionseffekten samt lagring av kol i träprodukter för att få ett ännu bredare perspektiv på klimatnyttan. Samt att ett scenario borde ha representerat dagens skogsbruk med hänseende till dagens avverkningsvolym för att kunna jämföra om kollagret och skötseln skiljer sig mot våra scenarion.

5.2 Val av skötselprogram

Gemensamt för scenariona är att vid maximering av kolförrådet, lämnas stora arealer utan åtgärd genom skötselstrategin *Låt stå*, oavsett kolränta. Det skiljer sig dock en del beroende på när det är viktigt med ett stort kollager och om det finns avverkningskrav, där arealen *Låt stå* tenderar att vara mindre. Generellt sett avsätts störst arealer skog vid kolränta 0 %, som symboliserar det långa tidsperspektivet, och minst skog sätts av vid en kolränta på 50 %, som symboliserar det korta tidsperspektivet.

I perspektiv till de olika certifieringar som finns idag avsätts i samtliga scenarion mer än minimikravet. Kraven från FSC och PEFC är att minst 5 % av skogsarealen ska avsättas som hänsynsytor (FSC 2020; PEFC 2024). Jämförelsevis avsätts ca 80 % av den totala skogsarealen i scenariot *Utan krav*, vilket är den största andelen bland scenariona. Som minst avsätts ca 10 % i scenariot *Gödsling med avverkningskrav* vid kolränta 50 %. Enligt konventionen om biologisk mångfald (CBD) bör dock minst 30 % av all landareal skyddas till år 2030 (CBD 2020), vilket är mer än vad kolräntorna 50 % i scenariona med avverkningskrav avsätter. Att låta skogen stå kan dock medföra risker, som exempelvis storm och skadegörare (Fridman et al. 2022), vilket bör beaktas om mycket skog ska avsättas.

Skötselstrategier som tillåter gödsling ger större tillväxt än *Låt stå*. Men då gödsling bara tillåts om avverkning är en åtgärd i skötselprogrammet och avverkning i sin tur minskar kolförrådet är nettovinsten störst för att låta skogen stå vid det långa tidsperspektivet. Om det däremot är viktigt med ett stort kolförråd i närtid där framtidens kolförråd saknar betydelse, blir nettovinsten större av att gödsla och avverka. Det ses bland annat i scenario *Gödsling* som innehar det största kolförrådet och gödslar en del av bestånden (figur 2 och figur 3). Avverkningen tenderar dock att sammanfalla vid samma tidpunkt vilket ses som minskningar i grafen för kollager och som stora toppar i grafen för avverkad volym (figur 3; figur 4). Detta antas vara en effekt av diskonteringsformeln. Vi tror att det beror på att omloppstider har valts så att kolförrådet buffras fram till att kolförrådet tappar värde för 50 % och 10 % kolräntorna, vilket i diskonteringsformeln är runt år 50 (figur 1). Till exempel kan ett bestånd som är 70 år vid beräkningsperiodens start tilldelas

förlängda omloppstider med 41 – 50 efter LSÅ. Och ett bestånd som är 10 år vid beräkningsperiodens start tilldelas en skötselstrategi som är 0 - 10 år efter LSÅ. Båda bestånden kommer då att avverkas vid period 10 – 11, som 110 år respektive 60 år gamla. Detta resonemang stödjer även den stora spridningen i medelslutavverkningsålder som framför allt ses hos 50 % kolröntorna (figur 5).

I scenariona med avverkningskrav tenderar arealen att vara fördelad över fler skötselstrategier än i de utan avverkningskrav. Det kan bero på som tidigare nämnda diskonteringsfaktorn men även på att det möjliggör att avverka tillräckligt mycket för att uppnå avverkningskraven. Framför allt ökar strategin 0–10 år efter LSÅ och hyggesfritt. Att skötselstrategin *Hyggesfritt* ökar mer i förhållande till 0–10 skulle kunna bero på att det bibehåller ett visst kollager samt att nedbrytningshastigheten av markkolet antas vara mindre än vid ett hygge, samtidigt som det kan tas ut volym för att uppnå avverkningskravet. Detta stämmer även överens med Assmuth och Tahvonens studie (2018). De såg att när det fanns ett avverkningskrav så ökade andelen skog som sköttes hyggesfritt jämfört med när det inte fanns avverkningskrav.

I Assmuth och Tahvonens studie (2018) framkom det också att vid diskontering av kol, men där genom att tilldela kolet ett ekonomiskt värde, resulterade det i spridda slutavverkningsåldrar beroende på räntesatserna. I vår studie observerades att en kolränta på 0 % tenderade att avverka yngre skogar när ett avverkningskrav appliceras. Troligtvis för att det är bättre att låta de skogar med högre volym stå och fortsätta ackumulera kol och därför avverka de yngre skogarna där volymerna förväntas vara lägre, för att uppfylla avverkningskraven. Yngre skogar växer snabbare och har en högre kolinbindningshastighet, men det tar däremot lång tid innan det innehar samma kollager som den äldre skogen.

5.3 Gödslings påverkan på kollagret

Gödsling samt att undvika avverkning ökar kolförrådet, vilket är förväntat med tanke på att tillväxten höjs och att ingen skog avverkas. De scenarier som tillåter gödsling uppvisar generellt ett större kolförråd jämfört med de som inte tillåter gödsling. För scenarierna med avverkningskrav är kolförrådet generellt lägre när respektive kolränta jämförs (figur 3). Detta stämmer till viss del överens med studien av Jørgensen et al. (2021) som drog slutsatserna att gallring minskade kolförrådet medan gödsling ledde till ökad kolakumulering. Gödsling kan dock medföra problem för skogsekosystemet och omkringliggande ekosystem i form av övergödning, försurning och förändring av artsammansättningar (Jørgensen et al

2021). Att gödsla medför även extra kostnader som vi inte har tagit hänsyn till. I framtida analyser bör detta tas i beaktning.

5.4 Svårigheten att påskynda större kollager

Analysen visar att skillnaderna i kollagren mellan de olika kolröntorna är små inom respektive scenario (figur 3), särskilt i början fram till mitten av beräkningshorisonten. I början av beräkningsperioden tenderar kollagret att vara högre för kolröntorna 50 % och 10 %, men resultatet är inte statistiskt säkerställt då skillnaderna är så pass små. Detta indikerar att det kan vara svårt att signifikant öka tillväxten i stående skog, och därigenom öka kolförrådet i närtid. Mot mitten av beräkningsperioden visar kolröntan på 10 % det högsta kollagret, medan kolröntan på 0 % fortsätter att stiga och når sin topp mot slutet av perioden.

För att nå LULUCFs mål på att öka Sveriges koldioxidupptag med 3,995 M ton till 2030 så är det svårt för oss att säga vilket av scenarierna som lämpar sig bäst. Idag (2024) är det bara 5,5 år kvar till 2030 och det vi ser i vår rapport är att det är svårt att öka kolförrådet snabbt på kort sikt. De åtgärder som skulle kunna rekommenderas är att gödsla skogen och att förlänga omloppstiderna. Eventuellt går det att rekommendera hyggesfria metoder för att fortsatt ha stående träd i beståndet efter att virkesuttag har skett. Det är emellertid svårt att fastställa om ett specifikt skötselsystem med avseende på trakthyggesbruk med förlängda omloppstider eller hyggesfritt skogsbruk där uttag av virke är ett krav, ger större klimatnytta än det andra. Detta stämmer även överens med Lundmark et al. (2016) som drar slutsatsen att det inte spelar så stor roll vilket skötselsystem som används utan att det är den ökade tillväxten som ger den största klimatnyttan.

5.5 Avverkningsvolym

I de flesta scenarion avverkas minst i fallen med 0 % kolränta till följd av den stora arealen av *Låt stå* vilket även är fallet för hela scenario *Utan krav*. Störst avverkning sker i scenarierna med avverkningskrav och framför allt i *Gödsling med avverkningskrav*. När avverkningskrav finns håller sig avverkningsnivåerna på miniminivå fram till beräkningsperiodens mitt. Därefter sticker framför allt kolröntorna 10 % och 50 % i scenario *Avverkningskrav* och *Gödsling med avverkningskrav* ut med sina avverkningstoppar i period 10 och 11, samma sak ses även för *Gödsling*. Anledningen till att dessa avverkningstoppar syns kan som tidigare nämnt bero på kolröntans effekt och att det därmed har valts olika förlängda omloppstider för att bibehålla ett högt kollager över respektive tidsperspektiv. De

förlängda omloppstiderna kan antas ta slut vid period 10 – 11 där avverkningarna sedan sammanfaller.

5.6 Samband mellan när ett stort kollager är viktigt och avverkningsålder

Generellt sett ligger slutavverkningsåldrarna högre än snittet för Götaland, som är cirka 85 år (figur 5). Detta visar att när kollagret maximeras så höjs medelslutavverkningsåldrarna för samtliga scenarion och räntor, vilket indikerar att skötsel med exempelvis förlängda omloppstider är gynnsamt.

För scenarion med ränta 0 % är det generellt lägre medelslutavverkningsålder och mindre spridning mellan de olika scenariona. 0 % står dock för den största arealen *Låt stå* i samtliga scenarion (figur 2). I de fallen där 50 % kolränta använts är åldersspridningen som störst, och där återfinns både de äldsta och de yngsta skogarna som avverkas, som förmodligen beror på att fler strategier med olika förlängda omloppstider valts. Det går även att se indikationer på att avverkningskraven sänker slutavverkningsåldern.

6. Slutsatser

Att skapa ett stort kollager i närtid kan vara svårt då skogen växer i begränsad hastighet. De åtgärder som kan göras är att gödsla och förlänga omloppstiderna. När avverkningskrav finns ökar andelen hyggesfritt skogsbruk.

För att få högt kollager vid ett medellångt tidsperspektiv bör skogen gödslas och skötas med förlängda omloppstider. Det är dock fortsatt stor andel som sköts med *Låt stå* samt *Hyggesfritt*.

Om ett stort kollager är lika viktigt idag som på lång sikt är det viktigt att bevara så mycket av lagret som möjligt och förlita sig på en stadig tillväxt. Ett generellt mönster som kan ses är att desto viktigare det är med ett stort kollager på lång sikt desto större arealer avsätts genom skötselstrategin *Låt stå*.

Att sköta sin skog för att maximera kolförrådet kan göras på flera sätt. Det behöver inte nödvändigtvis vara att avsätta all skog, men det går att se trender på att det är viktig del i det hela. Vi vill poängtera att det är viktigt att väga in flera mål för att kunna ta väl underbyggda beslut om sin skog. För att öka invägande av flera mål i sin skogsbruksplan så behövs fler incitament för att arbeta med flera mål. Detta för att i slutändan bidra till en hållbar framtid.

Referenser

- Ahlström, A., Broadgate, W., Ciais, P., Lindroth, A., Lundberg, J., Pihl, E., Pongratz, J. & Wijkman, A. (2021). Låt skogen binda kol hellre än bli papper. Aftonbladet, 31 december. <https://www.aftonbladet.se/debatt/a/9KG7vI/lat-skogen-binda-kol-hellre-an-bli-papper> [2024-05-08]
- Assmuth, A. & Thavonen, O. (2018) Optimal carbon storage in even- and uneven-aged forestry. *Forest Policy and Economics*, 87, 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.09.004>
- Bergh, J., Egnell, G. & Lundmark, T. (2020). Skogens kolbalans och klimat. (Skogsskötselserien kapitel 21). Skogsstyrelsen. <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/mer-om-skog/skogsskotselserien/skogsskotselserien-21-skogens-kolbalans-och-klimatet-2020.pdf> [2024-04-09]
- Björheden, R. (2019). Det svenska skogsbrukets klimatpåverkan. Upptag och utsläpp av växthusgasen koldioxid. Skogforsk. 21 s. ISBN: 978-91-88277-08-04
- CBD (2020) Zero draft of the post-2020 Global Biodiversity framework. (CBD/WG2020/2/3) <https://www.cbd.int/doc/c/da8c/9e95/9e9db02aaf68c018c758ff14/wg2020-02-03-en.pdf> [2024-04-17]
- Eggers, J. & Öhman, K. (2020). *Overview of the PlanWise application and examples of its use*. (514) Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Resource Management. https://pub.epsilon.slu.se/17122/1/eggers_j_et_al_200602.pdf [2024-04-08]
- European Commission (COM)(2022) 283. EU Bioeconomy Strategy Progress Report. European Bioeconomy policy: stocktaking and future developments. (52022DC0283). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A283%3AFIN> [2024-04-22]
- Council of the European Union (EU) 2021/844. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law) – Letter to the Chair of the European Parliament Committee on the Environment, Public Health and Food Safety (ENVI) (2020/0036(COD)). (<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-8440-2021-INIT/en/pdf>) [2024-04-22]
- European Environment Agency (u.å). Carbon sink. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/carbon-sink> [2024-04-08]

- European Environment Agency (2023). Carbon stocks and sequestration in terrestrial and marine ecosystems: a lever for nature restoration? (Briefing no. 5/2022). European Environment Agency. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/816798>
- Fahlvik, N., Elfving, B. & Wikström P. (2014). Evaluation of growth functions used in the Swedish Forest Planning System Heureka. *Silva Fennica*. 48, 2 (1013). <https://doi.org/10.14214/sf.1013>
- Fridman, J., Westerlund, B. & Mensah, A, A. (2022) *Volymtillväxten för träd i Sverige under 00-talet*. (Arbetsrapport 540). Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning. https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/rt/dokument/arbetsrapport_540.pdf [2024-05-10]
- FSC (2020). FSC-STD-SWE-03-2019. FSC-standard för skogsbruk i Sverige. FSC Sverige
- Gong, P., Knutsson, A., Elofsson, K. (2022) *Styrmedel för att öka kolsänkor i skogssektorn*. (Rapport 7037). Naturvårdsverket. <https://www.naturvardsverket.se/4ac539/globalassets/media/publikationer-pdf/7000/978-91-620-7037-3.pdf> [2024-05-29]
- Hannerz, M., Arnesson Ceder, L., Eriksson, A. & Lundmark, T. (2024) *Skogen och klimatet – vad säger forskningen?* (Rapport Skog 2024:1). Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå. <https://doi.org/10.54612/a.5tsq9vkb4t>
- Heureka Wiki (2024a). PlanWise Tutorial. https://www.heurekaslu.se/w/index.php?title=PlanWise_Tutorial&oldid=10813 [2024-04-28]
- Heureka Wiki (2024b) *Kolanalyser* https://www.heurekaslu.se/w/index.php?title=Carbon_sequestration/sv&oldid=10816 [2024-04-25]
- Islam, R.Md. Jönsson, A.M. Bergkvist, J. Lagergren, F. Lindeskog, M. Mölder, M. Scholze, M. & Kljun, N. (2024). Projected effects of climate change and forest management on carbon fluxes and biomass of a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*. 349 (109959). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109959>
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf [2024-04-09]
- IPCC (2023) Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

- Jørgensen, K., Granath, G., Lindahl, B.D. & Strengbom, J. (2021). Forest management to increase carbon sequestration in boreal *Pinus sylvestris* forests. *Plant and Soil*, 466 (1), 165–178. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05038-0>
- Lundmark, T., J. Bergh, P. Hofer, A. Lundström, A. Nordin, B. C. Poudel, R. Sathre, R. Taverna and F. Werner (2014). "Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation." *Forests* 5(4).
- 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 (2), 203–213. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0756-3>
- Lundmark, T. (2020). *Skogen räcker inte - hur ska vi prioritera?* (Future Forests Rapportserie 2020:4). Sveriges lantbruksuniversitet. (ISBN: 978-91-576-9765-3)
- Lämmås, T., Sängstuvall, L., Öhman, K., Lundström, J., Årevall, J., Holmström, H., Nilsson, L., Nordström, E, M., Wikberg, P, E., Wikström, P. & Eggers, J. (2023). The multi-faced Swedish Heureka forest decision support system: context, functionality, design, and 10 years experiences of its use. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1163105>
- Martinez-Garcia, E., Nilsson, M, B., Laudon, H., Lundmark, T., Fransson, J, E, S., Wallerman, J. & Peicjl, M. (2024). Drought response of the boreal forest carbon sink is driven by understorey – tree composition. *Nature geoscience*. 17 (197-204). <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01374-9>
- Näringsdepartementet (2021). *EU:s skogsstrategi för 2030*. (2020/21:FPM145). Regeringskansliet.
- Näringsdepartementet (2021). *EU:s skogsstrategi för 2030*. (2020/21:FPM145). Regeringskansliet.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333 (6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- PEFC (2024) PEFC SWE 002:5 *Skogsbruksstandard*. Svenska PEFC
- 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 forest. *Global Change Biology*, 29 (4), 1119–1132. <https://doi.org/10.1111/gcb.16534>
- Pettersson, H., D. Ellison, A. Appiah Mensah, G. Berndes, G. Egnell, M. Lundblad, T. Lundmark, A. Lundström, J. Stendahl, and P.-E. Wikberg. 'On the Role of Forests and the Forest Sector for Climate Change Mitigation in Sweden'. *GCB Bioenergy* 14, no. 7 (2022): 793–813. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12943>.
- Pongratz, J., Ahlström, A., Bastos, A., Bergström, L., Broadgate, W., Ciais, P., Grassi, G., Lindroth, A., Obermeier, W., Norton, M., Pihl, E., Pukkala, T. & Wijkman, A. (2021). *State and future of boreal forest natural climate solutions*. [Poster]. Future Earth and the royal Swedish Academy of Science.

- <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RD13%20Poster%20Day%202020Jonggratz.pdf> [2024-05-10]
- SLU Riksskogstaxeringen (2023). Skogsdata 2023. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från SLU Riksskogstaxeringen. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning.
https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/rt/dokument/skogsdata/skogsdata_2023_webb.pdf [2023-04-08]
- SCB (2023). Marken i Sverige. Statistiska centralbyrån. <https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/marken-i-sverige/> [2024-04-08]
- Skogsindustrierna (2022) Fakta och nyckeltal 2022. Skogsindustrierna
<https://www.skogsindustrierna.se/siteassets/bilder-och-dokument/rapporter/fakta-och-nyckeltal/fakta-och-nyckeltal-2022.pptx> [2024-04-16]
- Skogsstyrelsen (2020). The State of the World's Forest Genetic Resources: Country Report Sweden. (2020/3). Skogsstyrelsen.
<https://www.skogsstyrelsen.com/globalassets/om-oss/rapporter/rapporter-20222021202020192018/rapport-2020-3-forest-genetic-resources-in-sweden---2nd-report.pdf> [2024-04-23]
- Skogsstyrelsen (2022a). *Underlag för strategisk planering för ökad kolsänka*. (2022/14) Skogsstyrelsen och Jordbruksverket.
<https://www.skogsstyrelsen.com/globalassets/om-oss/rapporter/rapporter-20222021202020192018/rapport-2022-14-underlag-for-strategisk-planering-for-okad-kolsanka.pdf> [2024-04-15]
- Skogsstyrelsen (2022b). *Översikt av åtgärder för ökad kolsänka i skogen*. (2022/15). Skogsstyrelsen. <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/om-oss/rapporter/rapporter-20222021202020192018/rapport-2022-15-oversikt-av-atgarder-for-okad-kolsanka-i-skogen.pdf> [2024-04-15]
- Skogsstyrelsen (2023). Effektanalys av några skogliga åtgärders påverkan på kolsänkan. (2023/10). Skogsstyrelsen. <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/om-oss/rapporter/rapporter-2023/rapport-2023-10-effektanalys-av-nagra-skogliga-atgarders-paverkan-pa-kolsankan.pdf> [2024-04-15]
- SVL 1979:429. 11§ *Högsta tillåtna areal för förnygringsavverkning*. Skogsstyrelsen.
- van Lierop, P., Lindquist, E., Sathyapala, S. & Franceschini, G. (2015) Global Forest area disturbance from fire, insect pests, diseases and severe weather events. *Forest Ecology and Management*, 352, 78–88.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.010>
- Wikberg, P, E. Ortiz Josefsson, C. Markström, M. Lundblad, M. (2023). *Scenarier för utveckling av upptag och utsläpp av koldioxid från LULUCF-sektorn - underlag till Miljömålsberedningen*. (Arbetsrapport 557) Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning.
(<https://www.sou.gov.se/contentassets/e66f5e3eaaed43ddb8ae786a452eed39/slu-scenarier-for-utveckling-av-upptag-och-utslapp-av-vaxthusgaser-fran-lulucf-sektorn.pdf>) [2024-04-15]

Bilaga 1. Kollager

Totalt kollager (ton kol) för samtliga scenarion							
Utan krav				Averkningskrav			
Period	0%	10%	50%	Period	0%	10%	50%
-	551 254	551 912	551 934	-	550 901	551 920	551 934
1	562 816	563 381	563 404	1	562 523	563 381	563 435
2	588 781	589 182	589 213	2	574 491	575 889	576 117
3	619 422	619 712	619 495	3	588 402	590 633	590 475
4	652 550	652 524	651 619	4	603 457	606 182	605 277
5	686 281	686 387	684 963	5	619 734	622 888	620 198
6	719 964	720 006	717 851	6	636 672	640 400	635 873
7	752 793	752 541	749 817	7	654 493	657 976	651 487
8	784 200	783 425	779 898	8	672 055	674 571	666 180
9	814 232	813 238	808 633	9	690 125	690 595	680 055
10	842 233	840 819	835 690	10	707 293	705 996	693 202
11	868 275	866 286	860 098	11	723 964	720 202	679 575
12	892 385	889 541	882 549	12	740 249	733 052	685 676
13	914 336	910 862	903 601	13	755 275	744 207	691 557
14	934 236	930 024	921 223	14	769 671	754 164	698 005
15	951 841	947 151	937 738	15	782 657	762 280	703 920
16	967 605	961 826	952 017	16	794 227	768 508	708 609
17	980 238	973 904	963 007	17	803 865	772 726	712 808
18	992 094	985 597	969 431	18	811 551	776 132	710 960
19	1 002 498	995 654	977 915	19	817 796	778 890	703 652
20	1 011 359	1 004 436	985 716	20	822 642	780 754	703 881
Gödsling				Gödsling med averkningskrav			
period	0%	10%	50%	Period	0%	10%	50%
-	551 249	551 907	551 930	-	551 361	551 910	551 930
1	562 806	563 371	563 394	1	562 867	563 374	563 425
2	588 828	592 324	593 357	2	576 928	579 555	579 997
3	619 495	623 219	624 356	3	591 889	594 615	594 239
4	652 658	660 018	654 168	4	609 160	614 474	613 793
5	686 254	694 405	686 738	5	626 832	632 199	629 504
6	719 889	729 707	717 689	6	646 024	654 030	650 488
7	752 623	762 416	748 118	7	664 657	672 638	666 693
8	784 121	796 915	773 312	8	684 072	694 120	686 108
9	814 192	826 946	800 220	9	702 934	711 951	700 485
10	842 421	858 263	828 062	10	721 952	731 700	718 785
11	868 518	883 951	850 843	11	739 797	747 749	731 873
12	892 867	816 421	780 601	12	757 199	745 940	642 220
13	914 840	824 192	785 980	13	772 977	756 614	639 161
14	934 846	820 617	774 222	14	788 547	756 523	640 606
15	952 452	832 905	785 890	15	802 785	764 859	645 386
16	968 296	819 964	749 826	16	814 978	729 643	653 646
17	981 930	832 119	757 150	17	825 934	720 773	664 879
18	994 023	834 433	746 397	18	835 181	706 348	645 088
19	1 004 695	849 732	753 332	19	844 260	701 989	627 012
20	1 012 417	859 690	753 777	20	838 789	685 289	633 091

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Läs om SLU:s publiceringsavtal här:

- <https://www.slu.se/site/bibliotek/publicera-och-analysera/registrera-och-publicera/avtal-for-publicering/>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.