

SKOGENS KOLBALANS OCH KLIMATET



Skogsskötselserien är en sammanställning för publicering via internet av kunskap om skogsskötsel utan ställningstaganden eller värderingar.

Texterna har skrivits av forskare och har bearbetats redaktionellt både sakligt och språkligt. De är upphovsrättsligt skyddade och får inte användas för kommersiellt bruk utan medgivande.

I Skötselserien ingår:

1. Skogsskötselns grunder och samband
2. Produktion av frö och plantor
3. Plantering av barrträd
4. Naturlig förnyring av tall och gran
5. Sådd
6. Røjning
7. Gallring
8. Stamkvistning
9. Skötsel av björk, al och asp
10. Skötsel av ädellövskog
11. Blädningsbruk
12. Skador på skog
13. Skogsbruk – mark och vatten
14. Naturhänsyn
15. Skogsskötsel för rekreation och friluftsliv
16. Produktionshöjande åtgärder
17. Skogsbränsle
18. Skogsskötselns ekonomi
19. Skogsträdsförädling
20. Slutavverkning
21. *Skogens kolbalans och klimatet*

Skogsskötselserien har tagits fram med finansiering av Skogsstyrelsen, Skogsindustrierna, Sveriges lantbruksuniversitet och LRF Skogsägarna. Bidrag har även lämnats av Energimyndigheten för behandling av frågor som rör skogsbränsle och av Stiftelsen Skogssällskapet. Detta kapitel har fått särskilt stöd av Erik Johan Ljungbergs Utbildningsfond.

Skogsskötselserien – Skogens kolbalans och klimatet 2020

Författare:

Johan Bergh, SkogDr, professor i skogsskötsel, Linnéuniversitetet
Gustaf Egnell, SkogDr, docent i skogsbaserad bioenergi, SLU
Tomas Lundmark, SkogDr, professor i skogsskötsel, SLU

© Johan Bergh, Gustaf Egnell, Tomas Lundmark och Skogsstyrelsen

Redaktör: Clas Fries, Skogsstyrelsen

Typografisk formgivning: Michael Ernst, Textassistans AB

Grafisk profil: Louise Elm, Skogsstyrelsen

Diagrambearbetning och sättning: Bo Persson, Skogsstyrelsen

Foto omslag: Mostphotos

Utgivning: Skogsstyrelsens förlag, www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien

Innehåll

Förord.....	4
Skog, kolbalans och klimat – några utgångspunkter	8
Skogens klimatnytta.....	8
Den hållbart brukade skogen är koldioxidneutral	10
Avverkningsnivå i landet	11
Skogens kolbalans – grunder	13
Fotosyntes och respiration varierar med ljus och temperatur	14
Kolbalans vid trakthyggesbruk	15
Kolbalans vid blädningsbruk	17
Tillväxtskillnader	18
Tillväxten avgör klimatnyttan.....	19
Hur kan skogens klimatnytta öka?.....	20
Substitution – hur vi använder skogsråvaran	20
Lagerförändring – var kolet samlas	21
Olika systemperspektiv kan leda till olika slutsatser	22
Kolbalansen i Sveriges skogar	27
Inlagring och förråd av kol i trädbiomassa	27
Inlagring och förråd av markkol i skogsmark.....	29
Kol bundet i torvmark.....	32
Skogsbrukets och skogsindustrins koldioxidbalans.....	34
Skogsskötsel för ökad klimatnytta	36
Beståndsanläggning och beståndsvård.....	36
Förlängd omloppstid	38
Skogsskador	39
Skogsgödsling	41
Ungskogsgödsling av gran.....	42
Blandskog, lövträd och främmande trädslag.....	43
Skörda mer av det som finns.....	44
Grenar och toppar – GROT.....	45
Stubbar	46
Klena träd.....	47
Hur påverkar skoglig bioenergi klimatet?.....	49
Kolskuld eller kolkredit	49
Fossila bränslen tillför nytt kol till atmosfären	49
Uttag av skogsbränsle är integrerat med annan skörd.....	50
Olika tidsperspektiv	51
Klimatnyttan i framtiden.....	54
Litteratur	57
Bilaga 1: Vad påverkar jordens klimat?.....	63
Växthuseffekten möjliggör liv på jorden	63
Koldioxid viktigast bland antropogena växthusgaser	65
Bilaga 2: Fossil förbränning största koldioxidkällan	68
Det globala kolets fördelning.....	69
Bilaga 3: Rapportering av skogens kolbalans och växthusgasbalanser i Sverige	71
Den svenska skogens växthusgasbalans	72
Sveriges totala växthusgasbalans	73

Förord

Klimatförändringen anses idag av många som människans största långsiktiga utmaning och som kräver kraftfulla insatser. Klimatet styrs av en mängd processer där omsättningen av växthusgaser är viktig, men också andra biologiska och fysikaliska processer påverkar såsom till exempel vattenavgång från vegetation och mark (evapotranspiration) och dess reflektionsförmåga (albedo).

Den enskilt största faktorn som påverkar klimatet är emellertid den kraftiga ökningen av växthusgaser i atmosfären och av dessa är koldioxid den enskilt viktigaste. Detta kapitel fokuserar på skogens kolbalans och hur skogen och dess skötsel kan bidra till att bromsa ökningen av koldioxid i atmosfären, medan andra klimatpåverkande faktorer endast berörs kortfattat.

Människans användning av fossilt kol, olja och naturgas har tillfört och tillför fortfarande mycket stora mängder koldioxid till atmosfären. Även tillverkning av cement (ingrediens i betong), förändrad markanvändning och avskogning i olika delar av världen påverkar atmosfärens innehåll av koldioxid. Under 2018 ökade koldioxidmängden i atmosfären med nästan ofattbara 19 miljarder ton (Gt, gigaton).¹ De totala fossila utsläppen var 40 Gt, men hav och vegetation beräknas ha tagit upp ungefär halva den mängden.

Som jämförelse var Sveriges utsläpp av växthusgaser 2018 cirka 52 miljoner ton koldioxidekvivalenter om man inte räknar med markanvändningssektorn.^{2,3} Det motsvarar cirka 0,13 % av det globala koldioxidutsläppet. Markanvändningssektorn, där skogsbruk är den dominerande delen, svarar dock för ett årligt upptag på 42 miljoner ton. Nettoutsläppet för Sverige blir därför ungefär 10 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år, det vill säga 0,05 % av det globala nettoutsläppet. Till detta kommer utsläpp i andra länder vid tillverkning av produkter vi importerar och utsläpp i Sverige vid tillverkning av produkter som vi exporterar.

Skogen ger på det sättet redan idag ett stort bidrag till klimatarbetet men kan inte ensam lösa hela den kvarstående klimatutmaningen. Skogen kan dock ge ett stort ytterligare bidrag om man tar tillvara lokala och regionala förutsättningar på ett bra sätt.⁴

Skogen bidrar till klimatarbetet genom att när den växer tar den upp koldioxid från i atmosfären och lagrar in den i biomassa. På så sätt kan skogen kompensera för utsläpp i andra samhällssektorer och begränsa utsläppsökningen av koldioxid till atmosfären. Tillväxten kan också skördas och om-

¹ Friedlingstein, P. m.fl. 2019. Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* 11: 1783–1838. Tillgänglig på: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.

² Koldioxidekvivalenter (CO₂e) är ett mått på utsläpp av växthusgaser som tar hänsyn till att olika växthusgaser har olika förmåga att bidra till växthuseffekten. Utsläppen av en viss växthusgas uttryckt i koldioxidekvivalenter anger hur mycket koldioxidutsläpp som ger samma verkan på klimatet.

³ Statistiska Centralbyrån. 2020. Utsläpp av växthusgaser i Sverige.

<https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag/>. (Hämtad 2020-09-23.)

⁴ Berndes, G., Goldmann, M., Johnsson, F., Lindroth, A. & Wijkman, A. 2018. Forests and the climate. Manage for maximum wood production or leave the forest as a carbon sink? Report from a conference held on March 12–13, 2018, in Stockholm, Sweden. KSLAT 6–2018.

vandlas till förnybara skogsprodukter som kan ersätta fossila bränslen, fossilintensiva produkter och betong. På så sätt minskas fossilberoendet och tillförseln av ny koldioxid som tidigare inte funnits i det atmosfäriska kretsloppet.

I Sverige har skogen länge bidragit till klimatarbetet genom att både lagra in kol i ett växande virkesförråd och genom att begränsa beroendet av fossila resurser och betong. För att förstå hur skogen kan bidra måste man ange vad man jämför med och vad man vill uppnå. Om skogens roll i klimatarbetet ska förstärkas så måste bidraget öka jämfört med den klimatnytta som skogen redan skapar.

I detta kapitel beskriver vi författare hur vi definierar klimatnytta, hur skogens kolbalans fungerar under svenska förhållanden och hur svensk skog och skogsprodukter kan bidra till klimatarbetet. Vi ger också exempel på hur olika systemperspektiv påverkar slutsatserna om hur skogen kan bidra till klimatarbetet på kort och lång sikt.

I tre bilagor sist i kapitlet beskrivs kortfattat vad som påverkar jordens klimat, de mest betydande koldioxidkällorna, hur jordens kolförråd fördelar sig mellan olika pooler, hur den svenska skogens kolbalans rapporteras samt växthusgasbalanser för den svenska skogen och Sverige totalt.

SKOGENS KOLBALANS OCH KLIMATET

Skogen i Sverige gör stor klimatnytta. Utan skogen hade vi i Sverige behövt använda fossila energikällor i betydligt större utsträckning och nettoutsläppen av koldioxid hade varit väsentligt högre än vad de är idag. Skogen har dessutom buffrat för utsläpp i andra samhällssektorer genom att koldioxid under lång tid lagrats in i ett växande virkesförråd.

Skogen kan göra ännu större nytta i framtiden. Högre tillväxt i skogen ökar skogens möjligheter att göra ytterligare klimatnytta. Det gäller oavsett om kol lagras i träd och mark eller om skogsråvaran används för substitution. En avvägd kombination av dessa strategier är sannolikt det mest effektiva.

Ökad tillväxt i skogen kan göra klimatnytta på tre sätt:

- den kan genom fotosyntesen ta upp och lagra in koldioxid från atmosfären i levande träd och annan vegetation,
- den kan lagra in kol i skogsprodukter, i skogsmark och i död ved där avverkningsrester i form av stubbar utgör en stor andel i den brukade skogen,
- den kan minska nytillförseln av koldioxid som inte funnits i atmosfären på miljontals år genom att ersätta (substituera) fossilintensiva produkter, fossila bränslen och betong.

Att öka kollagret i skogen ökar klimatnyttan på kort sikt, men kan bara ske under begränsad tid så länge skogens kolförråd kan öka. Förutsättningarna är extra gynnsamma i skog som brukas för virkesproduktion eftersom den i början har hög tillväxt. När kollagret nått sin maximala nivå bidrar denna strategi inte längre till klimatnyttan. Utmaningen blir då att bibehålla förrådets storlek. Om ökningen av kollagret i skogen sker på bekostnad av avverkningsnivån blir åtgärden klimateffektiv endast om marknaden minskar sin konsumtion av skogsråvara – annars sker avverkningen någon annanstans eller så ökar användningen av fossilbaserade produkter och betong, vilket måste beaktas i analysen.

Kollagret i skogsmarken är större än kollagret i levande träd, men det har byggts upp sedan istiden och är betydligt mindre dynamiskt än kollagret i levande träd. I klimatsammanhang och på kort sikt har detta lager därför relativt liten betydelse i den brukade svenska skogen. Undantaget utgörs av dikade, beskogade torvmarker.

Kollagret i skogen i form av död ved inklusive avverkningsrester lagrar kol under en tid, men genom nedbrytningsprocesser kommer en stor del av det lagrade kolet i den döda veden att frigöras som koldioxid som återförs till atmosfären. Koldioxid har en lång uppehållstid i atmosfären (40 % kvar efter 100 år). Att använda fossila bränslen istället för avverkningsrester innebär därför att koldioxid från både det fossila bränslet och avverkningsresterna hamnar i atmosfären.

Att öka kollagret i produkter ger klimatnytta. Ökar inte lagret bidrar det inte längre till klimatnytta. Däremot kan flödet av skogsprodukter bidra till klimatnyttan genom att ersätta produkter som är mer skadliga för klimatet (substitution).

Substitution av fossila bränslen och fossilintensiva material som betong och metall är additiv nytta. Ett utsläpp som undvikits kan räknas som ogjort för alltid. Substitutionseffekten ackumuleras därför över tid, har störst betydelse på lång sikt och kan fortgå så länge det finns något som är sämre för klimatet att substituera.

Substitutionseffektens storlek styrs därför av tillgången på skogsråvara och vad man väljer att använda den till. Genom att i högre grad använda skogsråvara där substitutionseffekten är som störst kan klimatnyttan öka.

För det långsiktiga klimatarbetet är det viktigare att värna om skogens tillväxt än om dess kolförråd, även om båda är viktiga. Alla åtgärder som ökar skogens tillväxt utan att det minskar skogens kolförråd ger omedelbar och varaktig klimatnytta med dagens virkesanvändning.

Skogens klimatnytta kan öka jämfört med idag genom (1) mer aktiv skogsskötsel på större andel av virkesproduktionsmarken, (2) ökad användning av tillväxthöjande åtgärder, (3) att använda mer av det som redan finns i skogen och som bryts ner snabbt om det inte tillvaratas, det vill säga GROT och kläna träd i täta bestånd, (4) att effektivt utnyttja restprodukter inom industrin, (5) att hålla nere skogsskadorna, inte minst skador av klövvilt och klimatrelaterade skador, (6) att skogsråvaran används till nya produkter som har hög substitutionseffekt och (7) återanvändning av olika träprodukter i ett hållbart kretsloppssamhälle.

Det är bråttom att få till åtgärder för att minska växthusgasutsläppen om vi ska klara klimatmålen. Detta har medfört att många analyser av skogens klimatnytta har fokuserat på kortsiktiga effekter (ett eller ett par decennier) där man kommit till andra slutsatser än om analysen gjorts över för både skogen och klimatet relevanta tidsperioder (en omloppstid). Det snabbaste sättet att öka tillväxten i skogen och därmed klimatnyttan är att gödsla, men på längre sikt handlar det om att utveckla skogsskötselns alla delar. Även om det finns ett tryck på snabba åtgärder för att motverka klimatförändringen är det viktigt att inte bara inrikta sig på kortsiktiga effekter i skogen, utan **huvudinriktningen bör vara på långsiktiga effekter.**

Även om klimatet inte bryr sig om koldioxidens ursprung är det skillnad på biogent och fossilt kol. Kol som avges till atmosfären då biomassa från skogen bryts ner eller förbränns är ett biogent kol som ingår i en relativt sett snabb naturlig kolcykel som endast påverkar atmosfärisk koldioxid under förhållanden då kolcykeln är ur balans, det vill säga då upptag och avgång är olika stora. Det kan jämföras med förbränning av fossila bränslen som förflyttar kol som lagrats i miljontals år i geologiska lager till atmosfären. Det är en process som endast går i en riktning.

Skog, kolbalans och klimat – några utgångspunkter

Det finns olika uppfattningar om vilken betydelse skogen och hur den används har för klimatet. För att underlätta läsarens förståelse beskriver vi författare till detta kapitel i Skogsskötselserien inledningsvis några av våra utgångspunkter för den följande framställningen. Vi definierar skogens klimatnytta, beskriver varför skogen, såsom den sköts i Sverige, kan betraktas som koldioxidneutral samt beskriver tillväxt i förhållande till avverkning och naturlig avgång i den svenska skogen.

Den pågående klimatförändringen drivs till stor del av ökningen av halten koldioxid i atmosfären.⁵ De dominerande koldioxidkällorna är förbränning av fossila bränslen, biomassa eller produkter med ursprung i biomassa, samt cementtillverkning och nedbrytning av organiskt material.

Träd och andra växter tar vid fotosyntesen upp koldioxid som lagras i olika kolföreningar när de växer. I Sverige är skogens nettoupplagring (tillväxt minus avgång, främst genom avverkning) av koldioxid i samma storleksordning som landets totala växthusgasutsläpp uttryckt i koldioxidekvivalenter⁶. Dessutom bidrar den skördade skogen till produktion av skogsprodukter som används istället för fossilbaserade produkter och betong.

Utan den svenska skogen skulle alltså landets bidrag till koldioxidökningen i atmosfären vara mycket större än vad det är idag. Hur den svenska skogen växer och används har därför stor betydelse för i vilken grad den kan kompensera för koldioxidutsläppen och därigenom bidra till att bromsa klimatförändringen.

Skogens klimatnytta

Skogens klimatnytta bestäms primärt av hur mycket skogen växer och nyttan uppstår när:

1. koldioxid tas upp från atmosfären genom fotosyntesen och *lagras* in i levande träd och annan vegetation i form ett växande kollager,
2. kol *lagras* in i skogsprodukter, skogsmark och död ved där avverkningsrester i form av stubbar utgör en stor andel i den brukade skogen,
3. produkter baserade på skogsråvara producerad inom ramen för det relativt snabba biogena kolkretsloppet *ersätter* (substituerar) fossilintensiva produkter, fossila bränslen och betong som genererar utsläpp av koldioxid som inte funnits i atmosfären på miljontals år.

⁵ IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 s.

⁶ Koldioxidekvivalenter (CO₂e) är ett mått på utsläpp av växthusgaser som tar hänsyn till att olika växthusgaser har olika förmåga att bidra till växthuseffekten. Utsläppen av en viss växthusgas uttryckt i koldioxidekvivalenter anger hur mycket koldioxidutsläpp som ger samma verkan på klimatet.

Kollagrets storlek avgör inte klimatnyttan, utan den påverkas då kollagret förändras. Klimatnyttan ökar med ökande kollager, det vill säga ju större skogens tillväxt är jämfört med avverkning eller annan avgång bland träd. Förändringar i kollager i mark och markvegetation påverkar också klimatnyttan, men den överlägset snabbaste upplagringen av kol sker i träd som växer (se bilaga 3, *Den svenska skogens växthusgasbalans*).

Om kollagret i skogen är konstant, vilket ungefär motsvarar konstant virkesförråd⁷, så påverkas inte klimatet. Minskar virkesförrådet, det vill säga att avverkning eller annan avgång bland träd är större än tillväxten, minskar skogens kollager vilket är negativt för klimatet.



Figur SK1 Om skogens tillväxt är större än avverkning eller annan avgång bland träd ökar virkesförrådet och skogens kollager – skogen gör klimatnytta. Om virkesförrådet minskar blir skogens klimatpåverkan negativ. I Sverige har skogens kollager fördubblats under de senaste hundra åren. Under samma period har den årligen avvergade virkesvolymen kontinuerligt ökat. Detta har varit möjligt genom att tillväxten ökat genom skogsskötsel. Foto Mostphotos.

Den negativa effekten av minskat virkesförråd kan delvis kompenseras av ett ökat kollager i långlivade produkter. Även de stubbar och andra grövre avverkningsrester som blir kvar efter avverkning fungerar i ett uppväxande nytt bestånd som ett kollager, men som minskar långsamt genom nedbrytning.⁸ Klenare avverkningsrester såsom grenar och toppar har inte lika stor betydelse då de bryts ner relativt snabbt efter en avverkning och i

⁷ Virkesförråd används för att beteckna ett skogsbestånds volyminnehåll av ved och anges i allmänhet i skogskubikmeter, det vill säga trädens hela stamvolym inklusive topp och bark ovanför normal stubbhöjd. Grenar, stubbar och rötter räknas inte in i virkesförrådet, däremot i trädens totala biomassa.

⁸ I en studie där nedbrytningen av granstubbar i svensk skog modellerades befanns 50 % av stubbarnas organiska material återstå efter 15 år och 5 % efter 64 år: Melin, Y., Petersson, H. & Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden – A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257(5): 1445–1451.

Sverige skördas dessutom en del av detta så kallade GROT som ett energisortiment. (Se avsnittet *Skörda mer av det som finns*).

Skogsråvara som produceras inom ramen för det relativt snabba biogena kolkretsloppet ersätter också produkter som genererar utsläpp av ”ny” koldioxid som inte funnits i atmosfären på miljontals år. Skogsprodukter kan ersätta fossila bränslen (kol, olja och gas), betong men också energi-intensiva material som stål och aluminium. Vi talar här om klimatnytta genom substitution.

Några viktiga slutsatser:

- skogen gör redan stor klimatnytta men för att nå klimatmålen i samhället måste skogens bidrag till klimatarbetet öka,
- skogens tillväxt avgör hur stor klimatnyttan kan bli,
- en ökad skogstillväxt kan användas för att öka kollagret i skogen eller i produkter, eller för ökad substitution,
- det är inte kollagrets storlek som avgör klimatnyttan, det är förändringen av lagret. Ökande kollager är klimatpositivt, minskande kollager är klimatnegativt,
- substitutionseffekten av att ersätta andra material och fossila bränslen är additiv, det vill säga effekterna kan summeras till varandra. Ett utsläpp som undvikits kommer därför att kunna räknas som ogjort för alltid. Substitutionseffektens storlek beror på klimatavtrycket av den produkt som ersätts och mängden produkter som ersätts,
- skogsprodukter som leder till ökad konsumtion skapar ingen substitutionseffekt.

Idag lagras upptagen koldioxid både i skog som brukas för att senare avverkas (virkesproduktionsmark) och i skog som avsatts för naturvårds- eller andra ändamål (naturvårdsmark). Från virkesproduktionsmarken kommer timmer, massaved och skogsbränsle som används för produkter respektive direkt för energiändamål. Många skogsbaserade produkter som till exempel trä i byggnader kan efter att de tjänat ut brännas för energiändamål.

Enligt resonemanget ovan uppkommer klimatnytta både då koldioxid tas upp och lagras i skogen och då skog avverkas och skogsråvara används. Den övergripande frågan som diskuterats mycket under senare år är vilken avvägning mellan att lagra kol i skogen eller att avverka och använda skogsråvaran som ger störst klimatnytta under svenska förhållanden. Denna avvägning behandlas senare i detta kapitel.

Den hållbart brukade skogen är koldioxidneutral

En av skogens viktiga funktioner i klimatsammanhang är att skogsråvara som produceras inom det relativt snabba biogena kolkretsloppet kan användas istället för produkter som genererar utsläpp av koldioxid som lagrats länge i fossilt kol och som inte funnits i atmosfären på miljontals år – skogsråvaran substituerar mindre ”klimatsmarta” produkter.

Användning av fossilt kol, olja eller gas medför däremot en i stort sett enkelriktad nettotillförsel av koloxid till atmosfären där det bidrar till jordens uppvärmning.

Användning av skogsråvara till produkter eller bränsle innebär istället att kolet endast förflyttar sig mellan olika tillstånd och pooler av kol ovan jord och i det översta markskiktet. Det betyder att samma kolatomer återvinns med hjälp av växternas fotosyntes och återanvänds gång på gång utan att det totala antalet kolatomer i detta biogena kretslopp ökar.

För att en produkt ska betraktas som koldioxidneutral ur atmosfärens perspektiv krävs att det inte sker en nettotillförsel till just den poolen. Det betyder att skogen som odlingssystem och skogsprodukterna kan ses som koldioxidneutrala så länge som avverkning och/eller naturlig avgång långsiktigt inte överstiger tillväxten. Vid den internationella klimatrapporteringen så redovisas avverkningen av skog som ett utsläpp. På så sätt kan skogens produkter ses som koldioxidneutrala. Det är en av utgångspunkterna i detta kapitel i Skogsskötselserien.

Avverkningsnivå i landet

Den årliga tillväxten i den svenska skogen har under lång tid varit större än avgången (avverkning plus nedbrytning). Enda undantaget sedan 1950 är några år i början av 1970-talet då tillväxten låg på samma nivå som avgången. Enligt Riksskogstaxeringen har landets virkesförråd ökat från 1,72 miljarder skogskubikmeter vid mitten av 1920-talet då mätningarna började till 3,55 miljarder skogskubikmeter idag (medeltal för 2015–2019).⁹ Ökningen motsvarar ett upptag av 2,5 miljarder ton koldioxid, vilket i sin tur motsvarar 48 gånger Sveriges årliga utsläpp av växthusgaser på dagens (2018) nivå, som är 52 miljoner ton koldioxidekvivalenter.

Enligt de senast utförda skogliga konsekvensanalyserna (SKA 15) beräknas ett scenario där skogen i framtiden sköts ungefär som den sköttes omkring 2010 leda till en fortsatt ökning av landets virkesförråd fram till år 2110 i ungefär samma eller något lägre takt jämfört med omkring år 2015.¹⁰ Fortsatt ökning av virkesförrådet innebär att skogen lagrar in mer kol och att skogens klimatnytta genom ett ökande kollager därmed säkerställs under lång tid.

Det finns flera anledningar till att skogens tillväxt i Sverige under lång tid varit högre än summan av avverkning plus naturlig avgång:

- hyggesfria skogsbruksmetoder under 1700- och 1800- resulterade i glesa skogar med låg tillväxt,
- ett samhällskontrakt utvecklades i början av 1900-talet mellan stat, skogsindustri och markägare. Industrin skapar värde i förädlingskedjan, skogsägarna sköter skogen för uthållig råvaruproduktion och staten driver en skogspolitik för en långsiktig och hållbar förvaltning av skogen,
- trakthyggesbruk införs gradvis och sedan 1950-talet är det den dominerande modellen för svenskt skogsbruk,

⁹ Skogsdata 2020. SLU, inst. för skoglig resurshushållning. Tillgänglig på: https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/rt/dokument/skogsdata/skogsdata_2020_webb.pdf.

¹⁰ Claesson, S., Duvemo, K., Lundström, A. & Wikberg, P.-E. 2015. Skogliga konsekvensanalyser 2015 – SKA 15. Skogsstyrelsen, Rapport 10–2015.

- de senaste hundra åren har nettotillväxten i skogen överstigit avverkningen vilket inneburit ett stadigt ökande virkesförråd. Det har tillsammans med bättre skogsskötselmetoder och genetiskt förädlat skogsodlingsmaterial inneburit att tillväxten också ökat.

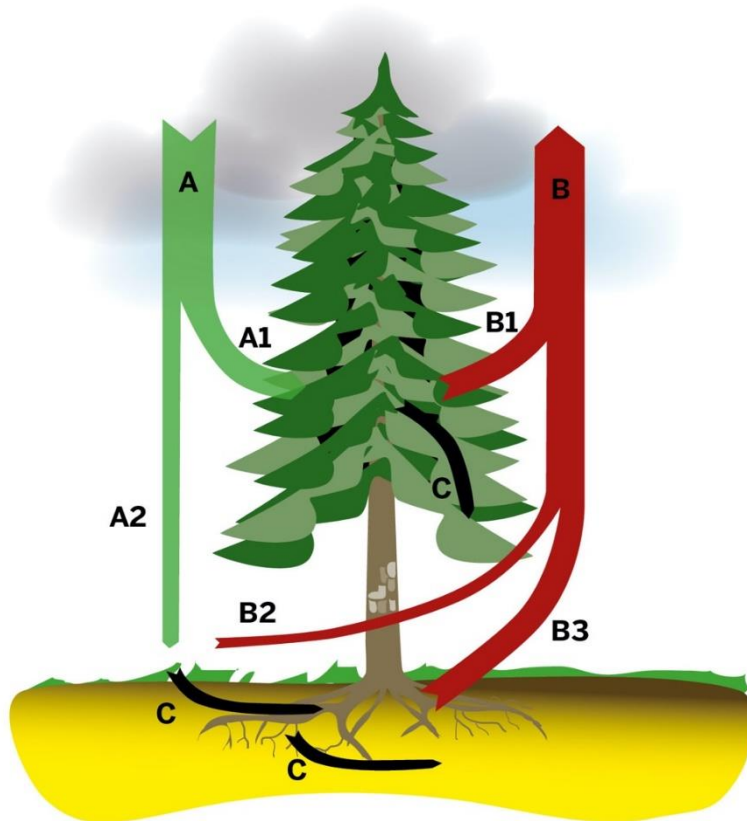
Sammantaget har skogens tillväxt ökat, virkesförrådet ökat och avverkningen ökat.

Skogens kolbalans – grunder

För att förstå skogens roll då det gäller att minska tillförseln av koldioxid till atmosfären och på så sätt bromsa klimatförändringen är det viktigt att känna till flöden och lager av kol som berör skogen.

Tre viktiga processer styr skogsekosystemets kolbalans (se även figur SK2):

1. fotosyntesen där träd och andra växter (autotrofa organismer) tar upp kol i form av koldioxid från atmosfären,
2. respirationen från autotrofa organismer, vilket innebär att delar av den genom fotosyntesen upptagna koldioxiden avges till atmosfären igen (autotrof respiration),
3. respiration från heterotrofa organismer, vilka inte kan fotosyntetisera utan istället är beroende av att konsumera organiska föreningar för att få energi (heterotrof respiration). Här återfinns markdjur, svampar och bakterier, men också större organismer.



Figur SK2 Vid fotosyntesen tas koldioxid upp (A) av träd (A1) och markvegetation (A2) men endast en mindre andel av det upptagna kolet kommer att lagras i form av biomassa. En stor andel av det upptagna kolet omsätts istället direkt och avgår som koldioxid till atmosfären (B), i form av respiration från träd (B1) och markvegetation (B2) (autotrof respiration). Koldioxid avges också då föna bryts ner (mineraliseras, förmultnar, heterotrof respiration, B3). Ovanjordsdelar av växter, rötter, markdjur och svampar bildar föna (C) som under skogens omloppstid successivt bygger upp kollagret i marken. Totalt tillförs skogsmarken på detta sätt stora mängder kol under en omloppstid, men den föna som tillförs bryts också successivt ner. Ökningen av kolförrådet i marken blir därför liten jämfört med vad som byggs in i träd och markvegetation under en omloppstid. Förlaga: Peter Roberntz.

En stor del av det kol som träd och övrig skogsvegetation tar upp genom fotosyntes går alltså åt direkt till deras respiration och avgår som koldioxid. Avgång sker också genom att förna¹¹ i form av växt- och djurdelar samt svampar löpande tillförs markens kolförråd där den successivt bryts ner. Till detta kommer kolförluster orsakade av skogsavverkningar (där en del kol lagras en längre tid i produkter samt i kvarvarande stubbar och annan grov död ved som successivt bryts ner) och skogsbränder (där en del kol lagras en tid i träkol och i döda träd).

Om vi ser på beståndsnivå och under en hel omloppstid har vi alltså två mycket stora kolflöden, där den lilla skillnaden mellan flödena avgör om skogens kolbalans är positiv (nettoinlagring av kol = skogen utgör en kolsänka) eller negativ (nettoförluster av kol = skogen utgör en kolkälla).

Fotosyntes och respiration varierar med ljus och temperatur

Att skogens kolbalans vid en given tidpunkt beror på skillnaden mellan två stora flöden gör att balansen uppvisar stor variation inom och mellan olika dygn och år och är väderberoende.¹²

Respirationen är starkt temperaturberoende och ökar exponentiellt med ökad temperatur, medan fotosyntesen i större utsträckningen styrs av mängden solljus.¹³ Vid höga temperaturer ökar respirationen mer än fotosyntesen vid liknade solljusförhållanden. Till skillnad från fotosyntesen pågår respirationen dygnet runt.

Om man mäter nettoflödet under ett sommardygn, ser man att träden förlorar koldioxid under dygnets mörka timmar och tar upp koldioxid när det är ljusst. Nettoupptaget av koldioxid är oftast störst mitt på dagen när vädret är klart och soligt.

Under vissa sommardygn kan ett bestånd avge mer koldioxid än det tar upp. Det kan inträffa under mycket varma dygn när respirationen från träd och mark på grund av hög lufttemperatur är större än fotosyntesen. Det kan också inträffa under dygn med mulet väder då fotosyntesen är låg på grund av mindre solinstrålning. Upptaget dagtid är oftast flera gånger större än avgången nattetid. Trots den stora variation som kan finnas tar skogen därför i genomsnitt upp mycket koldioxid de flesta dygn under vegetationsperioden.

Samma faktorer som ger högt nettoupptag av koldioxid ger hög tillväxt hos träden. Det betyder att en lång vegetationsperiod med soligt och klart väder, lagom med regn i kombination med god näringstillgång är förhållande som ger högt nettoupptag av koldioxid.¹⁴

¹¹ Förna är döda växt- eller djurdelar som ännu inte omvandlats till humus utan har kvar sin ursprungliga struktur. Förna kan delas in i fallförna (döda blad, barr och kvistar, med mera), bottenförna (rester av markvegetation och djur) och markförna (döda rester av rötter, markdjur, svampar och bakterier).

¹² Lindroth, A., Grelle, A. & Morén, A.-S. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biology* 4: 443–450.

¹³ Cannell, M.G.R. 1989. Physiological basis of wood production: a review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4: 459–490.

¹⁴ Wallin G., Linder S., Lindroth A., Rantfors M., Flemberg S. & Grelle A. 2001. Carbon dioxide exchange in Norway spruce at the shoot, tree and ecosystem scale. *Tree Physiology* 21: 969–976.

På våra nordliga breddgrader utgör klimatet och bristen på solljus under vinterhalvåret en begränsning för hur mycket skogen kan växa. Under den kalla och ljusfattiga perioden avger skogen därför mer koldioxid än vad den tar upp. Koldioxidupptaget under vegetationsperioden överskrider dock normalt avgivningen av koldioxid under vinterhalvåret.

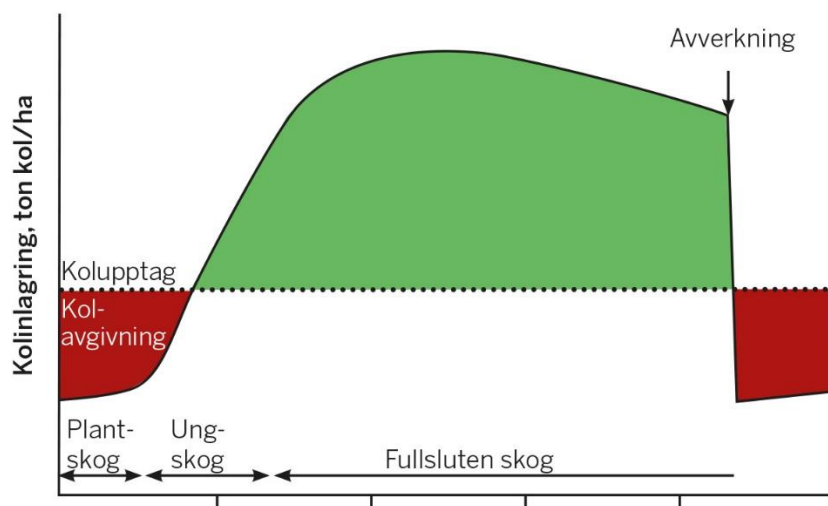
Kolbalans vid trakthyggesbruk

Under trakthyggesbrukets olika faser i ett och samma bestånd, från beståndsanläggning till föryngringsavverkning, varierar koldioxidflödets storlek och riktning och därmed nettoinlagringen av kol i skogsekosystemet.

Efter en föryngringsavverkning minskar upptaget av kol genom fotosyntes drastiskt. Samma sak gäller för den autotrofa respirationen (cellandningen hos fotosyntetiserarna), medan den heterotrofa respirationen (nedbrytningen) bibehålls eller ökar som ett svar på det nytillskott av högkvalitativt kol som avverkningsresterna bidrar med. Resultatet blir ett nettoutflöde av koldioxid.

På ett nyplanterat hygge bidrar inte skogsplantorna med någon betydande fotosyntesproduktion. I detta skede står mossor, lavar, ris, gräs och örter för den mesta av fotosyntesen. Deras kolbindning är dock förhållandevis liten jämfört med kolbindningen i ett uppvuxet och välslutet trädbestånd. Hyggesresterna medför en förhöjd nedbrytning och markrespirationen blir därför något förhöjd under hyggesfasen.

Sammantaget innebär detta att ett bestånd avger koldioxid under hyggesfas, plantstadiet och den första delen av ungskogsfasen. Från klimatsynpunkt är det därför värdefullt om ny skog etableras snabbt (figur SK3).



Figur SK3 Principskiss på hur kolinlagringen under en omloppstid vid trakthyggesbruk kan se ut. Det gröna området visar att skogen tar upp mer koldioxid än den avger. I de röda områdena är förhållandet det motsatta. Förlaga: Peter Roberntz.

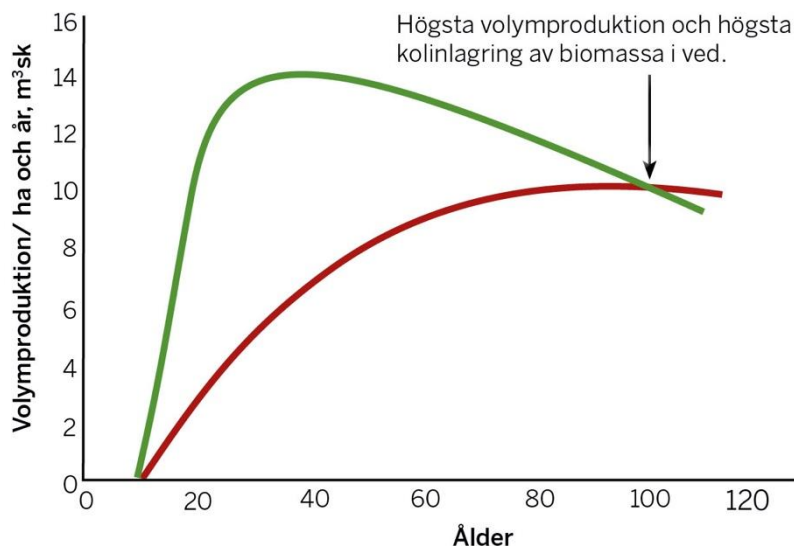
Tidpunkten då ungskogen går från att släppa ut till att ta upp koldioxid, det vill säga när beståndet går från att vara en kolkälla till att vara en kolsänka, beror på hur väl föryngringen etablerar sig, trädslag, klimatförhållanden, ståndortsförhållanden och skogsmarkens produktionsförmåga. Fältförsök i södra Sverige visar att granplanteringar går från att vara en kolkälla till att

vara en kolsänka då granarna vuxit sig 2–5 meter höga.¹⁵ En snabb etablering och uppbyggnad av barr och blad, som gör att fotosyntesen snabbt kommer igång, innebär högt koldioxidupptag och därmed hög tillväxt.

Skog har nettoupptag av koldioxid tidigare på marker med hög tillväxtförmåga jämfört med på svagare marker.

Då trädens tillväxt börjar ta fart och beståndet sluter sig ökar deras fotosyntes och kolbindning avsevärt. Samtidigt ökar förnafallet så den lilla förändringen av kollagret i de övre marklagren jämfört med upplagrat kol i avverkade träd återställs efter hand till den nivå det hade före förnygringsavverkning.

Under ett bestånds omloppstid är koluttaget störst efter det att beståndet slutit sig och i samband med att den löpande tillväxten kulminerar (figur SK4). Därefter avtar virkesproduktionen och därmed kolinlagringen i biomassa ju äldre skogen blir. För att binda maximalt med kol i trädbiomassa inom ramen för trakthyggesbruk bör förnygringsavverkning ske då medeltillväxten kulminerar.



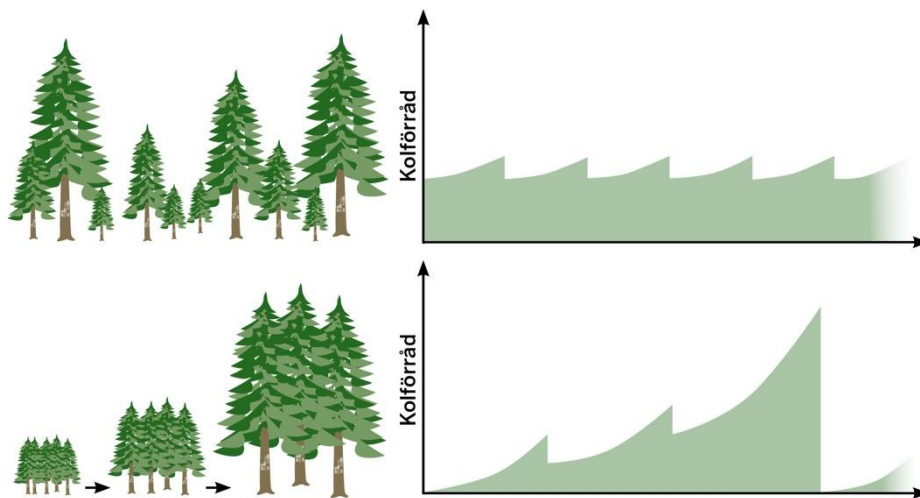
Figur SK4 Medeltillväxten (röd linje) i ett bestånd kulminerar då den årliga tillväxten (även benämnd löpande tillväxt) (grön linje) är mindre än medeltillväxten. Figuren visar ett exempel på den löpande tillväxtens och medeltillväxtens förlopp över tid i granskog med ståndortsindex G 32 (ståndortsindex (SI) anger högsta höjd i ett trädbestånd vid viss referensålder, här 100 år). Efter att medeltillväxten kulminerat avtar kolinlagringen i trädbiomassa (egentligen inlagringen i stamved). Källa: Lundqvist m.fl. (2014).¹⁶

¹⁵ Pågående fältstudier. Toftaholm, Kronobergs län.

¹⁶ Lundqvist, L., Lindroos, O., Hallsby, G. & Fries, C. 2014. Slutavverkning. Skogsskötselserien, kapitel 20. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

Kolbalans vid blädningsbruk

Ett alternativ som brukar diskuteras är om det går att öka den svenska skogens klimatnytta genom att istället för trakthyggesbruk tillämpa skogsskötselssystemet blädningsbruk.¹⁷ Blädning förutsätter fullskiktade skogar där det finns träd av alla storlekar. Blädning förutsätter även skuggfördragande trädslag¹⁸ om man vill minimera tillväxtnedsättningen som skogsskötselssystemet kan innebära. I Sverige innebär det gran, möjligen också bok, alm och lind. Vid blädning skördas regelbundet, i storleksordningen vart tionde till tjugonde år, ett antal av de större träden och ett betydande virkesförråd och därmed kolförråd lämnas kvar (figur SK5). Blädning kan ses som återkommande gallringar där i huvudsak de största träden avverkas.¹⁹



Figur SK5 Vid blädningsbruk i fullskiktad granskog (överst) är mängden upplagrat kol i träden hela tiden relativt hög och varierar lite i jämförelse med trakthyggesbruk (nederst). x-axeln motsvarar en tidsperiod på ungefär 100 år.

Logiken här är att om man kontinuerligt håller skogen i ett tillstånd där upptaget av koldioxid är större än utsläppet så är ett blädningsskogsbruk, med avseende på klimatet, bättre än trakthyggesbruk där koldioxid släpps ut i hygges- och delar av ungskogsfasen. Jämförelsen är emellertid inte så enkel.

Även vid blädning minskar fotosyntesen efter en skörd liksom den autotrofa respirationen, samtidigt som nedbrytning av avverkningsrester bidrar till ökad heterotrof respiration. Det leder till en från klimatsynpunkt försämrad kolbalans under några år.

Vid blädningsbruk återkommer man relativt ofta och gör virkesuttag. För att avkasta motsvarande virkesvolymen som vid trakthyggesbruk krävs att den årliga avverkningsen sker över en större areal. En rättvisande jämförelse med trakthyggesbruket kan därför inte göras på beståndsnivån utan måste

¹⁷ Blädningsbruk beskrivs i: Lundqvist, L., Cedergren, J. & Eliasson, L. 2014. Blädningsbruk. Skogsskötselserien, kapitel 11. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

¹⁸ Trädslag som fördrar skugga, det vill säga klarar att växa under skuggiga förhållanden.

¹⁹ Blädning är en form av hyggesfritt skogsbruk. Andra former är skärmskogsbruk med överhållen skärm av stora träd som avverkas först när föryngringen nått en viss höjd. Till hyggesfritt skogsbruk brukar också räknas luckhuggning och kanthuggning.

göras över större områden där koldioxidavgivning i hyggesfasen i fallet trakthyggesbruk kompenseras av tillväxt i andra mer växtliga bestånd. Blädningsbruk lämpar sig inte heller för alla trädslag om man har krav på hög virkesproduktion. Av våra inhemska trädslag är det bara gran som i större omfattning kan komma i fråga för blädningsbruk sett över hela landet. Eftersom virkesproduktionen ofta skiljer sig åt mellan skogsskötselssystemen komplicerar detta jämförelsen ytterligare.

Bristen på fältförsök med blädning gör att underlaget är svagt för att rättvist kunna jämföra virkesproduktionen mellan de två skogsskötselssystemen, men de kunskapsammansättningar som presenterats visar på lägre tillväxt när skogen blädas. Det är också viktigt att man jämför de två system så att de är representativa ur ett landskapsperspektiv. För trakthyggesbruket innebär det att man måste betrakta ett landskap som är tillräckligt stort för att innehålla alla åldersklasser och jämföra den genomsnittliga kolbalansen med ett blädningsbrukat skogslandskaps genomsnittliga kolbalans.

Det finns i dagsläget inga empiriskt baserade studier från svenska skogar som visar att kolbalansen för ett ”blädningsbrukat skogslandskap” skulle vara gynnsammare för klimatet än för ett ”trakthyggesbrukat skogslandskap”.²⁰ Den enda studie baserad på fältdata som gjorts är från granskog i Norge. Den visade att ökningen i det totala kolförrådet i mark samt träd-, fält- och bottenskikt under en 80-årsperiod var 10–15 % högre för trakthyggesbruk jämfört med blädningsbruk.²¹ Modelleringsstudier från Sverige visar resultat i samma riktning.²²

Tillväxtskillnader

En sammanvägning av studier i Finland och Sverige visar att blädning i fullskiktad grandominerad skog (”blädning i gran”) ger 10–20 % lägre skogstillväxt per arealenhet än det nuvarande skogsbruket med likåldriga skogsbestånd och en jämn åldersklassfördelning över landskapet.²³

Idag har uppskattningsvis 5 % av Sveriges skogsmarksareal en fullskiktad beståndsstruktur som gör att skogen där lämpar sig för blädning.²⁴ Ska blädning bedrivas på en större areal än så krävs att de enskiktade skogar som karaktäriserar trakthyggesbruket genom skogsskötsel omformas till fullskiktade skogar. En sådan omställning till en större areal fullskiktade skogar skulle innebära betydande tillväxtminskningar. Det finns studier

²⁰ Hannerz, M., Nordin, A. & Saksa, T. (redaktörer). 2017. Hyggesfritt skogsbruk. Erfarenheter från Sverige och Finland. Future Forests. Rapportserie 2017:1. SLU, Umeå. 74 s.

²¹ Nilsen, P. & Strand, L.T. 2013. Carbon stores and fluxes in even- and uneven-aged Norway spruce stands. *Silva Fennica* 47(4), artikel-id 1024. 15 s.

²² 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: 203–213.

²³ Lundqvist, L. 2017. Tamm Review: Selection System Reduces Long-term Volume Growth In Fennoscandic Uneven-aged Norway Spruce Forests. *Forest Ecology and Management* 39: 362–375. doi: 10.1016/j.foreco.2017.02.011.

²⁴ Lundqvist, L., Cedergren, J. & Eliasson, L. 2014. Blädningsbruk. Skogsskötselserien, kapitel 11. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

som tyder på upp emot 50 % lägre tillväxt under en omställningsperiod på 30–50 år.²⁵

Blädning bygger på naturlig föryngring och därmed förloras den tillväxtpotential som ligger i att välja bästa trädslag och ta till vara den framtida tillväxtökning som skogsträdsförädlingen ger.²⁶ Att tillämpa trakthyggesbruk istället för blädningsbruk gör det också möjligt att välja trädslag och härkomst inom trädslag för att bättre anpassa den framtida skogen för ett förändrat klimat. En annan fördel som trakthyggesbruk har jämfört med blädning är att det på hyggen jämfört med i en blädad skog, är lättare och mer ekonomisk gynnsamt att ta ut GROT (grenar och toppar) som bränsle och på så sätt bidra till utfasningen av fossila bränslen.

Tillväxten avgör klimatnyttan

I en modelleringsstudie jämfördes trakthyggeskogsbruk och blädningsbruk i granskog i ett livscykelperspektiv.²⁷ Förutom tillväxtnivån i de två skogsskötselssystemen ingick i analysen markkol, effekten av att lagra kol i produkter och av att ersätta kolintensiva produkter med träprodukter (substitution). Med gjorda antaganden tyder modelleringen på att det inte är skogsskötselssystemet i sig som har betydelse för vilken klimatnytta som kan erhållas, utan det är tillväxten och skogsråvarans potential att användas för substitution som avgör klimatnyttan. Det betyder att om samma tillväxt uppnås i de två skogsskötselssystemen och skogsråvaran används på samma sätt så blir klimatnyttan densamma.

I en annan analys där klimatnyttan jämfördes mellan skogsskötselssystemen togs hänsyn till tillväxt, alla koldioxidutsläpp för skötsel, avverkningar, transport av virke, med mera, och hur skogsråvaran slutligen används.²⁸ Analysen visar på att trakthyggesbruket har cirka 50 % större långsiktig klimatnytta än blädning uttryckt som summan av kolförrådets förändring och substitutionseffekten. I den jämförelsen antogs att den blädade skogen nådde 80 % av tillväxten jämfört med tillväxten i den trakthyggesbrukade skogen, i linje med de bedömningar som finns idag.²⁹ Dessutom togs GROT ut vid skörd i trakthyggesbruket men inte i blädningsbruket.

Även om empiriska data från försök pekar mot att blädningsbruk sannolikt inte ger samma positiva climateffekt som trakthyggesbruk i de svenska skogarna så kan det finnas andra skäl att bedriva blädningsbruk som måste vägas in vid beslut om lämpligt skötselssystem på en plats.

²⁵ Drössler, L., Nilsson, U. & Lundqvist, L. 2014. Simulated transformation of even-aged Norway spruce stands to multi-layered forests: an experiment to explore the potential of tree size differentiation. *Forestry* 87: 239–248.

²⁶ Rosvall, O. 2016. Betydelsen av förädlade träd i skogsbruket. I: Skogsträdsförädling. Skogsskötselserien, kapitel 19, s. 6–31. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

²⁷ 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: 203–213.

²⁸ Lundmark, T. 2017. Hyggesfritt skogsbruk och klimatet. I: Hyggesfritt skogsbruk. Erfarenheter från Sverige och Finland. Future Forests. Rapportserie 2017:1. SLU, Umeå. s. 71–74.

²⁹ Lundqvist, L. 2017. Tamm Review: Selection System Reduces Long-term Volume Growth In Fennoscandic Uneven-aged Norway Spruce Forests. *Forest Ecology and Management* 39: 362–375.

Hur kan skogens klimatnytta öka?

Ett nytt och viktigt mål med skogen är att använda den så den bidrar till att bromsa klimatförändringen. Därför diskuteras allt mer hur skogen bäst gör klimatnytta och hur klimatnyttan kan öka. Är det genom att med substitution minska användningen av fossila material och/eller att öka upplagringen av kol, eller kanske både och?

All skog som finns, både brukad och obrukad, har gjort klimatnytta genom att ta upp koldioxid från atmosfären och lagra den som kolföreningar i träd, markvegetation och mark. Skog gör också klimatnytta när träd skördas och används istället för till exempel betong i hus eller istället för kol och olja för energiändamål. Det finns olika resultat, som till stor del beror på olika systemavgränsningar och antaganden vilket leder till olika slutsatser ifall det är bättre att sköta och avverka skog eller att bevara den obrukad för att motverka klimatförändringen.^{30,31}

Som beskrivs tidigare i kapitlet består skogens klimatnytta av summan av tre effekter, upptag av koldioxid och lagring av kol i skog och skogsmark, lagring i skogsprodukter, plus att skogsråvara ersätter produkter som annars skulle genererat utsläpp av koldioxid som inte funnits i det biogena kretsloppet ovan jord på miljontals år.

Det är denna tredelade totala klimatnytta som måste *öka* jämfört med dagens förhållanden om skogen ska bidra ytterligare till att lösa klimatfrågan.

Substitution – hur vi använder skogsråvaran

När skogsråvara ersätter fossil energi eller material som kräver fossil energi för sin framställning eller avger koldioxid vid sin framställning undviks att ”ny” koldioxid baserad på kol som lagrats under miljontals år och som kan lagras många miljoner år till tillförs atmosfären. Den koldioxid som släpps ut när man använder skogsbaserade produkter har tidigare tagits upp från atmosfären via trädens fotosyntes och släpps nu tillbaka eller lagras i mer eller mindre långlivade produkter. Allt inom ramen för det i sammanhanget relativt snabba biogena kretsloppet.

Att substituera med skogsprodukter innebär något förenklat att man återanvänder kol som redan finns i biosfären, det vill säga kol som redan cirkulerar i något av jordens ekosystem istället för att använda fossilt kol som lagrats i miljontals år.

När man räknar på hela skogssektorns kolbalans, allt från bestånds-anläggning, skogens skötsel, avverkning, transporter och industriproduktion, framgår att nettoutsläppen av koldioxid blir mycket lägre än vad utsläppen skulle ha varit om vi inte haft aktivt skogsbruk utan istället tillgodosett samhällets konsumtionsbehov på annat sätt (mer fossil energiråvara, mer stål, mer betong, och så vidare). För varje kubikmeter virke som skördas i Sverige blir utsläppen av koldioxid till atmosfären cirka

³⁰ Madsen, K. & Bentsen, N.S. 2017. Carbon debt and payback time – Lost in the forest? *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 73: 1211–1217.

³¹ Agostini, A., Giuntoli, J., Marelli, L. & Amaducci, S. 2019 Flaws in the interpretation phase of bioenergy LCA fuel the debate and mislead policymakers. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. DOI: 10.1007/s11367-019-01654-2.

500–750 kg lägre än vad utsläppen annars skulle ha varit.³² Detta är genomsnittssiffror som bygger på hur svensk skogsråvara använts under början av 2000-talet.

Finska studier med en liknande skogssektor som den svenska pekar på att substitutionseffekten varierar mellan 500–830 kg i undvikna koldioxidutsläpp för varje kubikmeter rundvirke som skördas.³³ Liknande resultat har presenterats från österrikiska studier av skogens roll i klimatarbetet.³⁴

Det finns idag ingen fullständig översikt av vad substitutionseffekten av att använda skogsråvara uppgår till. Det beror på att skogsindustrin ständigt utvecklas och energieffektiviseras samtidigt som nya produkter tillverkas och når marknaden. Substitutionseffekten förändras därför över tid beroende på förändrad användning av skogsråvaran och alternativa materials klimatanpassning.³⁵

Om skogens tillväxt ökar kan uttaget av skogsråvara öka utan att kolförrådet minskar. Ökad tillväxt innebär därför möjlighet till ökad klimatnytta genom substitution.

Nya kubikmetrar skogsråvara som används till att substituera mer stål och betong i byggnader eller som ytterligare substituerar fossila bränslen, liksom ytterligare energieffektivisering i skogsbruk och skogsindustri kan tillsammans ge betydligt större substitutionseffekt än idag och bidra till att utsläppen av ny koldioxid minskar ytterligare jämfört med idag.³⁶

Lagerförändring – var kolet samlas

Eftersom skogens nettotillväxt avgör hur stor klimatnyttan kan bli på lång sikt ökar nyttan ju mer skogen växer. Den ökade tillväxten ger ökad volym trädbiomassa som kan användas för substitution enligt ovan. Men den kan också användas genom att lagra kol i stående skog eller i produkter, hellre långlivade produkter än kortlivade som papper och biobränslen (figur SK6).

I Sverige har inriktningen varit att kombinera substitution med att lagra i stående skog (landets virkesförråd har ökat under lång tid) och i produkter (ökad användning av trä i till exempel byggande).

³² Lundmark, T., Bergh, J., Hofer, P., Lundström, A., Nordin, A., Poudel, B.C., Sathre, R., Taverna, R. & Werner, F. 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation. *Forests* 5: 557–578.

³³ Hurmekoski, E., Myllyviita, T., Seppälä, J., Heinonen, E., Kilpeläinen, A., Pukkala, T., Mattila, T., Hetemäki, L., Asikainen, A. & Peltola, H. 2020. Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12981>.

³⁴ Braun, M., Fritz, D., Weiss, P., Braschel, N., Büchsenmeister, R., Freudenschuß, A., Thomas Gschwantner, T., Jandl, R., Ledermann, T., Neumann, M., Pölz, W., Schadauer, K., Schmid, C., Schwarzbauer, P. & Stern, T. 2016. A holistic assessment of greenhouse gas dynamics from forests to the effects of wood products use in Austria. *Carbon Management* 7(5–6): 271–283.

³⁵ Leskinen, P., Cardellini, G., González-García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., Smyth, C., Stern, T. & Verkerk, P.J. 2018. Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *From Science to Policy* 7. European Forest Institute.

³⁶ Sathre, R. & O'Connor, J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy* 13(2): 104–114.



Figur SK6 Ökad skogstillväxt kan användas för att öka kollagret i skogen (i träd och annan vegetation samt i skogsmarken) och/eller för att öka avverkningen med efterföljande kolinlagring i produkter och/eller för ökad substitution (ersättning) av fossilintensiva produkter, fossila bränslen och betong.

Olika systemperspektiv kan leda till olika slutsatser

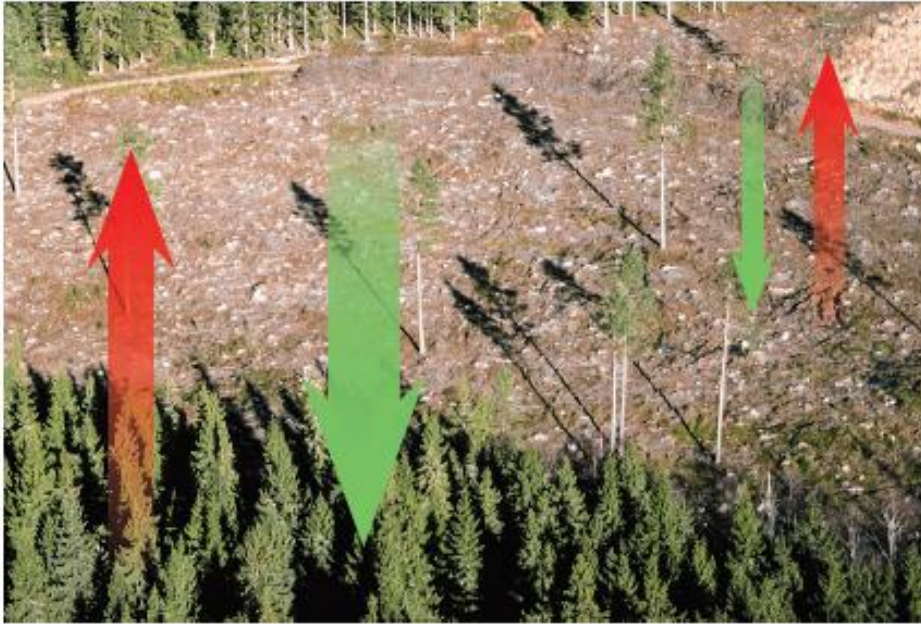
En viktig orsak till att det går att komma till olika slutsatser om hur skogen bäst gör klimatnytta är att man tillämpar olika systemperspektiv i tid och rum. Slutsatser om skogens klimatnytta kan bli helt olika om man betraktar ett enskilt skogsbestånd eller ett helt skogslandskap, eller om man har ett kort tidsperspektiv (1–10 år) eller ett långt (några decennier till en skoglig omloppstid).

Olika systemperspektiv kan illustreras med några exempel värda att reflektera över:

Enskilt skogsbestånd. Väljer man att betrakta ett enskilt skogsbestånd som sitt system innebär en förnyngningsavverkning att kollagret i beståndet minskar drastiskt. En stor del av de produkter som görs av den skördade skogen har kort livslängd (till exempel papper och biobränsle) vilket gör att koldioxid snabbt tillförs atmosfären.³⁷

Med det enskilda beståndet som system och om man börjar analysen vid själva avverkningen kan det ses som att en ”kolskuld” uppstår som vanligtvis är större än den substitutionseffekt och det kollager som skogsprodukter ger upphov till. Först när ny skog vuxit upp och ”återställt” kolskulden uppstår en egentlig klimatnytta (figur SK7).

³⁷ WWF och Naturskyddsföreningen. 2011. Hugga eller skydda? Boreala skogar i klimatperspektiv. Tillgänglig på:
https://www.naturskyddsforeningen.se/sites/default/files/dokument-media/rapporter/Rapport_Hugga_eller_skydda.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)



Figur SK7 Skogsbestånd som gränsar till varandra kan ha helt olika kolbalans. Ett bestånd som föryngringsavverkats och blivit hygge har förlorat ett stort kollager i form av trädbiomassa. Dessutom avger det koldioxid genom att delar av markens organiska material och hyggesavfall bryts ner, samtidigt som mycket lite koldioxid tas upp genom fotosyntes hos kvarvarande vegetation. Skog som uppnått gallringsålder har genom trädens tillväxt byggt upp ett kollager och tar dessutom upp betydligt mer koldioxid än vad den avger genom respiration. (Se även figur SK3.) Pilarna visar upptag av koldioxid genom fotosyntes (grön) respektive avgång av koldioxid genom respiration och nedbrytning (röd). Foto Michael Ekstrand.

Stor fastighet, landskap. Om man istället väljer att betrakta skogen som ett odlingsystem över en areal motsvarande en stor fastighet eller ett skogslandskap med skogsbestånd av olika ålder, blir slutsatsen en annan. Skog växer hela tiden på hela arealen och det går att vid lämpliga tidpunkter skörda tillväxten genom gallring eller föryngringsavverkning i bestånd på fastigheten eller i landskapet. Med skog i alla åldrar går det dessutom att åstadkomma en ganska jämn skörd över tid.

Med detta systemperspektiv kompenseras förlusten vid skörd i ett enskilt bestånd av tillväxten i samtliga bestånd (figur SK8). Det uppstår därför ingen kolskuld så länge avverkningsnivån på fastigheten eller i skogslandskapet inte överstiger tillväxten. Klimatnyttan består i att kolförrådet i skogen inte får minska utan ska öka något över tid och att kolförråd byggs in i skogsprodukter samt att substitutionseffekter kan erhållas. En slutsats av detta är att ju mer det växer desto större blir klimatnyttan.^{38,39,40}

³⁸ Bergkvist, B. och Olsson, M. (redaktörer). 2008. Kolet, klimatet och skogen – så kan skogsbruket påverka. Information från LUSTRA.

³⁹ Eriksson, E. m.fl. 2007. Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 671–681.

⁴⁰ Nordin, A. m.fl. 2009. Effekter av ett intensivare skogsbruk på skogslandskapets mark, vatten och växthusgaser. Faktaunderlag 63 till MINT-utredningen. SLU.



Figur SK8 I ett skogslandskap eller på en stor skogsfastighet finns vanligtvis skogsbestånd av olika ålder. Så länge avverkningsnivån i skogslandskapet eller på fastigheten inte överstiger tillväxten, kompenseras minskningen av kolförrådet genom skörd i ett bestånd av tillväxten i samtliga bestånd. Även skogsbrand och skador av till exempel klövvilt och granbarkborre minskar skogslandskapets kolförråd och måste kompenseras av tillväxt om klimatnytta ska erhållas. Om kolförrådet i skogslandskapet eller på fastigheten ökar över tid erhålls klimatnytta, men klimatnytta erhålls också genom att kolförråd byggs in i skogsprodukter och genom substitutionseffekter. Pilarna visar upptag av koldioxid genom fotosyntes (grön) respektive avgång av koldioxid genom respiration och nedbrytning (röd). Foto Mostphotos.

Obrukad naturskog. Om systemet består av obrukad naturskog⁴¹ är kolförrådet relativt stabilt och någon betydande upplagring av kol sker inte över tid. Orsaken är att de levande trädens tillväxt i naturskog är ungefär lika stor som avgången, det vill säga att träd och annan vegetation dör och bryts ner (figur SK9).

Naturskogen har gjort klimatnytta genom att under lång tid bygga upp sitt kolförråd. Men eftersom tillväxt och nedbrytning i naturskog balanserar varandra svarar naturskogen inte för någon stor upplagring av kol och bidrar därför endast lite till dagens klimatarbete.

Naturskogen måste istället förvaltas som ett statiskt kolförråd som aldrig får minska om dess klimatnytta ska behållas. Över tid utsätts naturskog emellertid för olika naturliga störningar. Under en begränsad period efter en omfattande störning då naturskogen avgett stora mängder koldioxid kan naturskog därför nettoinlagra kol.⁴² Det är ett viktigt skäl till att naturskogens koldynamik måste ses över längre tidsperioder och inte bara över enstaka år.

⁴¹ Med naturskog avses här skog som varit opåverkad av mänsklig aktivitet så länge att den återfått egenskaper som skog har som aldrig utsatts för skogsbruk annat än avverkning av enstaka träd.

⁴² Derderian, D.P., Dang, H., Aplet, G.H. & Binkley, D. 2016. Bark beetle effects on a seven-century chronosequence of Engelmann spruce and subalpine fir in Colorado, USA. *Forest Ecology and Management* 361: 154–162.

Avverkningar av naturskog innebär nettoutsläpp av koldioxid till atmosfären. Orsaken är att man tar av ett kollager som utan omfattande naturliga störningar kan anses vara stabilt. Den långa tid det tar tills ny skog vuxit upp betyder att avverkning av naturskog är negativt för klimatarbetet på kort sikt.

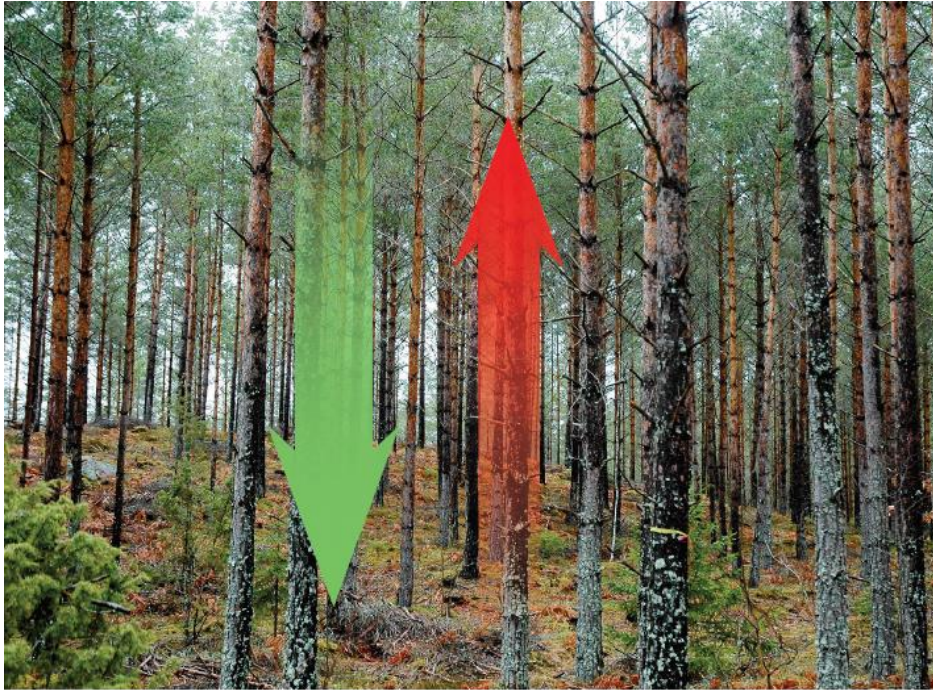


Figur SK9 Naturskog har gjort klimatnytta genom att bygga upp sitt kolförråd. Eftersom tillväxt och nedbrytning balanserar varandra i naturskog svarar naturskogen dock inte för någon stor upplagring av kol och bidrar därför endast lite till dagens klimatarbete. Upptaget av koldioxid (grön pil) är ungefär lika stort som den mängd koldioxid som avges (röd pil). Foto Bo Persson.

Brukad skog som en skogsägare undantar från skogsbruk. Systemet kan också vara en skog som brukats aktivt under en tid men som en skogsägare väljer att undanta från skogsbruk (figur SK10). Tack vare den tidigare skogsskötseln kommer skogen under lång tid att kunna ha en fortsatt hög nettotillväxt. Om en skogsägare avstår från att avverka den årliga tillväxten i en skog som brukas för virkesproduktion ökar virkesförrådet och därmed kolförrådet så länge som tillväxten upprätthålls och naturliga avgångar kan hållas nere.

Varje år som kolförrådet i skogen ökar gör skogen klimatnytta genom att ta upp koldioxid från atmosfären. Det motverkar den ökning av koldioxid i atmosfären som är följden av att använda fossila bränslen. Det kan beskrivas som att man byter ett fossilt kollager nere i jordskorpan, mot ett kollager i skog.

Att välja en strategi som bygger på att lagra kol i den brukade skogen kan alltså uppfattas vara effektivt i ett kort till medellångt tidsperspektiv (10–30 år). Men för att klimatnyttan ska bestå måste skogsråvaran låsas in i ett statistiskt kolförråd för all framtid, på samma sätt som för naturskogen.



Figur SK10 Om brukad skog, här gallrad en gång, undantas från skogsbruk skulle den tack vare tidigare skötsel ha fortsatt hög nettotillväxt och på det sättet ta upp mycket koldioxid under lång tid. Upptaget av koldioxid (grön pil) är större än den mängd koldioxid som avges (röd pil). Foto Anna Petersson.

Det finns ytterligare aspekter att ta hänsyn till för den som väljer att lagra kol i sin skog istället för att leverera virke på virkesmarknaden. En positiv klimateffekt av att lagra i skogen uppstår endast om marknaden accepterar minskad konsumtion av skogsprodukter, till exempel virke till byggnader eller förpackningar av papp eller kartong. Om marknaden konsumerar på samma eller högre nivå måste virkesanskaffningen flytta till andra skogar, annars kommer mer fossila råvaror och betong att konsumeras. Oavsett vad som sker förloras klimatnyttan med den undantagna skogen.

Om tillväxten i skogen och den totala konsumtionen är konstant, kommer klimatnyttan av att öka kolkvadrat i skogen genom att avstå avverkningsutrymme att ske på bekostnad av att klimatnyttan genom substitution och lagring i skogsprodukter minskar och att fossilberoendet ökar.

En slutsats blir därför att en minskad konsumtion i första hand bör riktas mot den del av konsumtionen som utgörs av fossilbaserade produkter och betong. Då minskar både utsläppen av koldioxid och fossilberoendet.

På motsvarande sätt innebär ökad avverkning att virkesförrådet inte kan öka lika mycket som tidigare. Det gör att vinsten med ökad substitution och kolinlagring i produkter tillsammans med det minskade fossilberoendet, sker på bekostnad av skogens förmåga att genom koldioxidupptag buffra koldioxidutsläpp i andra samhällssektorer.

För att den brukade skogen på virkesproduktionsmarken ska öka sin klimatnytta måste således tillväxten öka. Då kan man välja mellan att lagra mer kol i levande skog men bibehålla avverkningsnivån, alternativt att bibehålla upplagringen av kol i skogen och öka avverkningen.

Kolbalansen i Sveriges skogar

Tillväxten i den svenska skogen har länge varit större än avverkningen. Under lång tid har därför skett ett nettoupptag av koldioxid och därmed en nettoinlagring av kol i träden. Kol har även lagrats in i mark. Inlagringstakten i mark är dock betydligt långsammare än i träd. Däremot är markens totala kolförråd stort.

Inlagring och förråd av kol i trädbiomassa

För att beräkna skogens inlagring av kol måste storleken på trädens bindning av koldioxid kunna uppskattas. En kalkyl visar att tillväxt av en skogskubikmeter binder cirka 1,375 ton koldioxid. Det gäller då trädens grenar, barr, löv, stubbar och rötter räknas med (se faktaruta).

Beräkning av mängden koldioxid som träd binder

För att beräkna hur mycket koldioxid träd binder måste man känna till (1) vedens täthet (densitet) och hur biomassan (torrvikten) fördelas mellan trädens olika delar, (2) andel kol av trädens torrvikt samt (3) atomvikter hos kol och syre och koldioxidens molekylvikt:⁴³

1. Skogskubikmeter (m^3_{sk}) är volymmåttet för stam inklusive topp och bark ovan ett tänkt stubbskär. I medeltal för svensk skog motsvarar en skogskubikmeter den totala trädbiomassan (stam med bark, grenar, barr, stubbe och rötter) 0,75 ton torrvikt.⁴⁴
2. Ungefär hälften av ett trädets torrvikt består av kol. Det ger en faktor 0,5 ton kol per ton torrvikt vid beräkningar. Andelen varierar mellan olika trädslag och mellan trädets olika delar. Barrträd innehåller ofta något mer kol (47–55 %) än lövträd (46–50 %), mest på grund av en genomsnittligt högre ligninhalt hos barrträden, cirka 30 %, jämfört med 20 % för lövträd.⁴⁵
3. För omräkning av mängden kol i ett träd till mängden bunden koldioxid utgår man från atomvikten för kol (12) och syre (16), samt från koldioxidens molekylvikt ($12+16+16 = 44$). Det ger en faktor $44/12 = 3,67$ ton koldioxid per ton kol.

En skogskubikmeter motsvarar därmed $0,75 \times 0,5 \times 44/12 = 1,375$ ton koldioxid, om även trädens grenar, barr, löv, stubbar och rötter medräknas.

⁴³ Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., Lundström, A. & Mäkipää, R. 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270: 78–84.

⁴⁴ Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., Lundström, A. & Mäkipää, R. 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270: 78–84.

⁴⁵ Lamlo, S.H. & Savidge, R.A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25: 381–388.

Beräkning av upptagen mängd koldioxid för att bilda 1 ton trädbiomassa

En koldioxidmolekyl utgörs till $12/44 = 27,3\%$ av kol. Ett ton torr trädbiomassa består av cirka 0,5 ton kol.

Vid bildandet av 1 ton torrt trä har $0,5/0,273 = 1,83$ ton koldioxid tagits upp av trädet.

Förändringen i mängden inlagrat kol i levande träd i den svenska skogen följer utvecklingen för avverkning och tillväxt. Under perioden 1990–2018 ökade avverkningen, men genom att även tillväxten i skogen ökade ungefär lika mycket under samma period var skogens nettoupptag av koldioxid på ungefär samma nivå 2018 som 1990.

Med data från Riksskogstaxeringen kan beräknas att nettoökningen av trädbiomassa (det vill säga ökat virkesförråd) sedan 1990 motsvarar en inbindning av kol motsvarande i medeltal cirka 34 miljoner ton koldioxid per år (se faktaruta; även bilaga 3). Det kan jämföras med Sveriges bruttoutsläpp av växthusgaser på 2018 års nivå som var cirka 52 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år (se bilaga 3).

Beräkning av årligt upptag av koldioxid och inbindning av kol i levande trädbiomassa i svensk skog

Enligt Riksskogstaxeringen ökade landets virkesförråd på produktiv skogsmark under perioden 1990–2018 med i medeltal $118-93 = 25$ miljoner skogskubiketrar (m^3sk) per år (exklusive formellt avsatta områden per 2018).

1 m^3sk motsvarar 0,75 ton torrsvikt totalt, varav 50 % är kol (se föregående faktaruta). Varje ton inbundet kol motsvarar $44/12 = 3,67$ ton koldioxid.

Mängden inbunden koldioxid i den årliga nettoökningen av trädbiomassa blir då i medeltal för perioden 1990–2018: $25 \text{ miljoner} \times 0,75 \times 0,5 \times 3,67 = 34$ miljoner ton koldioxid.

Fördelat på 22,7 miljoner hektar produktiv skogsmark (exklusive formellt avsatta områden per 2018) blir den genomsnittliga inlagringen i trädbiomassa 1,5 ton koldioxid per hektar och år, motsvarande $12/44 \times 1,5 = 0,4$ ton kol per hektar och år.

Kalkyl för skogsägaren: För varje ökat antal skogskubiketrar på skogsinnehavet har ungefär $0,75 \times 0,5 \times 44/12 = 1,375$ ton koldioxid bundits i trädbiomassa. Det betyder att på en fastighet där den årliga tillväxten är 200 m^3sk binds 275 ton koldioxid varje år i trädbiomassa. Det kan jämföras med det konsumtionsbaserade utsläppet per person i Sverige som för år 2017 beräknades till cirka 9 ton.⁴⁶

⁴⁶ Naturvårdsverket. 2020. Konsumtionsbaserade växthusgasutsläpp per person och år. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-per-person/>. (Hämtad 2020-09-23.)

Det genomsnittliga virkesförrådet på svensk produktiv skogsmark är 140 m³sk per hektar.⁴⁷ Det motsvarar ett inlagrat förråd av kol i trädbiomassa på drygt 50 ton per hektar (se faktaruta).

Beräkning av förrådet av levande trädbiomassa per ha i svensk skog

Det genomsnittliga virkesförrådet på svensk produktiv skogsmark är 140 m³sk per hektar. En skogskubikmeter (m³sk) motsvarar 0,75 ton torr-vikt totalt, varav 50 % är kol (se föregående faktaruta). Det innebär att den genomsnittliga mängden kol per hektar i levande trädbiomassa i svensk produktiv skogsmark är:

$140 \times 0,75 \times 0,50 =$ cirka 52, det vill säga omkring 50 ton kol per hektar.

Inlagring och förråd av markkol i skogsmark

Sveriges skogar innehåller stora förråd av kol varav huvuddelen finns i marken. Orsaken till att det finns så mycket kol i marken är kallt klimat och sura jordar som medför en långsam nedbrytning. Kollagret i marken är något högre i granbestånd än i tallbestånd.⁴⁸ Det genomsnittliga förrådet av kol i svensk skogsmark är cirka 75 ton per hektar (se faktaruta och figur SK11).

Inlagring av markkol i svensk skogsmark

Det genomsnittliga förrådet av markkol i svensk skogsmark är cirka 75 ton per hektar, enligt Markinventeringen.⁴⁹ Det har byggts upp sedan inlandsisen började smälta, det vill säga under en period på cirka 11 000 år.

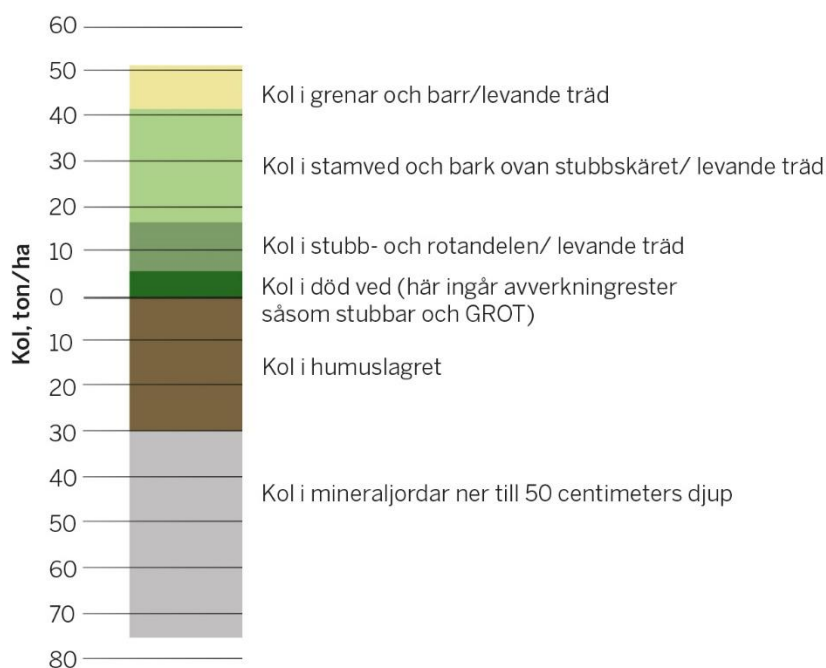
Inlagringstakten på svensk skogsmark har alltså grovt räknat och i medeltal varit omkring 75 ton per hektar / 11 000 år = 7 kg kol per hektar och år. Trots att förloppet inte är linjärt och har stora variationer används siffran ibland för att beskriva förrådsutvecklingen för kol i svensk skogsmark.

I själva verket har inlagringstakten ökat över tid sedan den senaste istiden och har sannolikt fått ytterligare en skjuts under det senaste seklet som ett resultat av skogsskötselåtgärder som lett till ökad skogstillväxt och därmed ökad förnaperproduktion samt genom ökad brandbekämpning. Markinventeringen visar att den årliga inlagringen av kol på fastmarker (mineraljordar) i medeltal är cirka 150 kg per hektar medan skogliga torvmarker på grund av dikning förlorar markkol. För all skogsmark i landet kan medeltalet för den årliga inlagringstakten därför skattas till ungefär 100 kg kol per hektar.

⁴⁷ Skogsdata 2020. SLU, inst. för skoglig resurshushållning. Tillgänglig på: https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/rt/dokument/skogsdata/skogsdata_2020_webb.pdf.

⁴⁸ Stendahl, J., Johansson, M.-B., Eriksson, E., Nilsson, Å. & Langvall, O. 2010. Soil organic carbon in Swedish spruce and pine forests – differences in stock levels and regional patterns. *Silva Fennica* 44(1): 5–21.

⁴⁹ Stendahl, J. 2017. Tema: Skogsmarkens kolförråd. I: Skogsdata 2017. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från Riksskogstaxeringen. s. 14–23. SLU, inst. för skogshushållning. Umeå.



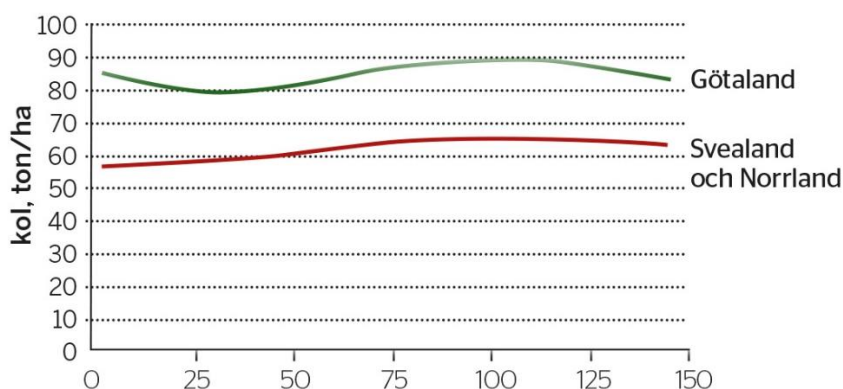
Figur SK11 Medelkolförrådet per hektar i olika delar av biomassan och i skogsmarken ner till 50 cm mineraljordsdjup. Siffrorna visar kolförrådet för produktiv skogsmark exklusive torvjordar, nationalparker, naturreservat och naturvårdsområden skyddade från skogsbruk. Källa: Markinventeringen, 2003–2012.⁵⁰

Då ett skogsbestånd förnygringsavverkats påverkas kollagret i marken. Inledningsvis kan mängden markkol öka som en följd av att stubbar och rotsystem och andra avverkningsrester lämnas efter avverkningen. Under en period därefter kan markens förråd av kol sjunka något, åtminstone på bördiga marker.⁵¹

Orsaken till den tillfälliga sänkningen av kolförrådet kan främst vara plant- och ungskogsfasens låga förnafall, jämfört med förhållandena i en sluten skog (figur SK12). Uttag av GROT efter förnygringsavverkning, en åtgärd som har sin tyngdpunkt i södra delen av landet, kan vara en bidragande orsak. Ungefär då beståndet når tidpunkten för första gallring (20–30 år) har markkolelet åter nått den nivå det hade före avverkning.

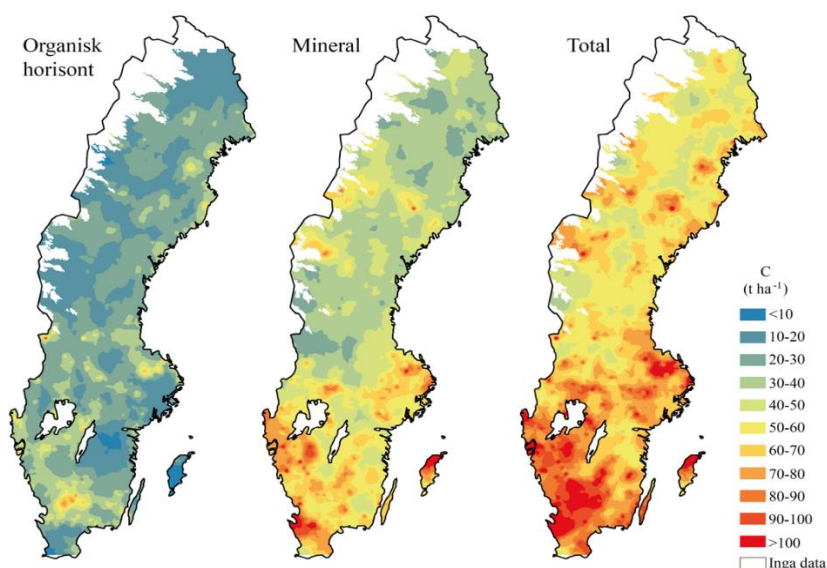
⁵⁰ Stendahl, J. 2017. Tema: Skogsmarkens kolförråd. I: Skogsdata 2017. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från Riksskogstaxeringen. s. 14–23. SLU, inst. för skogshushållning. Umeå.

⁵¹ Stendahl, J., Repo, A., Hammar, T. & Liski, J. 2017. Climate impact assessments of forest bioenergy affected by decomposition modelling – comparison of the Q and Yasso models. IEA Bioenergy: Task 43: EXCO2017-03.



Figur SK12 Markkolets variation över beståndsålder (relativ ålder där 100 motsvarar lägsta tillåtna ålder för förnyngningsavverkning), medeltal för ton kol per hektar. Produktiv skogsmark exklusive torvjordar, nationalparker, naturreservat och naturvårdsområden skyddade från skogsbruk. Källa: Markinventeringen, 2003–2012.⁵²

Markinventeringen visar också att det över landet finns en kraftig gradient i kolförrådet mellan norra Sverige (cirka 40 ton/ha) och sydvästra Sverige (mer än 100 ton/ha) (figur SK13). Anledningen till gradienten är sannolikt en högre skoglig tillväxt i söder som under lång tid gett upphov till ett större förnafall och en större mängd rötter. En annan möjlig förklaring kan vara effekten av ett större kvävednedfall i söder som bidragit till ytterligare ökad tillväxt och som har en hämmande verkan på nedbrytare⁵³.



Figur SK13 Kartor över kolförråd i organisk horisont, mineraljord och totalt. Produktiv skogsmark exklusive torvjordar, nationalparker, naturreservat och naturvårdsområden skyddade från skogsbruk. Källa: Markinventeringen 2003–2012.⁵⁴

⁵² Stendahl, J. 2017. Tema: Skogsmarkens kolförråd. I: Skogsdata 2017. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från Riksskogstaxeringen. s. 14–23. SLU, inst. för skogshushållning.

⁵³ Högberg, P. 2007. Environmental science: nitrogen impacts on forest carbon. Nature 447(7146): 781–782.

⁵⁴ Stendahl, J. 2017. Tema: Skogsmarkens kolförråd. I: Skogsdata 2017. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från Riksskogstaxeringen. s. 14–23. SLU, inst. för skogshushållning. Umeå.

Kol bundet i torvmark

Torvmark bildas där organiskt material ansamlats genom att grundvattnet är högt och det därför uppstår syrebrist och mycket långsam nedbrytning av det organiska materialet. Syrebristen gör också att växtrötter fungerar dåligt och att trädens tillväxt därför ofta är långsam.

Opåverkade torvmarker tar upp koldioxid från atmosfären som lagras in i torven. Samtidigt avges växthusgasen metan till atmosfären. Myrarna på norra halvklotet har sedan senaste istiden lett till en avkylning av atmosfären, det vill säga på längre tidshorisont är det inlagringen av kol som helt dominerar över metanavgivningen.

Torv är den humusform som har högst kolinnehåll. Data från Markinventeringen 1993–2002 visade ett medianvärde på 46 % för torv provtagen på beskogad torvmark,⁵⁵ vilket tyder på en viss mineraljordsinblandning då ren torv har ett kolinnehåll kring 50–55 %. Den långa tid det tagit att bygga upp torvmarkernas kollager och det faktum att de är relativt stabila och säkra förråd gör att det i klimatsammanhang är olämpligt med åtgärder som ökar nedbrytningen av dem.

Data från Riksskogstaxeringen visar att det finns cirka 10 miljoner hektar torvtäckta marker i Sverige, varav 4 miljoner hektar våt fastmark (torvtäcket grundare än 30 cm) och 6 miljoner hektar torvmark (torvtäcket minst 30 cm mäktigt). Arealen torvmark som är produktiv skogsmark är cirka 1,7 miljoner hektar, varav cirka 0,75 miljoner hektar är dikad och beskogad genom plantering eller naturlig igenväxning.⁵⁶

I skogsbrukssammanhang har dikning av torvmark gjorts antingen för att möjliggöra skogstillväxt på torvmarken eller förbättra skogstillväxten på närliggande blöt fastmark. En positiv effekt av dikningen är ökad träd-tillväxt och därmed upptag av koldioxid. Många dikningsprojekt har dock lett till mycket blygsam träd-tillväxt på grund av för lite näring i den dikade torvjorden.

Men dikning och beskogning innebär också att grundvattenytan sänks vilket ökar nedbrytning av den upplagrade torven. Beskogade torvtäckta marker kännetecknas därför ofta av krympande torvtäcken och högre koldioxidavgång än obeskogade och odikade torvmarker.⁵⁷ Samtidigt har dikning av torvmark generellt resulterat i en kraftigt minskad metanavgivning, vilket är positivt ur växthusgassynpunkt.

Den totala kolbalansen för en dikad beskogad torvmark bestäms av nettot av den ökade avgivningen från nedbrytning av torven, hur mycket skogen och övrig vegetation tar upp samt minskningen i metanavgivning och eventuell ökad avgivning av lustgas (N₂O) som är en mycket kraftfull växthusgas. Avgivning av lustgas från dikad torvmark sker i stort sett enbart på näringsrika torvmarker (torvens kolkvävekvot ≤ 20), medan problemet inte

⁵⁵ Nilsson, T., Stendahl, J. & Löfgren, O. 2015. Markförhållanden i svensk skogsmark – data från Markinventeringen 1993–2002. SLU, inst. för mark och miljö. Rapport 19.

⁵⁶ Hånell, B. 2009. Möjligheterna till höjning av skogsproduktionen i Sverige genom dikesrensning, dikning och gödsling av torvmarker. Faktaunderlag till MINT-utredningen, bilaga 4. SLU.

⁵⁷ Berggren Kleja, D., Svensson, M., Hooshang, M., Jansson, P.-E., Langvall, O., Bergkvist, B., Johansson, M.-B., Weslien, P., Truusb, L., Lindroth, A. & Ågren, G. 2008. Pools and fluxes of carbon in three Norway spruce ecosystems along a climatic gradient in Sweden. *Biogeochemistry* 89: 7–25.

är relevant för de näringsfattiga torvmarker.^{58,59} Data från Markinventeringen, SLU, visar att cirka 30 % av den dikade beskogade torvmarksarealen (enligt Markinventeringens definition på torvmark, det vill säga torvtäckets mäktighet ≤ 40 c m, till skillnad mot Riksskogstaxeringens definition där den är satt till ≤ 30 c m) har en kolkvävekvt ≤ 20 .⁶⁰

På dikade torvmarker kan växthusgasbalansen alltså vara negativ om upptaget av koldioxid hos träd och annan vegetation är mindre än den totala avgången av växthusgaser, uttryckt som koldioxidekvivalenter (CO₂e). Forskning från Finland, där det finns omfattande arealer dikad och beskogad torvmark, visar snarare på det motsatta och att dessa idag på grund av träd tillväxten i huvudsak nettoinlagrar koldioxid.^{61,62} Att träd tillväxten idag kompenserar för växthusgasavgången från torvmarken innebär emellertid inte att växthusgasbalansen har varit lika gynnsam över hela diknings-/beskogningsprojektets livslängd.

Insikten om att dikade torvmarker kan vara en nettokälla för växthusgaser till atmosfären har resulterat i tankar på att vidta åtgärder för att minska dessa växthusgasutsläpp.⁶³ Återvätning av dikad skogsmark har föreslagits som en möjlig sådan åtgärd.

Utsläppen av växthusgaser från dikad skogsmark i Sverige har skattats till cirka 6,2 miljoner ton CO₂e per år för år 2018 enligt de officiellt rapporterade markemissionerna inom ramen för LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry).⁶⁴ I medeltal motsvarar detta 6,6 ton CO₂e per hektar och år för den areal som ligger bakom den rapporteringen (baserad på Markinventeringen, SLU). Detta kan jämföras med skogstillväxten på dikad produktiv skogsmark, enligt Riksskogstaxeringen, SLU, vilken motsvarar ett upptag på 7 ton CO₂e per hektar och år i växande skog. Till detta kommer ett visst upptag i markvegetationen.

Givet osäkerheten i skattningarna – inte minst bristen på data där även metan och lustgas har mätts tillsammans med koldioxidflödet – så indikerar detta att dikade beskogade torvmarker även i Sverige kan utgöra en netto-sänka för växthusgaser. Då många dikade och beskogade torvmarker idag, på grund av träd tillväxt, sannolikt utgör en sänka för växthusgaser finns det skäl att vara noggrann vid urvalet av lämpliga marker och lämplig tidpunkt för återvätning. Inte minst då en höjning av grundvattennivån riskerar att öka emissionen av metan.

⁵⁸ Klemedtsson, L., von Arnold, K., Weslien, P. & Gundersen, P. 2005. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. *Global Change Biology* 11(7): 1142–1147.

⁵⁹ Kasimir, Å., He, H., Coria, J. & Nordén, A. 2018. Land use of drained peatlands: Greenhouse gas fluxes, plant production, and economics. *Global Change Biology* 24: 3302–3316.

⁶⁰ Ernfors, M., von Arnold, K., Stendahl, J., Olsson, M. & Klemedtsson, L. 2007. Nitrous oxide emissions from drained organic forest soils – an up-scaling based on C:N ratios. *Biogeochemistry* 84(2): 219–231.

⁶¹ Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Gudmundsson, J., Oskarsson, H., Huttunen, J.T. & Martikainen, P.J. 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. *Biogeosciences* 7(9): 2711–2738.

⁶² Ojanen, P., Minkinen, K. & Penttilä, T. 2013 The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208.

⁶³ Vägen till en klimatpositiv framtid. 2020. Betänkande av Klimatpolitiska vägvalsutredningen. SOU 2020:4. Statens offentliga utredningar. Stockholm.

⁶⁴ United Nations. Climate Change. 2020. Sweden. 2020. National Inventory Report Sweden 2020. 2020. Swedish Environmental Protection Agency. <https://unfccc.int/documents/224123> (Hämtad 2020-09-23.)

Skogsbrukets och skogsindustrins koldioxidbalans

Skogsbruksåtgärder och virkestransporter i det svenska skogsbruket står för 2 % av de samlade svenska utsläppen av koldioxid, uttryckt som koldioxidekvivalenter. Det motsvarar en femtiondel av vad den växande skogen tar upp. Skogsindustrin är stor förbrukare av el men producerar själv ungefär 40 % av den. Av det biobränsle som används i landet kommer den största delen från skogen.

Det svenska skogsbrukets utsläpp av koldioxid kommer främst från förbrukning av drivmedel som uppstår vid drivning (avverkning och terrängtransport) och vidaretransport med virkesbil från virkesavlägg vid väg till industri eller annan virkesförbrukare. I nyligen utförda beräkningar uppskattades att skogsbrukets totala koldioxidutsläpp genom förbränning av diesel och bensin var knappt 1 miljon ton per år.⁶⁵ Det motsvarar ungefär 15 kg koldioxid per skogskubikmeter vilket i sin tur är 2 % av de cirka 750 kg koldioxid som stamved plus bark lagrat in under träd tillväxten.

Utsläppet för skogsvård stod för 6 %, drivning för 40 % och vidaretransport för drygt 53 %. Vid drivning fördelar sig utsläppen av koldioxid ungefär lika mellan avverkning och terrängtransport, operationer som till allra största delen utförs med skördare respektive skotare. I utsläppen för vidaretransporten står väghållning av skogsbilvägar för drygt 10 %.

Skogsindustrin förbrukar i medeltal 21 TWh el per år, drygt 15 % av landets totala elanvändning. Av den el företagen behöver producerar man själv 40 % i form av mottryckskraft, vattenkraft och vindkraft.⁶⁶ Den största delen används i skogsindustrins egna tillverkningsprocesser, men el levereras också till hushåll och det övriga samhället. Bränslestatistik från Statistiska centralbyrån visar att användningen av fossila bränslen i svensk massa-, pappers- och pappindustri släpper ut 0,4 miljoner ton koldioxid per år.⁶⁷

I dagens skogsindustri är de fossila utsläppen av koldioxid från industriprocessernas insatsvaror av samma storleksordning som de samlade utsläppen från skogsnäringens transporter. Industriprocesserna använder i huvudsak bioenergi och är i det närmaste fossilfria.⁶⁸

Tillverkning av pappersmassa genererar utsläpp av koldioxid. Samtidigt producerar massa- och pappersindustrin förpackningar, textilier, kemikalier och drivmedel som har en positiv klimatpåverkan ifall de kan användas för att ersätta material som tillverkas av icke förnybara råvaror eller har en stor negativ klimatpåverkan.

⁶⁵ Björheden, R. 2019. Det svenska skogsbrukets klimatpåverkan. Upptag och utsläpp av växthusgasen koldioxid. Skogforsk. 24 s. Tillgänglig på: <https://www.skogforsk.se/produkter-och-evenemang/trycksaker/2019/det-svenska-skogsbrukets-klimatpaverkan/>.

⁶⁶ Skogsindustrierna. 2020. El och energi. <https://www.skogsindustrierna.se/skogsindustrin/branschstatistik/el-och-energi/> (Hämtad 2020-09-03.)

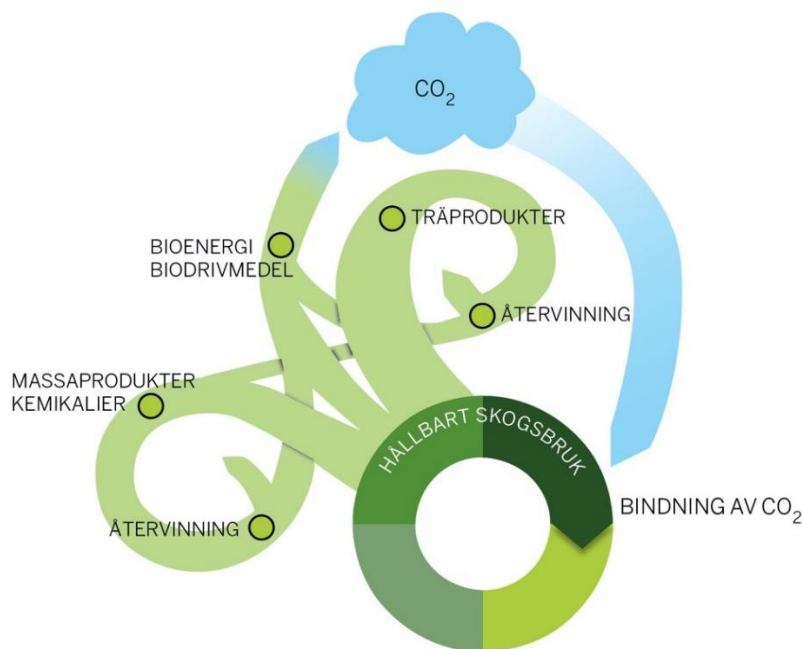
⁶⁷ Statistiska Centralbyrån. 2020. Kvartalsvis bränslestatistik, 4:e kvartalet 2018 samt året 2019. Statistiska meddelanden EN 31 SM 2001. Kalkyl: Förbränning av 1 ton eldningsolja genererar utsläpp på 3,15 ton koldioxid. Användningen 2019 (121 000 ton) genererar $3,15 \times 0,121$ miljoner ton koldioxid $\approx 0,4$ miljoner ton koldioxid.

⁶⁸ Holmgren, P., Gustafsson, E. & Örlander, G. 2019. Södras climateffekt. Södra, Växjö.

Materialåtervinningen av pappersprodukter är hög i Sverige. Cirka 95 % av de tidningar⁶⁹ och drygt 80 % av de förpackningar av papper, papp, kartong eller wellpapp⁷⁰ som konsumeras i Sverige används för tillverkning av nya pappersprodukter. Träprodukter återvinns främst som bioenergi men även som material. Träemballage såsom pallkragar och godspallar återanvänds inom logistik och transportområdet.

Skogsråvara används på många olika sätt. När den används för att producera pappersmassa, papper och andra skogsprodukter, produceras samtidigt bioenergi (figur SK14). Restprodukter från skogsindustrins vidareförädling, bland annat bark, sågspån och svartlut, används för att generera el, värme och för framställning av fasta bränslen och biodrivmedel.

Genom att skogsindustrins restprodukter integreras i det svenska energisystemet erhålls bioenergi från nära hälften av den trädvolym som tas emot av skogsindustrin. Denna bioenergi används för att täcka skogsindustrins interna energibehov för olika processer men också i samhället utanför skogsindustrin.



Figur SK14 Skogsråvara är grundmaterial i ett komplext system som levererar pappersmassa, papper, trä- och andra skogsprodukter samt bioenergi. Efter slutlig användning kan skogsprodukter användas för att producera energi. Den koldioxid som då avges kan åter tas upp av växande skog.

⁶⁹ Skogsindustrierna. 2020. Återvinning och cirkulär ekonomi.

<https://www.skogsindustrierna.se/om-skogsindustrin/branschstatistik/atervinning-cirkular-ekonomi/> (Hämtad 2020-09-23.)

⁷⁰ Statistiska Centralbyrån. 2020. Total tillförd och återvunnen mängd förpackningar uppdelat efter förpackningsslag. År 2012–2018.

https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0307/MI0307T1/ (Hämtad 2020-09-23.)

Skogsskötsel för ökad klimatnytta

Skogens tillväxt avgör hur stor klimatnyttan kan bli på lång sikt. Därför kommer alla skogsskötselåtgärder som ger ökad tillväxt och minskade avgångar genom skador att resultera i större möjligheter att ytterligare bidra positivt till klimatarbetet.

Genom forskning och praktisk erfarenhet har kunskapen om skogsskötsel och skogstillväxt utvecklats under lång tid. Mycket finns samlat i Skogsskötselserien, där detta kapitel är ett av drygt tjugo.⁷¹ Det finns ett särskilt kapitel som behandlar tillväxthöjande åtgärder.⁷²

Det är viktigt att notera att olika skogsskötselåtgärder har olika egenskaper avseende hur snabbt en positiv tillväxteffekt uppkommer och hur stora arealer som påverkas av åtgärden. Den åtgärd som ger snabbast effekt (inom 10 år) är kvävegödsling. Å andra sidan utförs den på relativt liten areal jämfört med den årligen föryngringsavverkade och återbeskogade arealen.⁷³ Föryngringsåtgärder med genetiskt förädlade plantor berör omkring tre fjärdedelar föryngringsarealen och får på det viset stor tillväxteffekt. Men till skillnad från gödsling kommer effekten med en fördröjning på flera decennier.

Inom trakthyggesbruket är det avgörande för ett bestånds framtida tillväxt hur beståndsanläggning, röjning och gallring utförs. Tillväxten på nationell nivå påverkas däremot inte bara av hur åtgärder utförs utan också av hur stor areal som berörs. Om till exempel all ny skog anläggs enligt bästa metod och vid plantering och sådd med lämpligt trädslag och bästa skogsodlingsmaterial finns möjlighet till hög framtida tillväxt och kolinbindning. Det är därefter viktigt att hålla nere skogsskadorna som sänker tillväxten så långt möjligt.

Andra åtgärder som skogsgödsling och användning av främmande trädslag kan ge betydande tillväxtökning på enskilda fastigheter och för enskilda skogsägare men nationellt och globalt har de mindre betydelse än åtgärder som över tid berör all eller en stor andel av den brukade arealen.

I det följande beskrivs kortfattat betydelsen av beståndsanläggning och beståndsvård för skogstillväxt. Därefter beskrivs tillväxteffekter av två former av skogsgödsling, effekter av förlängd omloppstid, hyggesfria metoder, blandskog och av att använda lövträd och främmande trädslag.

Beståndsanläggning och beståndsvård

Vid beståndsanläggningen har plantering den största potentialen för hög tillväxt jämfört med metoderna sådd och naturlig föryngring (figur SK15). Hög tillväxtpotential vid skogsodling (plantering och sådd) erhålls om:

⁷¹ Skogsskötselserien finns på webbsajten www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

⁷² Ståhl, E. & Bergh, J. 2013. Produktionshöjande åtgärder. Skogsskötselserien, kapitel 16. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

⁷³ Under perioden 2013–2017 gödslades i medeltal cirka 25 000 hektar varje år, det vill säga ungefär en åttondel av den areal som årligen föryngringsavverkas och där ny skog anläggs. Källa: Skogsstyrelsens statistikdatabas.

- trädslag och markberedningsmetod väljs med hänsyn till ståndort (ståndortsanpassning),
- skogsodlingsmaterialet är förädlat med genetiska egenskaper anpassade efter odlingslokalen och med hänsyn till klimatförändringen,⁷⁴
- skogsodlingsmaterialet är vitalt och har lämpliga morfologiska egenskaper,
- plantor skyddas mot snytbagge och andra tidiga skadegörare där det behövs,
- planteringsarbetet utförs med omsorg.



Figur SK15 Vid plantering med hög tillväxt som mål är det viktigt att bästa skogsodlingsmaterial används och att de olika arbetsmomenten utförs på rätt sätt. Foto Anna Petersson.

Vid beståndsvården (i första hand röjning och gallring) är det viktigt för hög tillväxt att åtgärderna sätts in rätt i tid samt att rätt stamantal eller grundyta och lämpliga trädindivider lämnas efter åtgärd. För både tidpunkt, stamantal och grundyta ligger emellertid den optimala skötseln inom intervall där skillnaderna i tillväxt inte behöver bli så stora. Bestånd som hamnar utanför intervallen kan däremot förlora betydande tillväxt (figur SK16).

⁷⁴ Andersson Gull, B. & Berlin, M. 2016. Skogsträdsförädling för ett förändrat klimat. I: Skogsträdsförädling. Skogsskötselserien, kapitel 19, s. 80–87. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.



Figur SK16 Om ungskogsröjning inte utförs vid lämplig beståndshöjd (ofta 2–4 m) hämmas dimensionsutvecklingen vilket ger mindre värdefullt virke än om träden tillåts växa sig grova, självgallringen och skadefrekvensen ökar, samt sämre växande trädslag riskerar att utgöra en relativt stor andel av gagnvirkestäden i beståndet (här glasbjörk istället för tall och/eller gran). Foto Clas Fries.

Röjning och gallring reducerar temporärt bladmassan i ett bestånd och sänker därmed tillväxten under några år jämfört med om åtgärderna inte utförs. Under den perioden blir därmed kolinlagringen och klimatnyttan mindre än innan åtgärden. Att röjning och gallring trots det är viktiga skötselåtgärder i skogsbruket beror på att de ger grövre träd och därför mer värdefullt virke som är viktigt för skogsbrukets lönsamhet och för fortsatt investering i skogstillväxt.

Grovt virke går i huvudsak till sågverk och hamnar därför jämfört med klenare virke i större utsträckning i långlivade produkter vilket bidrar mer till klimatnyttan. Röjning och gallring ökar också skogens vitalitet vilket minskar risken för många typer av skador och upprätthåller på så sätt långsiktigt en nettotillväxt och kolinlagring.

Analysen visar att man kan öka skogens tillväxt med upp till 40 % om alla åtgärder i samband med beståndsanläggning och ungskogsskötsel görs på bästa sätt.⁷⁵

Förlängd omloppstid

Förutom skogsskötsel för ökad tillväxt kan förlängd omloppstid i trakthyggesbrukade skogar vara ett möjligt sätt att öka skogens klimatnytta.

En studie av omloppstidens betydelse för skogens medelkolförråd visar att det är möjligt att öka inlagringen av kol i ett skogsbestånd genom att

⁷⁵ Se till exempel: Nilsson, U., Fahlvik, N., Johansson, U., Lundström, A., & Rosvall, O. 2011. Simulation of the effect of intensive forest management on forest production in Sweden. *Forests* 2(1): 373–393.

förlänga omloppstiden.⁷⁶ Idag bestäms omloppstider ofta baserat på tillväxtekonomisk maximering av markvärdet⁷⁷. En jämförelse av ekonomiskt optimerade omloppstider med alternativen att senarelägga avverkning med 10, 20 eller 30 år som ett sätt att höja medelkolförrådet i ett bestånd under dess omloppstid, visar att det går att vinna klimatnytta genom ökat kollager men att det blir mycket dyrt på de flesta marker.

Effekten av att förlänga omloppstiden gäller dock endast den första omloppstiden då omställningen sker. Orsaken är att det är ökningen av medelkolförrådet som utgör klimatnyttan. Vid fortsatt brukande med förlängd omloppstid sker ingen ytterligare vinst av den förlängda omloppstiden. Däremot finns en kostnad som består i sänkt markvärde som en följd av de förlängda omloppstid.

Som jämförelse analyserades i nämnda studie också alternativet att förkorta omloppstiden med 10 år. Även detta resulterade i sänkt markvärde, men dessutom i sänkt kollager och sänkt nettotillväxt. Slutsatsen av studien blir att beståndens nettotillväxt är en mycket tungt vägande faktor såväl ekonomiskt som för klimatnyttan.

En slutsats är att ju mer man avviker från den punkt då medeltillväxten under en omloppstid kulminerar, desto större blir tillväxtförlusterna och negativ påverkan på kolbalansen.⁷⁸

Skogsskador

När det gäller skogens klimatnytta är det viktigt att också beakta skogsskador.^{79,80} Olika biotiska och abiotiska skador kan leda till barr- och bladförluster eller försämrade vatten- och näringstransport i trädet. Genom förlusten av barr och blad minskar denna typ av skador skogens förmåga att ta upp koldioxid genom fotosyntes. Andra skador orsakar ökad nedbrytning av ved, barr, blad, grenar och rötter som ökar koldioxidutsläppen och minskar klimatnyttan.

Skador redan vid etablering av ny skog innebär att beståndsutvecklingen försenas tidsmässigt och att luckor i beståndet kan uppstå. Det leder till tillväxtförluster som minskar beståndets klimatnytta under hela omloppstiden jämfört klimatnyttan i ett oskadat bestånd. I etableringsfasen förekommer att plantor skadas eller dödas av insekter, framför allt av snytbagge, av torka, frost och av syrebrist i rotzonen på grund av att plantan står i vatten.

⁷⁶ Lundmark, T., Poudel, B. C., Ståhl, G., Nordin, A. & Sonesson, J. 2018. Carbon balance in production forestry in relation to rotation length. *Canadian Journal of Forest Research* 48(6): 672–678.

⁷⁷ Markvärdet är det teoretiska ekonomiska värdet av en kal skogsmark. Markvärdet är nuvärdet av alla framtida kostnader och intäkter vid skogsproduktion för ett oändligt antal omloppstider.

⁷⁸ Routa, J., Kellomäki, S. & Strandman, H. 2012. Effects of Forest Management on Total Biomass Production and CO₂ Emissions from use of Energy Biomass of Norway Spruce and Scots Pine. *BioEnergy Research* 5(3): 733–747.

⁷⁹ För en genomgång av skogsskador, se: Witzell, J. m.fl. 2017. Skogsskötselserien, Skador på skog, del 1 och 2. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

⁸⁰ Jactel, H. m.fl. 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science* 66(7): 701–701.

I plant- och ungskogen är klövviltet den helt dominerande tillväxtnedsättande skadeorsaken⁸¹ genom mer eller mindre kraftig betning, barknag och fejning (figur SK17). I en analys utförd vid Skogsstyrelsen beräknas tillväxtnedsättningen av viltbete (främst älgbete) i tallungskog vara 6,4 miljoner m³sk per år med det viltryck som rådde i slutet av 2010-talet. Denna tillväxtnedsättning motsvarar ett minskat koldioxidupptag på 8,8 (6,4 × 1,375) miljoner ton per år⁸², att jämföra med Sveriges årliga utsläpp av växthusgaser som 2018 beräknas till 52 miljoner ton koldioxidekvivalenter⁸³.



Figur SK17 Älgbete står för en stor del av klövviltets skador och sätter ner tillväxten och minskar därmed potentiellt upptag av koldioxid och lagring av kol i växande skog. Kraftigt älgskadad tallungskog vintern 2017/2018. Styrnäs, Västernorrlands län. Foto Clas Fries.

I skog från förstagallringsstadiet och äldre utgör storm och snötryck samt rotröta, som främst drabbar gran, betydande skadeorsaker som sätter ner tillväxten.⁸⁴ Granbarkborren är ett stort och återkommande problem, särskilt i södra Sverige. Vid större förekomst och massförekomst angrips växande träd, träd dör och skogstillväxten sätts ner inom drabbade områden.

⁸¹ Normark, E. & Fries, C. 2019. Skogsskötsel med nya möjligheter. Skogsstyrelsen. Rapport 19/2019.

⁸² Bergquist, J., Kalén, C. & Karlsson, S. 2019. Skogsbrukets kostnader för viltskador. Återrapportering till regeringen. Skogsstyrelsen. Rapport 2019/16.

⁸³ Naturvårdsverket. 2019. Sveriges officiella statistik. <http://www.naturvardsverket.se/Samar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag> (Hämtat 2020-09-23.)

⁸⁴ Agestam, E. 2015. Gallring. Skogsskötselserien, kapitel 7. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

Också mycket torra och varma år kan minska träd tillväxten, även flera år efteråt. Torrår som har påverkat tillväxten är främst 1976, 1983, 1994⁸⁵ och 2018. Insektsskador brukar följa i spåren på torrår.

Skogsgödsling

Generellt sett är kunskapen god om skogsgödsling och dess effekter på tillväxt och miljö.^{86,87,88} Sedan länge är det klarlagt att tillgång på växttillgängligt kväve (N) är den mest begränsande faktorn för skogsträdens tillväxt på fastmark i Sverige.⁸⁹ Det betyder att gödsling med kväve är en effektiv åtgärd för att öka tillväxten. Detta gäller främst för barrträd på fastmark.

Orsaken att träd reagerar så kraftigt på gödsling är att förbättrad närings-tillgång gör att mängden barr ökar och därmed ökar möjligheten till fotosyntes och koldioxidupptag.⁹⁰ En del av ökningen beror också på en förändrad fördelning av tillväxten mellan rötter och ovanjordisk biomassa, till exempel stamved. En tredje orsak är att fotosyntesens effektivitet ökar vid gödsling.

Eftersom barren sitter kvar på träden i många år, påverkas trädets tillväxt under lång tid efter gödslingen. Vid engångsgödsling med 150 kg kväve per hektar i medelålders och äldre skog ligger tillväxtökningen i genomsnitt på 13–20 m³sk per hektar under en period på 6–10 år.

Efter 10 år har gödslingseffekten ebbat ut eftersom barrmassan som byggdes upp vid gödslingstillfället till största delen har återgått till den nivå den hade innan gödslingen.

Skogsgödsling har en klart positiv effekt på växthusgasbalansen, även om transport, spridning och tillverkning av gödselmedel innebär en ökad användning av fossila bränslen i form av drivmedel i jämförelse med skogsbruk utan gödsling. I en koldioxidbudget måste detta förhållande inkluderas (se faktaruta).

⁸⁵ SMHI. 2013. Torka. Faktablad nr 16.

https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.6359!/faktablad_torka%5B1%5D.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)

⁸⁶ Ståhl, E. & Bergh, J. 2013. Produktionshöjande åtgärder. Skogsskötselserien, kapitel 16. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

⁸⁷ Högbom, P., Larsson, S., Lundmark, T., Moen, J., Nilsson, U. & Nordin, A. 2014. Effekter av kvävegödsling på skogsmark. Kunskapssammanställning utförd av SLU på begäran av Skogsstyrelsen. Skogsstyrelsen. Rapport 1–2014.

⁸⁸ Jacobsson, S., F., Högbom, L. & Sikström, U. 2005. Skogsgödsling – en handledning från Skogforsk. Skogforsk.

⁸⁹ Tamm, C.O. 1991. Nitrogen in Terrestrial Ecosystems: Questions of Productivity, Vegetational Changes, and Ecosystem Stability. I: Ecological Studies Analysis and Synthesis (Ecological Studies, 81). New York: Springer-Verlag s. XII+115P.

⁹⁰ Linder, S. & Bergh, J. 1996. Näringsoptimering – granen växer ur produktionstabellerna. SLU. Fakta Skog nr 4–1996.

Koldioxidbudget för skogsgödsling

En skogskubikmeter motsvarar ett nettoupptag av 1,375 ton koldioxid om även trädens grenar, barr, löv, stubbar och rötter medräknas. Vid en tillväxtökning av gödsling på 15 m³sk per hektar ökar koldioxidinlagringen i stamved med $15 \times 1,375 \approx 20$ ton koldioxid per hektar. Vid tillverkning av kväveprodukter där man fångar upp luftens kväve (Haber-Bosch-processen) åtgår energi som medför ökade emissionerna av koldioxid. Tillsammans med emissioner vid transport och spridning av gödselmedel kan den ökade koldioxidemission av att gödsla med 150 kg kväve per hektar uppskattas till cirka 1,1 ton per hektar, att jämföra med ett ökat upptag av koldioxid på cirka 20 ton per hektar.

Ungskogsgödsling av gran

Ungskogsgödsling av gran^{91,92} har visat sig kunna ge kraftig tillväxtökning i granplanteringar. Metoden skiljer sig från normal skogsgödsling som görs i medelålders och äldre skog genom att den första gödslingen görs vid 2–4 meters medelhöjd. Därefter gödslas beståndet vartannat till vart tredje år tills dess att det sluter sig och därefter vart 7:e till vart 10:e år. I metoden ingår att gödsla 1–3 gånger efter att beståndet slutit sig. Sista gödslingen görs minst 7 år innan slutavverkning.

Den totala mängden kväve som tillförs under en hel omloppstid blir 800–1500 kg kväve per hektar, där ungefär tre fjärdedelar tillförs i ungskogen. I allmänna råd till skogsvårdslagen anges den högsta kvävegivan till 450 kg kväve per hektar och omloppstid, vilket gäller norra halvan av Sverige.⁹³

Idag är ungskogsgödsling av gran enligt den beskrivna modellen alltså inte förenligt med Skogsstyrelsens allmänna råd och praktiseras heller inte i operationellt skogsbruk, men om metoden kom till användning skulle den ge stor klimatnytta per arealenhet.⁹⁴ Det skulle också tidigarelägga tidpunkten då ungskogen går från att avge till att ta upp koldioxid (jämför figur SK3). Ungskogsgödsling av gran stärker också skogens potential som sänka för koldioxid. Det är positivt för kolbalansen i ett bestånd, på en fastighet eller i ett landskap och ökar skogens förmåga att ta upp koldioxid med över hundra procent.⁹⁵

⁹¹ Ibland även kallad behovsanpassad gödsling, eller balanserad gödsling av gran.

⁹² Se: Ståhl, P. & Berg, J. 2013. Produktionshöjande åtgärder. Skogsskötselserien, kapitel 16. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien

⁹³ Skogsstyrelsen. 2020. Skogsvårdslagstiftningen. Gällande regler 1 april 2020.

Tillgänglig på: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/lag-och-tillsyn/skogsvardslagen/skogsvardslagstiftningen-20202.pdf> (Hämtad 2020-09-23.)

⁹⁴ Poudel, B.C., Sathre, R., Bergh, J., Gustavsson, L., Lundström, A. & Hyvönen, R. 2012. Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden, *Environmental Science & Policy* 15(1): 106–124.

⁹⁵ Sathre, R., Gustavsson, L. & Bergh, J. 2010. Primary energy and greenhouse gas implications of increasing biomass production through forest fertilization. *Biomass and Bioenergy* 34: 572–581.

Blandskog, lövträd och främmande trädslag

Hur stor klimatnytta är hos blandskog eller vid användning av lövträd eller främmande trädslag i skogsbruket beror på vilken tillväxt det leder till. Det är då lämpligt att jämföra med tillväxten i barrskog som domineras av tall eller gran som bland våra inhemska trädslag har högst tillväxt på de flesta ståndorter.

Även om det metodmässigt är svårt att studera är det mycket som talar för att blandskog har lägre tillväxt än skog med enbart gran eller tall, på marker som är lämpliga för respektive trädslag.⁹⁶ Blandskog ger därför sannolikt lägre klimatnytta än skog med bäst växande trädslaget för aktuell ståndort. Det gäller under förutsättning att trädslagsrena bestånd inte drabbas av skador som sänker dess tillväxt under blandskogens.

Framför allt björk men också flera andra inhemska lövträd frösår sig naturligt efter föryngringsavverkning. I plant- och ungskogsfasen bidrar de då till högre klimatnytta än om de inte fanns i beståndet. För högsta klimatnytta på några decenniers sikt är det dock bäst att vid beståndsvården genom röjning och gallring gynna de träd som skogsägaren sått eller planterat, vanligtvis gran eller tall men i vissa fall även björk, eftersom de oftast är resultatet av växtförädling och därmed har bättre tillväxt än naturligt föryngrade träd.

Contortatall har den mest utbredda användning i svenskt skogsbruk bland främmande trädslag. Genom dess högre tillväxt än tall och gran på de flesta ståndorter⁹⁷ innebär användning av contortatall att skogens klimatnytta kan ökas ytterligare. Även odling av andra främmande trädslag som till exempel hybridlärk och hybridasp kan på lämpliga ståndorter innebära högre klimatnytta än användning av inhemska trädslag.

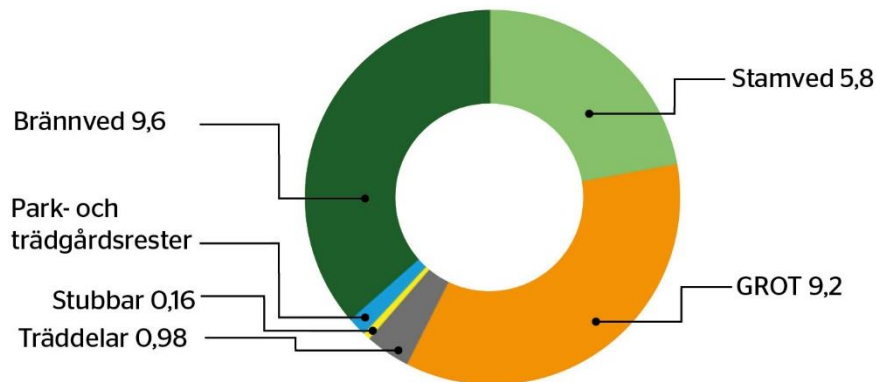
⁹⁶ Felton, A. m.fl. 2016. Replacing monocultures with mixed-species: Ecosystem service implications of two production forest alternatives in Sweden. *Ambio* 45, supplement 2: 124–139.

⁹⁷ Norgren, O. 1995. Growth differences between *Pinus sylvestris* and *Pinus contorta*. SLU, inst. för skogsskötsel. Doktorsavhandling. ISBN 91-576-5003-9.

Skörda mer av det som finns

Användningen av biobränslen i Sverige har ökat kontinuerligt de senaste 40 åren. År 2016 utgjorde biobränslen 139 TWh av totalt 563 TWh tillförd energi, det vill säga 25 %.⁹⁸ En stor andel av biobränslet kommer mer eller mindre direkt från skogen där också mer finns att hämta.

Den största andelen skoglig biomassa för energiändamål uppstår som en restström i skogsindustrin där stora delar av energin används direkt i de energikrävande processerna – inte minst i pappers- och massaindustrin (se avsnittet *Skogsbrukets och skogsindustrins koldioxidbalans*). Men en successivt ökande andel av tillförd skoglig biomassa används i kraftvärmeindustrin för att försä industri och samhälle med värme, varmvatten och el.⁹⁹ Det är främst tillväxten i kraftvärmeindustrin som drivit på utvecklingen mot ökade uttag av primära skogsbränslen, det vill säga biomassa som tas direkt från skogen för energiproduktion.¹⁰⁰ Under 2016 stod de primära skogsbränslena för 26 TWh¹⁰¹ (figur SK18).



Figur SK18 Andel av olika primära skogsbränslen som användes för energiproduktion år 2016 (26,2 TWh totalt). Källa: Energimyndigheten (2017).

Traditionell brännved tillsammans med grenar och toppar (GROT) dominerade uttaget av primära skogsbränslen år 2016 med dryga 9 TWh vardera. Därefter kommer stamved som bland annat inkluderar virke som inte håller den kvalitet som industrin kräver, såsom rötskadat virke, men också en del massaved som köps i konkurrens med pappers- och massaindustrin. Stubbar stod 2016 för en liten och krympande andel medan träddelar (okvistade stamsektioner) stod för knappt 1 TWh.

⁹⁸ Energimyndigheten. 2018. Energiläget i siffror 2018. <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2018/nu-finns-energilaget-i-siffror-20182/> (Hämtad 2020-09-23.)

⁹⁹ Kraftvärmeverk producerar elektricitet och fjärrvärme. Kraftvärme bygger på att det finns möjlighet att ta emot den värme som "blir över" vid produktionen av el, oftast i ett fjärrvärmenät.

¹⁰⁰ Kilpeläinen, A., Alam, A., Torssonen, P., Ruusuvoori, H., Kellomäki, S. & Peltola, H. 2016. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilisation from final felling of Norway spruce. *Biomass and Bioenergy* 87(1): 1–8.

¹⁰¹ Energimyndigheten. 2017. Produktion av oförädlade trädbränslen 2016. ES 2017:09.

För att sätta dessa siffror i ett skogsperspektiv kan man grovt säga att det går att få ut 2 TWh ur 1 miljon kubikmeter ved. En årsavverkning på dagens omkring 90 miljoner skogskubikmeter (m^3_{sk} , stam inklusive topp och bark ovan ett tänkt stubbskär) motsvarar således 180 TWh. Antar vi sedan att stamveden motsvarar 60 % av biomassan i ett träd ökar energiinnehållet i en svensk årsavverkning till 300 TWh om vi lägger till grenar och barr samt stubbar och rötter.

Den totala energipotentialen i skogen är alltså stor, men leveranserna begränsas av dagens efterfrågan tillsammans med ekonomiska, sociala och miljömässiga hållbarhetsaspekter.

Grenar och toppar – GROT

Tillsammans med konventionell brännved är det främst uttag i form av avverkningsrester som grenar och toppar (GROT) från föryngringsavverkningar som dominerar uttaget av primära skogsbränslen. En del GROT tas även ut tillsammans med stamved som okvistade så kallade träddeklar, i första hand i samband med gallring (figur SK19).



Figur SK19 GROT upplagd i högar på hygget (till vänster) innan den skotas till avlägg där den lagts i välda och täckts med papp för att underlätta torkning och minska nedblötning (till höger). Foto Clas Fries.

GROT-uttag kan påverka kolbalansen i skogen på två sätt:

- uttaget för bort kol som annars skulle ha tillförts marken
- genom att påverka plantetablering och tillväxt i nästa skogsgeneration, där effekten av det extra uttaget av näring som följer med den näringsrika GROT:en fått mest uppmärksamhet

Även om GROT i samband med föryngringsavverkning står för en liten del av det kol som tillförs marken i samband med tidigare röjningar, gallringar och i form av förna från träd, markvegetation och fauna över en omloppstid, så visar modellstudier som väntat att kolinlagringen i mark minskar något vid ökade uttag av GROT.¹⁰² Skillnaden i kolförråd mellan hyggen där man har respektive inte har tagit ut GROT, är störst under de första decennierna. Sedan minskar skillnaden i takt med att kvarlämnade

¹⁰² Ortiz, C.A., Lundblad, M., Lundström, A. & Stendahl, J. 2014 The effect of increased extraction of forest harvest residues on soil organic carbon accumulation in Sweden. *Biomass & Bioenergy* 70: 230–238.

hyggesrester bryts ned och kolet frigörs som koldioxid. Detta måste beaktas då klimateffekten av GROT-uttag för energiändamål värderas.

Uttag av GROT vid föryngringsavverkning kan ge upphov till tillväxtförluster under kommande omloppstid. Orsaken är att växtnäring tas ut då de näringsrika barren följer med GROT:en till avlägg och kraftvärmeverk. Det är främst bortförel av kväve som orsakar tillväxtförluster. Studier har visat att man vid GROT-uttag i föryngringsavverkning kan ”förlora” upp till 300–400 kg kväve per hektar i granbestånd i södra Sverige, medan förlusten är mindre i norra Sverige¹⁰³ och i samband med gallring.¹⁰⁴

Kväveförlusterna vid praktiskt skogsbruk förväntas bli lägre än i dessa experiment på grund av att en del GROT blir kvar på hygget. En positiv effekt av GROT-uttag kan också uppstå om markberedningen underlättas så att en bättre etableringsmiljö för den nya skogsgenerationen kan erbjudas.

Tillväxtförluster på 0–20 % har visat sig i gallringar i såväl tall- som granbestånd,¹⁰⁵ men även uttag av GROT vid föryngringsavverkningar på magrare granmarker bedöms kunna orsaka en viss tillväxtminskning. Liksom vid gödsling upphör den positiva tillväxteffekten av avverkningsresterna efter en tid.¹⁰⁶

Det går att enkelt motverka de tillväxtförluster som GROT-uttag ger upphov till genom kvävegödsling, askåterföring vid uttag på torvmark och tidigareläggning av föryngringsåtgärder, där den sista åtgärden underlättas genom att avverkningsrester tagits ut.

Stubbar

I dagsläget (2020) skördas knappt några stubbar alls i Sverige trots att möjlig mängd att skörda vid föryngringsavverkning uttryckt som energiinnehåll är ungefär lika stor som för GROT. Orsaker är konkurrens från andra bränslen såsom avfall, att kostnaden för skörd är högre än för GROT och att stubbar i högre grad har ifrågasatts som bränsle ur såväl klimat- som biodiversitetssynpunkt.

Stubbar har däremot inte samma höga näringsinnehåll som GROT. Stubbskörd kan därför inte förväntas påverka skogstillväxten i nästa skogsgeneration på samma sätt som GROT-skörd. Detta har också visats i fältförsök.¹⁰⁷

Liksom i fallet med GROT leder uttag av stubbar till att kolinlagringen i mark minskar, men stubbarna är betydligt mer ”långlivade” än GROT. På lång sikt, om uttagsintensiteten stabiliseras på en viss nivå, kommer uttag av stubbar (liksom av GROT) att förskjuta kollagret i marken mot en ny jämvikt på en lägre nivå.

¹⁰³ Egnell, G. & Leijon, B. 1999 Survival and growth of planted seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* after different levels of biomass removal in clear-felling. *Scand. J. Forest Res.* 14: 303–311.

¹⁰⁴ Egnell, G. & Leijon, B. 1997 Effects of different levels of biomass removal in thinning on short-term production of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. J. Forest Res.* 12: 17–26.

¹⁰⁵ Egnell, G. 2017 A review of Nordic trials studying effects of biomass harvest intensity on subsequent forest production. *Forest Ecology and Management* 383: 27–36.

¹⁰⁶ Egnell, G. 2011. Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary? *Forest Ecology and Management* 261(1): 148–153.

¹⁰⁷ Egnell, G. 2017 A review of Nordic trials studying effects of biomass harvest intensity on subsequent forest production. *Forest Ecology and Management* 383: 27–36.

En vanlig uppfattning är att om den övre delen av marken och markens fält- och bottenskikt störs genom stubbskörd, eller mer allmänt vid mekanisk markberedning, stimuleras nedbrytningen av markens kol med ökad koldioxidavgivning som en direkt följd. Fältförsök pekar mot att detta generella antagande inte stämmer. Vid en samlad analys med data från 14 lokaler där koldioxidavgången under de två första åren efter avverkning jämfördes mellan markberedda, stubbskördade och ”orörda” kontrollhyggen visade det sig att koldioxidavgången var signifikant lägre under det första året för alla störningsbehandlingar jämfört med det ej markberedda hygget. Redan år två hade behandlingseffekten upphört och samtliga behandlingar låg på samma nivå.¹⁰⁸

Kolpoolerna i mark och träd i rena markberedningsförsök som löpt under längre tid stärker denna bild. Då dessa kolpooler jämfördes 25 år efter behandling var kolförrådet i mark lika stort för ej markberedda kontrolltytor i jämförelse med harvade, höglagda eller hyggesplogade ytor, samtidigt som kolpoolen i trädbiomassan var högre för de markberedda ytorna.¹⁰⁹ I detta fall har den mekaniska markbehandlingen istället medfört att den totala kolpoolen i skogen har ökat genom att markbehandlingen påverkat såväl plantöverlevnad som tillväxt positivt.

Det finns många vetenskapliga studier baserade på livscykelanalyser av biobränslesystem som grundar sig på GROT och stubbar i både Finland och i Sverige, där man ersätter fossila bränslen och får substitutionseffekter.¹¹⁰ Alla publikationer inom området har budskapet att klimatnyttan är positiv då GROT och stubbar används för att ersätta fossil energi. I ett svenskt nationellt perspektiv kan det röra sig om minskade koldioxidutsläpp motsvarande cirka 10 miljoner ton per år.¹¹¹

Däremot kan kolbalansen och därmed klimateffekten på kort sikt påverkas negativt av att stubbar som annars långsamt skulle ha brutits ner istället tas ut och eldas upp med direkt avgivande av koldioxid.¹¹² Även om det finns ett tryck på snabba åtgärder för att motverka klimatförändringen är det viktigt att inte bara inrikta sig på kortsiktiga effekter i skogen, utan huvudinriktningen bör ligga på långsiktiga effekter.

Klena träd

I täta bestånd som börjar närma sig tio meters höjd och tidpunkt för första gallring finns också en bioenergipotential. Det är då ofta fråga om bestånd som inte röjts vid normal höjd kring två till fyra meter eller som efter

¹⁰⁸ Strömgren, M., Mjöfors, K. & Olsson, B.A. 2017. Soil-surface CO₂ flux during the first 2 years after stump harvesting and site preparation in 14 Swedish forests. *Scand. J. Forest Res.* 32: 213–221.

¹⁰⁹ Mjöfors, K., Strömgren, M., Nohrstedt, H.Ö., Johansson, M.B. & Gärdenäs, A.I. 2017. Indications that site preparation increases forest ecosystem carbon stocks in the long term. *Scand. J. Forest Res.* 32: 117–125.

¹¹⁰ Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J.-P., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P. & Liski, J. 2012. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *Global Change Biology Bioenergy* 4(2): 202–212.

¹¹¹ Lundmark, T., Bergh, J., Hofer, P., Lundström, A., Nordin, A., Poudel, B.C., Sathre, R., Taverna, R. & Werner, F. 2014. Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation. *Forests* 5: 557–578.

¹¹² Melin, Y. 2014. Impacts of stumps and roots on carbon storage and bioenergy use in a climate change context. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* 2014:79.

röjning fortfarande är relativt stamtäta (figur SK20). Här kan två nyttigheter kombineras, dels att sätta ett bestånd i skogsskötselmässigt bättre skick, dels att utvinna bioenergi.



Figur SK20 Exempel på ett så kallat konfliktbestånd (i bakgrunden) som uppkommit på grund av utebliven röjning vid normal höjd (ca 2–4 m). I denna typ av bestånd finns möjlighet att skörda klena träd för energiändamål och på samma gång sätta beståndet i skogsskötselmässigt bättre skick. Foto Jenny Stendahl.

Uttag i täta bestånd är emellertid kostsamt, vilket har lett till tankar om schematiska uttag där samtliga stammar skördas i ett geometriskt mönster, till exempel längs korridorer i beståndet. Avverkningen görs med aggregat som kan hantera flera stammar samtidigt. Mellan korridorerna bibehålls stamtätheten.¹¹³

Vid denna typ av schematiska avverkning återstår utveckling av tekniken och att invänta studier som visar hur kvarvarande bestånd utvecklas innan metoden kan tillämpas i större skala. Precis som vid uttag av GROT kan uttag av biomassa i form av hela träd i unga bestånd ge upphov till tillväxtförluster.¹¹⁴

¹¹³ Sängstuvall, L., Bergström, D., Lämås, T. & Nordfjell, T. 2012. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(1): 56–73.

¹¹⁴ Se till exempel: Egnell, G. & Ulvcrona, K.A. 2015. Stand productivity following whole-tree harvesting in early thinning of Scots pine stands in Sweden. *Forest Ecology and Management* 340: 40–45.

Hur påverkar skoglig bioenergi klimatet?

Det är framförallt användningen av biomassa från skogen för energiändamål som har skapat debatt om och på vilket sätt skogarna gör mest klimatnytta. Det gäller inte minst våra nordliga skogar med långa omloppstider. Debatten drivs på av vetenskapen där olika studier leder till olika slutsatser rörande klimateffekter av att använda biomassa från skogen för energiändamål.

Vid livscykelanalyser av skogliga biobränslen med avseende på klimateffekten utgår man från situationen idag och jämför effekten av olika val framåt i tiden.

Kolskuld eller kolkredit

Biobränslen släpper normalt ut något mer koldioxid per producerad energienhet än de flesta fossila alternativen.¹¹⁵ Detta tillsammans med det faktum att det tar tid att återställa kolförrådet i skogen efter en föryngringsavverkning gör att man i olika studier har talat om en ”kolskuld” som måste betalas tillbaka innan några positiva klimateffekter av att ta ut skogsbränsle uppstår.¹¹⁶

Ett annat synsätt är att våra skogar över tid har lagrat in koldioxid, vilket har skapat en ”kolkredit” som kapitaliseras vid skörd och att vi därför får positiva klimateffekter tämligen omgående så länge som vi över tid bibehåller eller ökar kolförrådet i skog och mark över hela skogslandskapet.

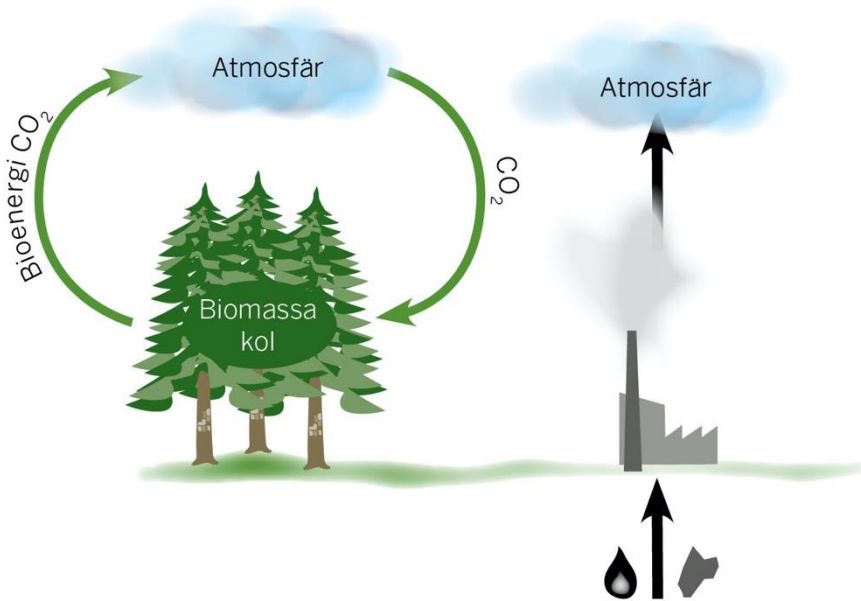
Så länge kolförrådet i ett brukat skogslandskap är i balans, det vill säga då uppbyggnaden av kolförrådet genom tillväxten är i balans med avgången av kol vid skörd, nedbrytning och vid eventuella skogsbränder, sker ingen nettotillförsel av koldioxid från skogen till atmosfären. Som beskrivs i ett tidigare avsnitt (*Kolbalansen i Sveriges skogar*) sker i Sverige för närvarande en upplagring av kol i den brukade skogen eftersom kolupptaget vid skogens tillväxt är större än förlustposterna. Detta är något som har pågått under åtminstone de senaste hundra åren.

Fossila bränslen tillför nytt kol till atmosfären

Kolcykeln i den brukade skogen kan jämföras med förbränning av fossila bränslen där kol som lagrats som kol, olja eller gas i miljontals år i geologiska lager tillförs atmosfären. Förbränning av fossila bränslen tillför mer och mer koldioxid till atmosfären medan förbränning av biobränslen innebär utbyte av kol mellan biomassa och atmosfären inom ramen för det biogena kretsloppet (figur SK21).

¹¹⁵ EPA (Environmental Protection Agency). 2018. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf (Hämtad 2020-09-23.)

¹¹⁶ Eliasson, P., Svensson, M., Olsson, M. & Ågren, G.I. 2013. Forest carbon balances at the landscape scale investigated with the Q model and the CoupModel – responses to intensified harvests. *Forest Ecology and Management* 290: 67–78.



Figur SK21 Biogent kol ingår i en relativt sett snabb naturlig kolcykel som endast påverkar atmosfärisk koldioxid under förhållanden då kolcykeln är ur balans, det vill säga då upptag och avgång är olika stora. Det kan jämföras med förbränning av fossila bränslen som förflyttar kol som lagrats i miljontals år i geologiska lager till atmosfären. Det är en likriktad process.

Uttag av skogsbränsle är integrerat med annan skörd

Det finns studier som utgår från avverkning och uttag av hela träd för energiändamål där referensen är att träden får stå kvar och växa.¹¹⁷ Vid en sådan jämförelse uteblir klimatnyttan så länge som träden i referensfallet är vitala och växtliga. Istället bidrar ett sådant uttag till klimatförändringen under lång tid.

I det svenska fallet utgör skogsbränslet ett integrerat sortiment tillsammans med sågtimmer och massaved.¹¹⁸ Beslut om avverkning styrs inte i första hand av det lågt prissatta bränslesortimentet utan av pris och efterfrågan på mer högvärdiga skogsprodukter. En referens där träden får stå kvar och växa blir därför inte relevant.

Separata skogsbränsleuttag i sena röjningar och tidiga gallringar blir lite av sårfall där tillväxten skulle ha varit högre om skogen lämnats ogallrad. Men dessa avverkningar är en del av skogsvården som syftar till att flytta över tillväxt till färre och för framtiden mer värdefulla träd inför kommande gallringar och inte minst den avslutande föryngringsavverkningen. Dessa avverkningar skulle därför ändå utföras förr eller senare.

Avverkningarna utförs också för att skapa mer stabila och vitala bestånd vilket minskar framtida skaderisker. Även vid normal gallring kan en del av

¹¹⁷ Holtsmark, B. 2013. The outcome is in the assumptions: analyzing the effects on atmospheric CO₂ levels of increased use of bioenergy from forest biomass. *Global Change Biology Bioenergy* 5: 467–473.

¹¹⁸ I samband med skörd och i industriprocesser kan till exempel GROT respektive bark tas tillvara för energiändamål.

den stamved som tas ut levereras direkt till energiindustrin. Det kan bero på att veden är olämplig för skogsindustrin, till exempel på grund av röta, stamkrök eller trädslag.

Det förekommer också att energiindustrin köper stamved av massavedskvalitet i konkurrens med skogsindustrin. På så sätt bidrar energiindustrin till bättre lönsamhet för skogsägarna samtidigt som skogsvården främjas. Här skulle man kunna hävda att detta är negativt för klimatet i ett medellångt perspektiv då dessa träd skulle ha växt vidare utan gallring. Men då missar man att detta är en viktig del av skogsvården och att en del av tillväxten förflyttas till träd med bättre förutsättningar att leverera virke som i framtiden kan användas i långlivade produkter och där konkurrerande material med ett idag stort klimatavtryck kan ersättas med träprodukter.

En vikande efterfrågan på gallringsvirke kan också leda till förändrade skötselrutiner där skogarna glesas ut väsentligt redan vid röjning och sedan får stå fram till föryngringsavverkning. Något som i så fall också skulle påverka kolbalansen negativt genom att hårda röjningar och gallringar sänker totalproduktionen.^{119,120}

Olika tidsperspektiv

Det finns studier som bygger på jämförelser över i skogliga sammanhang korta tidsperioder där klimatnyttan av att använda skogsbränsle jämförs med andra energialternativ.¹²¹ Motiv för sådana studier kan vara politiska beslut om minskade koldioxidutsläpp bundna till givna årtal, eller att det i klimatdebatten framförs att det är bråttom att åstadkomma minskade växthusgasutsläpp. Ett kort tidsperspektiv på någon eller några decennier är inte lämpligt vid analys av den slutgiltiga klimateffekten av olika skogsskötselstrategier.

Beslut baserade på analyser med ett kort tidsperspektiv riskerar istället att minska möjligheten att bromsa klimatförändringen på längre sikt. Med ett kort tidsperspektiv gör kolet som under en period lagras i avverkningsrester efter en avverkning klimatnytta. Logiken är att detta kortlivade kollager gör att det är bättre att använda fossila bränslen som ofta (men inte alltid) avger mindre koldioxid per producerad energienhet än biobränslen.¹²²

Men detta resonemang håller bara under en kort period eftersom uppehållstiden för koldioxid i atmosfären är lång i förhållande till den tid det tar för avverkningsrester att brytas ner. Detta illustreras i figur SK22 där figuren till vänster visar uppehållstiden i atmosfären för en engångspuls av koldioxid som uppstår till exempel vid förbränning av ett fossilt bränsle eller biomassa.¹²³ Efter 100 år finns nästan 40 % av den koldioxid som släppts ut

¹¹⁹ Pettersson, N., Fahlvik, N. & Karlsson, A. 2019. Röjning. Skogsskötselserien.

Skogsskötselserien, kapitel 6. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

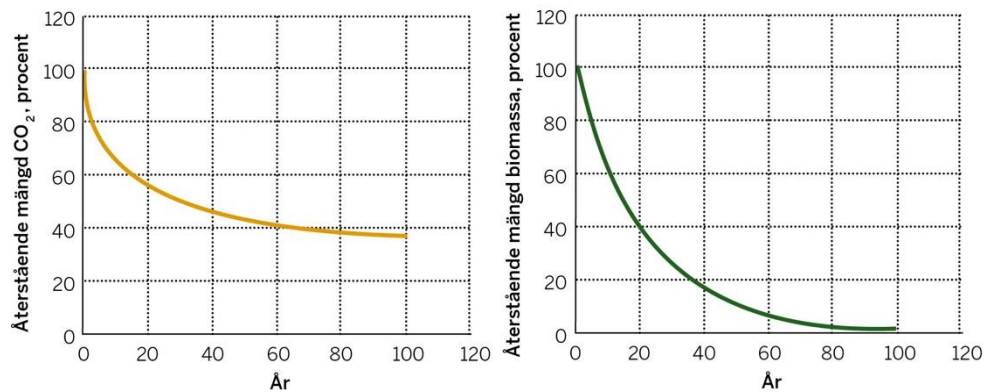
¹²⁰ Agestam, E. 2015. Gallring. Skogsskötselserien, kapitel 7. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

¹²¹ Berndes, G. 2012. Bioenergy's contribution to climate change mitigation – a matter of perspectives. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 6(3): 233–235.

¹²² EPA (Environmental Protection Agency). 2018. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf (Hämtad 2020-09-23.)

¹²³ IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt,

efter en engångspuls kvar i atmosfären. Figuren till höger visar nedbrytningsförloppet för stubbar som lämnas kvar på ett hygge.¹²⁴ Under de 100 åren har stubbar som lämnats efter en avverkning brutits ner nästan fullständigt, vilket resulterat i att också deras kolinnehåll har släppts ut i atmosfären som koldioxid.



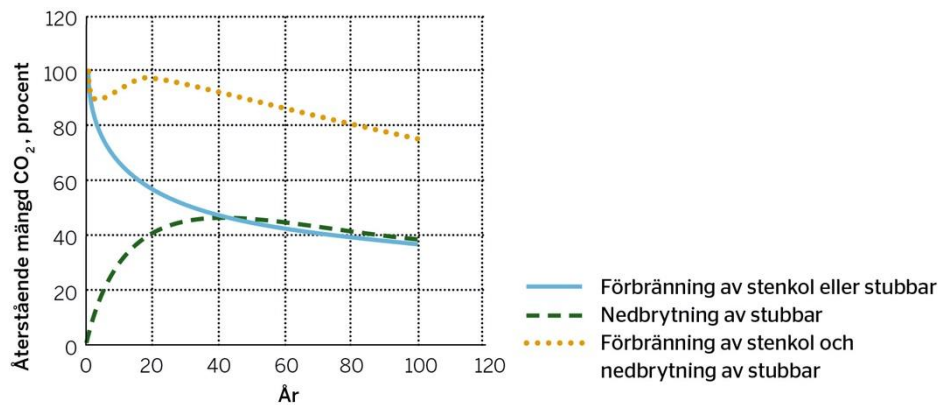
Figur SK22 Figuren till vänster illustrerar hur mycket av ett pulsutsläpp av koldioxid, till exempel i samband med förbränning av ett fossilt bränsle eller biomassa i ett kraftvärmeverk, som finns kvar i atmosfären över 100 år. Källa: IPCC (2007). Figuren till höger visar nedbrytningsförloppet hos stubbar som lämnas på ett hygge över 100 år. Källa: Melin m.fl. (2009).

K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (red.)). Cambridge University Press, Cambridge and New York. 996 s.

¹²⁴ Efter: Melin, Y., Petersson, H. & Nordfjell, T. 2009 Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden – A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257: 1445–1551.

Om stenkol bränns istället för till exempel stubbar efter en avverkning kommer koldioxid att tillföras atmosfären både från stenkolsförbränningen och stubbarna när stubbarna successivt bryts ner på hygget. Den långa uppehållstiden för koldioxid i atmosfären gör att alternativet att bränna stenkol ganska snabbt ger större mängd koldioxid i atmosfären än om stubbarna hade skördats och förbränts och stenkolen lämnats kvar i sitt stabila förråd (figur SK23).

För GROT-skörd blir effekten än tydligare jämfört med om stubbar skördas eftersom GROT:ens nedbrytningshastighet är högre än stubbarnas.



Figur SK23 Den heldragna blå linjen visar den återstående mängd koldioxid som finns kvar i atmosfären under hundra år efter förbränning av stenkol eller stubbar år 0 (källa: IPCC (2007)) och under antagandet att de olika bränslena levererar samma energimängd per enhet koldioxidutsläpp (samma graf som i figur SK22). Den streckade gröna linjen visar koldioxidbidraget från nedbrytning av motsvarande mängd stubbar om de istället lämnats kvar i skogen och med antagandet att koldioxidavgången är direkt relaterad till biomassaförlusten. IPCC:s nedbrytningsfunktion för koldioxid i atmosfären har använts på varje års bidrag från nedbrytning av stubbarna (källor: Melin m.fl. (2009) och IPCC (2007)¹²⁵). Den prickade gula linjen visar mängden koldioxid som finns kvar i atmosfären under hundra år om man eldar stenkol istället för att använda stubbar som bränsle. I exemplet tas inte hänsyn till de emissioner som uppstår vid brytning och transport av de två bränslealternativen.

Det finns stora möjligheter att öka uttag av biobränslen i skogen i form av GROT och stubbar eftersom dessa om de lämnas ändå skulle brytas ned och successivt frigöra koldioxid. Om man tar hänsyn till biologiska, tekniska och ekonomiska restriktioner är bedömningen att uttaget av primära skogsbränslen kan mer än fördubblas jämfört med dagens nivå.¹²⁶

¹²⁵ IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (red.)]. Cambridge University Press. 996 s.

¹²⁶ de Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S. & Olsson, B.A. 2017. Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? Forest Ecology and Management 383: 3–16.

Klimatnyttan i framtiden

Vilken klimatnytta skogen kan göra i framtiden beror till stor del på hur den kommer att växa. Modellberäkningar visar på en förväntad ökad tillväxt i norra Europa, men på ganska olika nivå. Att skillnader uppstår är naturligt och beror på att modellerna reagerar olika på ökad temperatur, förlängd tillväxtsång, ökad koldioxidhalt och förändrad nederbörd. Sannolikt kommer skogsskadorna att öka vilket i så fall håller tillbaka den förväntade ökade tillväxten.

I ett scenario med förbättrad skogsskötsel och olika tillväxthöjande åtgärder i skogsbruket framöver pekar SKA 15¹²⁷ mot att tillväxten kommer att kunna höjas med cirka 20 % om 100 år. Till detta kommer också möjligheten att klimatförändringarna bidrar till att öka tillväxten i den svenska skogen ytterligare.

Den förhöjda koldioxidkoncentrationen i atmosfären, ökad temperatur och ökad tillgång på kväve kan ha bidragit till ett ökat koldioxidupptag i tempererade och boreala skogar, det vill säga i en mycket stor andel av världen skogar.¹²⁸ Men det ökande virkesförrådet i stora delar av dessa skogar kan vara den viktigaste orsaken.

Ett indirekt bevis för att upptaget av koldioxid har ökat på det norra halvklotet identifierades redan på 1980-talet då man noterade att skillnaden i luftens koldioxidkoncentration mellan sommar och vinterhalvåret, i den långa provtagningsserien från Mauna Loa, Hawaii, har ökat över tid.¹²⁹ Denna trend har sedan fortsatt.

Forskargrupper i Sverige och Finland har sedan millennieskiftet använt sig av olika tillväxtmodeller för att uppskatta hur trädens tillväxt kommer att påverkas av klimatförändringar. Tillväxtmodellerna reagerar lite olika på ökad temperatur, förlängd tillväxtsång, ökad koldioxidhalt och förändrad nederbörd, men alla modeller visar på ökad tillväxt i norra Europa från 10 % till 100 % som mest.^{130,131,132,133}

I figur SK24 framgår den enligt modellerna förväntade relativa tillväxtökningen i skogen om 100 år jämfört med i dag för tall, gran och

¹²⁷ Claesson, S., Duvemo, K., Lundström, A. & Wikberg, P.-E. 2015. Skogliga konsekvensanalyser 2015 – SKA 15. Skogsstyrelsen, Rapport 10–2015.

¹²⁸ Hyvönen, R. m.fl. 2007. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173(3): 463–480.

¹²⁹ Bacastow, R.B., Keeling, C.D. & Whorf, T.P. 1985. Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959–1982. *Journal of Geophysical Research* 90: 10,529–10,540.

¹³⁰ Alam, A., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. 2008. Impacts of thinning on growth, timber production and carbon stocks in Finland under changing climate. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 501–512.

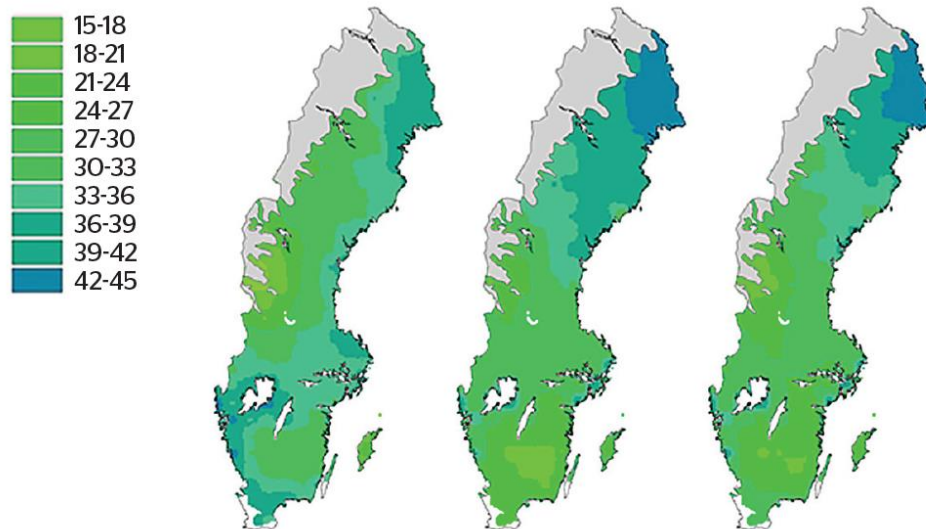
¹³¹ Briceño-Elizondo, E. Garcia-Gonzalo, J. Peltola, H. Matala, J. & Kellomäki, S. 2006. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. *Forest Ecology and Management* 232: 152–167.

¹³² Koca, D., Smith, B. & Sykes, M.T. 2006. Modelling regional climate change effects on Swedish ecosystems. *Climatic Change* 78: 381–406.

¹³³ Bergh, J., Nilsson, U., Kjartansson, B. & Karlsson, M. 2010. Impact of climate change on the productivity of Silver birch, Norway spruce and Scots pine stands in Sweden with economic implications for timber production. *Ecological Bulletins* 53(15): 185–195.

vårbjörk.¹³⁴ Analyserna baseras på ett klimatscenario som motsvarar en temperaturökning på cirka 3 °C om 100 år jämfört med i dag. Den relativa tillväxtökningen för tall och gran bedöms bli störst i norra Sverige och Finland. I södra Sverige, Danmark och de baltiska länderna blir tillväxtökningen något lägre på grund av att vattentillgången under sommaren blir begränsande.¹³⁵ Även lövträden ökar sin tillväxt i samma omfattning som tall och gran, bland annat genom tidigare skottskjutning på våren.^{136,137}

Ökning i nettoprimärproduktion, %



Figur SK24 Förväntad relativ tillväxtökning i skogen om 100 år jämfört med i dag för, från vänster, tall, gran och vårbjörk vid ett klimatscenario som motsvarar en temperaturökning på cirka 3 °C om 100 år jämfört med i dag. Källa: Bergh m.fl. (2010).

Eftersom klimatförändringar kommer att påverka tillväxten och koldioxidupptaget i skogen, så kommer även kolbalansen i skogen att påverkas.¹³⁸ I livscykelanalyser (LCA) som gjorts av hur klimatförändringar påverkar skogens kolbalans, där skogens tillstånd skrivits fram i 100 år, kom man fram till att klimatnyttan ökade med cirka 20 %. Ökningen bestod i ökad kolinlagring i trädbiomassan, skogsmarken och träprodukter och i ökad substitution eftersom det går att avverka mer tack vare ökad tillväxt i sko-

¹³⁴ Bergh, J., Nilsson, U., Kjartansson, B. & Karlsson, M. 2010. Impact of climate change on the productivity of Silver birch, Norway spruce and Scots pine stands in Sweden with economic implications for timber production. *Ecological Bulletins* 53(15): 185–195.

¹³⁵ Rytter, L., Andreassen, K., Bergh, J., Ekö, P.M., Gronholm, T., Kilpeläinen, A., Lazdina, D., Muiste, P. & Nord-Larsen, T. 2015. Availability of Biomass for Energy Purposes in Nordic and Baltic Countries: Land Areas and Biomass Amounts. *Baltic Forestry* 21: 375–390.

¹³⁶ Koca, D., Smith, B. & Sykes, M.T. 2006. Modelling regional climate change effects on Swedish ecosystems. *Climatic Change* 78: 381–406.

¹³⁷ Bergh, J., Nilsson, U., Kjartansson, B., Karlsson, M. 2010. Impact of climate change on the productivity of Silver birch, Norway spruce and Scots pine stands in Sweden with economic implications for timber production. *Ecological Bulletins* 53(15): 185–195.

¹³⁸ Poudel, B.C., Sathre, R., Bergh, J., Gustavsson, L., Lundström, A. & Hyvönen, R. 2012. Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden, *Environmental Science & Policy* 15(1): 106–124. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.09.005>

gen. Används den ökade tillväxten i norra Europa, inklusive användning av GROT, motsvarar det 230–410 TWh per år.¹³⁹

Under överskådlig framtid kommer dagens unga skogar fortsätta att ta upp koldioxid. Det är mer osäkert om äldre skogar kommer att bevara sitt höga koldioxidupptag om temperaturen ökar¹⁴⁰ eftersom små förändringar av respiration och fotosyntes påverkar skogens kolbalans (se avsnittet *Skogens kolbalans – grunder*). Skogsekosystemmodeller tyder på att skogens förmåga att ta upp koldioxid som uppstår genom global klimatförändring sannolikt kommer att bibehållas på kort sikt (över flera decennier) men kan gradvis minska på medellång sikt.¹⁴¹

Klimatförändringar kan också leda till ökade skador såsom insektsskador, svampskador, fler stormfällningar, ökad viltbetning samt fler och mer omfattande skogsbränder (se avsnittet *Skogsskador*). Skador kan orsaka direkta tillväxtförluster men kan även påverka avsättningen av virke som kan vara angripet av insekter, patogener eller vara brandskadat. Det är dock svårt att bedöma omfattningen av framtida skador.

Normala somrar har nederbörds klimatet ingen större effekt på tillväxten men däremot mycket torra somrar kan orsaka tillväxtförluster, särskilt i södra Sverige.¹⁴² Under de senaste fem decennierna är det 1976, 1983, 1994 och 2018, vars somrar har varit så torra att de har orsakat barrförluster och minskad tillväxt. Torka och barrförlust kan även påverka tillväxten påföljande år. Mycket torra och varma somrar kan också leda till ökade insektsangrepp som förvärrar situationen åren efter torrår. Till det kommer mer eller mindre omfattande skogsbränder under torråren.

I vilken utsträckning ökade skador kommer att hålla tillbaka den enligt modellberäkningar förväntade ökade tillväxten är svårt att bedöma idag. Vid flera typer av omfattande skador i den skog som brukas för virkesproduktion kan avverkningar styras om till den skadade skogen, samtidigt som andra planerade avverkningar skjuts på framtiden. På så sätt kan både tillväxteffekter och climateffekter av skogsskador motverkas.

¹³⁹ Rytter, L., Andreassen, K., Bergh, J., Ekö, P.M., Gronholm, T., Kilpeläinen, A., Lazdina, D., Muiste, P. & Nord-Larsen, T. 2015. Availability of Biomass for Energy Purposes in Nordic and Baltic Countries: Land Areas and Biomass Amounts. *Baltic Forestry* 21: 375–390.

¹⁴⁰ Hyvönen, R. m.fl. 2007. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173(3): 463–480.

¹⁴¹ Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E.M., Elbers, J.A., Erhard, M., Grünwald, T., Kowalski, A.S., Rannik, Ü. & Sprinz, D. 2003. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. *Ecosystems* 6: 168–1184.

¹⁴² Bergh, J., Linder, S. & Bergström, J. 2005. Potential production of Norway spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 204(1): 1–10.

Litteratur

- Agestam, E. 2015. Gallring. Skogsskötselserien, kapitel 7. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- Agostini, A., Giuntoli, J., Marelli, L. & Amaducci, S. 2019 Flaws in the interpretation phase of bioenergy LCA fuel the debate and mislead policymakers. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. DOI: 10.1007/s11367-019-01654-2.
- Alam, A., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. 2008. Impacts of thinning on growth, timber production and carbon stocks in Finland under changing climate. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 501–512.
- Andersson Gull, B. & Berlin, M. 2016. Skogsträdsförädling för ett förändrat klimat. I: Skogsträdsförädling. Skogsskötselserien, kapitel 19, s. 80–87. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- Andrew, R.A. 2018. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth Syst. Sci. Data* 10: 195–217.
- von Arnold, K., Weslien, P., Nilsson, M., Svensson, B.H. & Klemmedtsson, L. 2005. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained coniferous forests on organic soils. *Forest Ecology and Management* 210: 239–254.
- Bacastow, R.B., Keeling, C.D. & Whorf, T.P. 1985. Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, 1959–1982. *Journal of Geophysical Research* 90: 10,529–10,540.
- Berggren Kleja, D., Svensson, M., Hooshang, M., Jansson, P.-E., Langvall, O., Bergkvist, B., Johansson, M.-B., Weslien, P., Truusb, L., Lindroth, A. & Ågren, G. 2008. Pools and fluxes of carbon in three Norway spruce ecosystems along a climatic gradient in Sweden. *Biogeochemistry* 89: 7–25.
- Bergh, J., Linder, S. & Bergström, J. 2005. Potential production of Norway spruce in Sweden. *Forest Ecology and Management* 204(1): 1–10.
- Bergh, J., Nilsson, U., Kjartansson, B. & Karlsson, M. 2010. Impact of climate change on the productivity of Silver birch, Norway spruce and Scots pine stands in Sweden with economic implications for timber production. *Ecological Bulletins* 53(15): 185–195.
- Bergkvist, B. och Olsson, M. (redaktörer). 2008. Kolet, klimatet och skogen – så kan skogsbruket påverka. Information från LUSTRA.
- Bergquist, J., Kalén, C. & Karlsson, S. 2019. Skogsbrukets kostnader för viltskador. Återrapporering till regeringen. Skogsstyrelsen. Rapport 2019/16.
- Berndes, G. 2012. Bioenergy's contribution to climate change mitigation – a matter of perspectives. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 6(3): 233–235.
- Berndes, G., Goldmann, M., Johnsson, F., Lindroth, A. & Wijkman, A. 2018. Forests and the climate. Manage for maximum wood production or leave the forest as a carbon sink? Report from a conference held on March 12–13, 2018, in Stockholm, Sweden. KSLAT 6–2018.
- Björheden, R. 2019. Det svenska skogsbrukets klimatpåverkan. Upptag och utsläpp av växthusgasen koldioxid. Skogforsk. 24 s. Tillgänglig på: <https://www.skogforsk.se/produkter-och-evenemang/trycksaker/2019/det-svenska-skogsbrukets-klimatpaverkan/>.
- Braun, M., Fritz, D., Weiss, P., Braschel, N., Büchsenmeister, R., Freudenschuß, A., Thomas Gschwantner, T., Jandl, R., Ledermann, T., Neumann, M., Pölz, W., Schadauer, K., Schmid, C., Schwarzbauer, P. & Stern, T. 2016. A holistic assessment of greenhouse gas dynamics from forests to the effects of wood products use in Austria. *Carbon Management* 7(5–6): 271–283.
- Briceño-Elizondo, E. Garcia-Gonzalo, J. Peltola, H. Matala, J. & Kellomäki, S. 2006. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions, *Forest Ecology and Management* 232: 152–167.
- Cannell, M.G.R. 1989. Physiological basis of wood production: a review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4: 459–490.
- Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E.M., Elbers, J.A., Erhard, M., Grünwald, T., Kowalski, A.S., Rannik, Ü. & Sprinz, D. 2003. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. *Ecosystems* 6: 168–1184.

- Claesson, S., Duvemo, K., Lundström, A. & Wikberg, P.-E. 2015. Skogliga konsekvensanalyser 2015 – SKA 15. Skogsstyrelsen, Rapport 10–2015.
- Derderian, D.P., Dang, H., Aplet, G.H. & Binkley, D. 2016. Bark beetle effects on a seven-century chronosequence of Engelmann spruce and subalpine fir in Colorado, USA. *Forest Ecology and Management* 361: 154–162.
- Drott, A. 2016. Kunskapsammansättning skogsbruk på torvmark. Skogsstyrelsen. Rapport 3–2016.
- Drössler, L., Nilsson, U. & Lundqvist, L. 2014. Simulated transformation of even-aged Norway spruce stands to multi-layered forests: an experiment to explore the potential of tree size differentiation. *Forestry* 87: 239–248.
- Earth System Research Laboratory. 2020. Monthly Average Mauna Loa CO₂. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Egnell, G. 2011. Is the productivity decline in Norway spruce following whole-tree harvesting in the final felling in boreal Sweden permanent or temporary? *Forest Ecology and Management* 261(1): 148–153.
- Egnell, G. 2017 A review of Nordic trials studying effects of biomass harvest intensity on subsequent forest production. *Forest Ecology and Management* 383: 27–36.
- Egnell, G. & Leijon, B. 1997 Effects of different levels of biomass removal in thinning on short-term production of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. J. Forest Res.* 12: 17–26.
- Egnell, G. & Leijon, B. 1999. Survival and growth of planted seedlings of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* after different levels of biomass removal in clear-felling. *Scand. J. Forest Res.* 14: 303–311.
- Egnell, G. & Ulvcróna, K.A. 2015. Stand productivity following whole-tree harvesting in early thinning of Scots pine stands in Sweden. *Forest Ecology and Management* 340: 40–45.
- Eliasson, P., Svensson, M., Olsson, M. & Ågren, G.I. 2013. Forest carbon balances at the landscape scale investigated with the Q model and the CoupModel - responses to intensified harvests. *Forest Ecology and Management* 290: 67–78.
- Energimyndigheten. 2017. Produktion av oförädlade trädbränslen 2016. ES 2017:09.
- Energimyndigheten. 2018. Energiläget i siffror 2018. <http://www.energimyndigheten.se/nyhetsarkiv/2018/nu-finns-energilaget-i-siffror-20182/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- EPA (Environmental Protection Agency). 2018. Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)
- Eriksson, E., Gustavsson, L., Gillespie, A.R. & Langvall, O. 2007. Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 671–681.
- Ernfors, M., von Arnold, K., Stendahl, J., Olsson, M. & Klemedtsson, L. 2007. Nitrous oxide emissions from drained organic forest soils – an up-scaling based on C:N ratios. *Biogeochemistry* 84(2): 219–231.
- Felton, A., Nilsson, U., Sonesson, J., Felton, A.M., Roberge, J.-M., Ranius, T., Ahlström, M., Bergh, J., Björkman, C., Boberg, J., Drössler, L., Fahlvik, N., Gong, P., Holmström, E., Keskkitalo, E.C.H., Klapwijk, M.J., Laudon, H., Lundmark, T., Niklasson, M., Nordin, A., Pettersson, M., Stenlid, J., Sténs, A. & Wallertz, K. 2016. Replacing monocultures with mixed-species: Ecosystem service implications of two production forest alternatives in Sweden. *Ambio* 45, supplement 2: 124–139.
- Friedlingstein, P. m.fl. 2019. Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* 11: 1783–1838. Tillgänglig på: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Hannerz, M., Nordin, A. & Saksa, T. (redaktörer). 2017. Hyggesfritt skogsbruk. Erfarenheter från Sverige och Finland. *Future Forests. Rapportserie 2017:1*. SLU, Umeå. 74 s.
- Holmgren, P., Gustafsson, E. & Örlander, G. 2019. Södras climateffekt. Södra, Växjö.
- Holtmark, B. 2013. The outcome is in the assumptions: analyzing the effects on atmospheric CO₂ levels of increased use of bioenergy from forest biomass. *Global Change Biology Bioenergy* 5: 467–473.
- Hurmekoski, E., Myllyviita, T., Seppälä, J., Heinonen, E., Kilpeläinen, A., Pukkala, T., Mattila, T., Hetemäki, L., Asikainen, A. & Peltola, H. 2020. Impact of structural

- changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12981>.
- Hyvönen, R. Ågren G.I., Linder, S., Persson, T., Cotrufo, M.F., Ekblad, A., Freeman, M., Grelle A., Janssens I.A., Jarvis P.G., Kellomäki S., Lindroth A., Loustau D., Lundmark, T., Norby, R.J., Oren, R., Pilegaard, K., Ryan, M.G., Sigurdsson, B.D., Strömgren, M., van Oijen, M. & Wallin, G. 2007. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173(3): 463–480.
- Hånell, B. 2009. Möjligheterna till höjning av skogsproduktionen i Sverige genom dikesrensning, dikning och gödsling av torvmarker. Faktaunderlag till MINT-utredningen, bilaga 4. SLU.
- Högberg, P. 2007. Environmental science: nitrogen impacts on forest carbon. *Nature* 447(7146): 781–782.
- Högberg, P., Larsson, S., Lundmark, T., Moen, J., Nilsson, U. & Nordin, A. 2014. Effekter av kvävegödsling på skogsmark. Kunskapssammanställning utförd av SLU på begäran av Skogsstyrelsen. Skogsstyrelsen. Rapport 1–2014.
- IPCC. 2005. IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Climate System. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sroc_full-1.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (red.)]. Cambridge University Press. 996 s.
- IPCC. 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The Physical Science Basis. What is the Greenhouse Effect? https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html. (Hämtad 2020-09-23.)
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (red.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 s. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)
- Jacobsson, S., Pettersson, F., Högbom, L. & Sikström, U. 2005. Skogsgödsling – en handledning från Skogforsk. Skogforsk.
- Jactel, H., Nicoll, B.C., Branco, M., Gonzales-Olabarria, J.M., Grodzki, W., Långström, B., Moreira, F., Netherer, S., Orazio, C., Piou, D., Santos, H., Schelhaas, M.J., Tojic, K. & Vodde, F. 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science* 66(7): 701–701.
- de Jong, J., Akselsson, C., Egnell, G., Löfgren, S. & Olsson, B.A. 2017. Realizing the energy potential of forest biomass in Sweden – How much is environmentally sustainable? *Forest Ecology and Management* 383: 3–16.
- Kasimir, Å., He, H., Coria, J. & Nordén, A. 2018. Land use of drained peatlands: Greenhouse gas fluxes, plant production, and economics. *Global Change Biology* 24: 3302–3316.
- Kilpeläinen, A., Alam, A., Torssonen, P., Ruusuvoori, H., Kellomäki, S. & Peltola, H. 2016. Effects of intensive forest management on net climate impact of energy biomass utilisation from final felling of Norway spruce. *Biomass and Bioenergy* 87(1): 1–8.
- Klemetsson, L., von Arnold, K., Weslien, P. & Gundersen, P. 2005. Soil CN ratio as a scalar parameter to predict nitrous oxide emissions. *Global Change Biology* 11(7): 1142–1147.
- Koca, D., Smith, B. & Sykes, M.T. 2006. Modelling regional climate change effects on Swedish ecosystems. *Climatic Change* 78: 381–406.
- Lal, R. 2010. Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. *BioScience* 60: 708–721.
- Lamlom, S.H. & Savidge, R.A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25: 381–388.

- Leskinen, P., Cardellini, G., González-García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., Smyth, C., Stern, T. & Verkerk, P.J. 2018. Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy 7. European Forest Institute.
- Linder, S. & Bergh, J. 1996. Näringsoptimering – granen växer ur produktionstabellerna. SLU. Fakta Skog nr 4–1996.
- Lindroth, A., Grelle, A. & Morén, A.-S. 1998. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biology* 4: 443–450.
- Lundmark, T. 2017. Hyggesfritt skogsbruk och klimatet. I: Hyggesfritt skogsbruk. Erfarenheter från Sverige och Finland. Future Forests. Rapportserie 2017:1. SLU, Umeå. s. 71–74.
- Lundmark, T., Bergh, J., Hofer, P., Lundström, A., Nordin, A., Poudel, B.C., Sathre, R., Taverna, R. & Werner, F. 2014. Potential Roles of Swedish Forestry in the Context of Climate Change Mitigation. *Forests* 5: 557–578.
- Lundmark, T., Bergh, J., Nordin, A., Fahlvik, N. & Poudel, B.C. 2016. Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden. *Ambio* 45: 203–213.
- Lundmark, T., Poudel, B. C., Ståhl, G., Nordin, A. & Sonesson, J. 2018. Carbon balance in production forestry in relation to rotation length. *Canadian Journal of Forest Research* 48(6): 672–678.
- Lundqvist, L. 2017. Tamm Review: Selection System Reduces Long-term Volume Growth In Fennoscandic Uneven-aged Norway Spruce Forests. *Forest Ecology and Management* 39: 362–375.
- Lundqvist, L., Cedergren, J. & Eliasson, L. 2014. Blådningsbruk. Skogsskötselserien, kapitel 11. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- Lundqvist, L., Lindroos, O., Hallsby, G. & Fries, C. 2014. Slutavverkning. Skogsskötselserien, kapitel 20. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- Madsen, K. & Bentsen, N.S. 2017. Carbon debt and payback time – Lost in the forest? *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 73: 1211–1217.
- Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Gudmundsson, J., Oskarsson, H., Huttunen, J.T. & Martikainen, P.J. 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. *Biogeosciences* 7(9): 2711–2738.
- Melin, Y. 2014. Impacts of stumps and roots on carbon storage and bioenergy use in a climate change context. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* 2014:79.
- Melin, Y., Petersson, H. & Nordfjell, T. 2009. Decomposition of stump and root systems of Norway spruce in Sweden – A modelling approach. *Forest Ecology and Management* 257(5): 1445–1451.
- Mjöfors, K., Strömberg, M., Nohrstedt, H.Ö., Johansson, M.B. & Gärdenäs, A.I. 2017. Indications that site preparation increases forest ecosystem carbon stocks in the long term. *Scand. J. Forest Res.* 32: 117–125.
- Naturvårdsverket. 2019. Sveriges officiella statistik. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag/>
<https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/sveriges-officiella-statistik/-utslapp/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Naturvårdsverket. 2020. Konsumtionsbaserade växthusgasutsläpp per person och år. <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-per-person/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Naturvårdsverket. 2020. Skogen är en ovärderlig resurs för klimatet. <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhället/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Klimat/Klimatneutralt-Sverige/Skogen/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Naturvårdsverket. 2020. Territoriella utsläpp och upptag av växthusgaser. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Nilsen, P. & Strand, L.T. 2013. Carbon stores and fluxes in even- and uneven-aged Norway spruce stands. *Silva Fennica* 47(4), artikel-id 1024. 15 s.
- Nilsson, T., Stendahl, J. & Löfgren, O. 2015. Markförhållanden i svensk skogsmark – data från Markinventeringen 1993–2002. SLU, inst. för mark och miljö. Rapport 19.

- Nilsson, U., Fahlvik, N., Johansson, U., Lundström, A., & Rosvall, O. 2011. Simulation of the effect of intensive forest management on forest production in Sweden. *Forests* 2(1): 373–393.
- Nordin, A., Bergström, A.-K., Granberg, G., Grip, H., Gustafsson, D., Gärdenäs, A., Hyvönen-Olsson, R., Jansson, P.-E., Laudon, H., Nilsson, M.B., Svensson, M. & Öquist, M. 2009. Effekter av ett intensivare skogsbruk på skogslandskapet mark, vatten och växthusgaser. Faktaunderlag 63 till MINT-utredningen. SLU.
- Norgren, O. 1995. Growth differences between *Pinus sylvestris* and *Pinus contorta*. SLU, inst. för skogsskötsel. Doktorsavhandling. ISBN 91-576-5003-9.
- Normark, E. & Fries, C. 2019. Skogsskötsel med nya möjligheter. Skogsstyrelsen. Rapport 19/2019.
- Noormets, A., Epron, D., Domec, J.C., McNulty, S.G., Fox, T., Sun, G. & King, J.S. 2015. Effects of forest management on productivity and carbon sequestration: A review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*. 355: 124–140.
- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2013 The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208.
- Ortiz, C.A., Lundblad, M., Lundström, A. & Stendahl, J. 2014 The effect of increased extraction of forest harvest residues on soil organic carbon accumulation in Sweden. *Biomass & Bioenergy* 70: 230–238.
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., Lundström, A. & Mäkipää, R. 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management* 270: 78–84.
- Poudel, B.C., Sathre, R., Bergh, J., Gustavsson, L., Lundström, A. & Hyvönen, R. 2012. Potential effects of intensive forestry on biomass production and total carbon balance in north-central Sweden, *Environmental Science & Policy* 15(1): 106–124.
- Repo, A., Känkänen, R., Tuovinen, J.-P., Antikainen, R., Tuomi, M., Vanhala, P. & Liski, J. 2012. Forest bioenergy climate impact can be improved by allocating forest residue removal. *Global Change Biology Bioenergy* 4(2): 202–212.
- Rikstermbanken. 2019. Rikstermbanken.
<http://www.rikstermbanken.se/visaTermpost.html?id=57642>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Rosvall, O. 2016. Betydelsen av förädlade träd i skogsbruket. I: Skogsträdsförädling. Skogsskötselserien, kapitel 19, s. 6–31. Tillgänglig på:
www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- Routa, J., Kellomäki, S. & Strandman, H. 2012. Effects of Forest Management on Total Biomass Production and CO₂ Emissions from use of Energy Biomass of Norway Spruce and Scots Pine. *BioEnergy Research* 5(3): 733–747.
- Rytter, L., Andreassen, K., Bergh, J., Ekö, P.M., Gronholm, T., Kilpeläinen, A., Lazdina, D., Muiste, P. & Nord-Larsen, T. 2015. Availability of Biomass for Energy Purposes in Nordic and Baltic Countries: Land Areas and Biomass Amounts. *Baltic Forestry* 21: 375–390.
- Sathre, R. & O’Connor, J. 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy* 13(2): 104–114.
- Sathre, R., Gustavsson, L. & Bergh, J. 2010. Primary energy and greenhouse gas implications of increasing biomass production through forest fertilization. *Biomass and Bioenergy* 34: 572–581.
- Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Hiederer, R. & Kapos, V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* 5:1: 81–91.
- Skogsdata 2020. SLU, inst. för skoglig resurshushållning. Tillgänglig på:
https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/rt/dokument/skogsdata/skogsdata_2020_webb.pdf.
- Skogsindustrierna. 2020. El och energi.
<https://www.skogsindustrierna.se/skogsindustrin/branschstatistik/el-och-energi/>
(Hämtad 2020-09-23.)
- Skogsindustrierna. 2020. Återvinning och cirkulär ekonomi.
<https://www.skogsindustrierna.se/om-skogsindustrin/branschstatistik/atervinning-cirkular-ekonomi/> (Hämtad 2020-09-23.)

- Skogsstyrelsen. 2020. Skogsvårdslagstiftningen. Gällande regler 1 april 2020. Tillgänglig på: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/lag-och-tillsyn/skogsvardslagen/skogsvardslagstiftningen-20202.pdf> (Hämtad 2020-09-23.)
- SMHI. 2013. Torka. Faktablad nr 16.
https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.63591/faktablad_torka%5B1%5D.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)
- Statistiska Centralbyrån. 2020. Kvartalsvis bränslestatistik, 4:e kvartalet 2018 samt året 2019. Statistiska meddelanden EN 31 SM 2001.
- Statistiska Centralbyrån. 2020. Total tillförd och återvunnen mängd förpackningar uppdelat efter förpackningsslag. År 2012–2018.
https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__MI__MI0307/MI0307T1/ (Hämtad 2020-09-23.)
- Statistiska Centralbyrån. 2020. Utsläpp av växthusgaser i Sverige.
<https://www.scb.se/hitta-statistik/sverige-i-siffror/miljo/utslapp-av-vaxthusgaser-i-sverigeut/>. (Hämtad 2020-09-23.)
- Stendahl, J., Johansson, M.-B., Eriksson, E., Nilsson, Å. & Langvall, O. 2010. Soil organic carbon in Swedish spruce and pine forests – differences in stock levels and regional patterns. *Silva Fennica* 44(1): 5–21.
- Stendahl, J. 2017. Tema: Skogsmarkens kolförråd. I: Skogsdata 2017. Aktuella uppgifter om de svenska skogarna från Riksskogstaxeringen. s. 14–23. SLU, inst. för skogshushållning. Umeå.
- Stendahl, J., Repo, A., Hammar, T. & Liski, J. 2017. Climate impact assessments of forest bioenergy affected by decomposition modelling – comparison of the Q and Yasso models. IEA Bioenergy: Task 43: EXCO2017-03.
- Strömberg, M., Mjöfors, K. & Olsson, B.A. 2017. Soil-surface CO₂ flux during the first 2 years after stump harvesting and site preparation in 14 Swedish forests. *Scand. J. Forest Res.* 32: 213–221.
- Ståhl, E. & Bergh, J. 2013. Produktionshöjande åtgärder. Skogsskötselserien, kapitel 16. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- Sängstuvall, L., Bergström, D., Lämås, T. & Nordfjell, T. 2012. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scand. J. Forest Res.* 27(1): 56–73.
- Tamm, C.O. 1991. Nitrogen in Terrestrial Ecosystems: Questions of Productivity, Vegetational Changes, and Ecosystem Stability. I: *Ecological Studies Analysis and Synthesis* (Ecological Studies, 81). New York: Springer-Verlag s. XII+115P.
- United Nations Climate Change. 2020. Harvested Wood Products.
<https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use-land-use-change-and-forestry-lulucf/harvested-wood-products-1>. (Hämtad 2020-09-23.)
- United Nations. Climate Change. 2020. Sweden. 2020 National Inventory Report (NIR).
<https://unfccc.int/documents/224123> (Hämtad 2020-09-23.)
- Vägen till en klimatpositiv framtid. 2020. Betänkande av Klimatpolitiska vägvalsutredningen. SOU 2020:4. Statens offentliga utredningar. Stockholm.
- Wallin G., Linder S., Lindroth A., Rantfors M., Flemberg S. & Grelle A. 2001. Carbon dioxide exchange in Norway spruce at the shoot, tree and ecosystem scale. *Tree Physiology* 21: 969–976.
- Witzell, J. m.fl. 2017. Skogsskötselserien, Skador på skog, del 1 och 2. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.
- WWF och Naturskyddsföreningen. 2011. Hugga eller skydda? Boreala skogar i klimatperspektiv. Tillgänglig på: <https://docplayer.se/3593801-Utgiven-i-samarbetemellan-boreala-skogar-i-klimatperspektiv-hugga-eller-skydda.html>. (Hämtad 2020-09-23.)

Bilaga 1: Vad påverkar jordens klimat?

Balansen mellan energiinnehållet i den kortvågiga solinstrålningen och den mer långvågiga strålning som jorden reflekterar påverkar det globala temperaturklimatet. Människans utsläpp av koldioxid minskar denna reflektion och är det som betytt mest för den pågående globala uppvärmningen och därmed klimatförändringen. Eftersom trädens biomassa byggs upp av koldioxid är det viktigt på vilket sätt människan handskas med världens skogar.

Klimat är ett centralt begrepp i detta kapitel av Skogsskötselserien. En definition av begreppet klimat är ”atmosfärens genomsnittstillstånd uttryckt genom medeltal och frekvenser för en viss plats eller inom ett visst område under en given tidrymd”.¹⁴³ En meteorolog är inriktad på tidsperioder på timmar, dagar och veckor, medan en klimatolog är intresserad av perioder på flera årtionden.

Viktiga klimatvariabler är temperatur, nederbörd, lufttryck, vind, luftfuktighet och atmosfäriska partiklar. Inom klimatologin är man inte bara intresserad av genomsnittsvärden utan också av extremvärden, som till exempel extremt höga temperaturer, starka vindar eller stor nederbörd under kort tid.

Växthuseffekten möjliggör liv på jorden

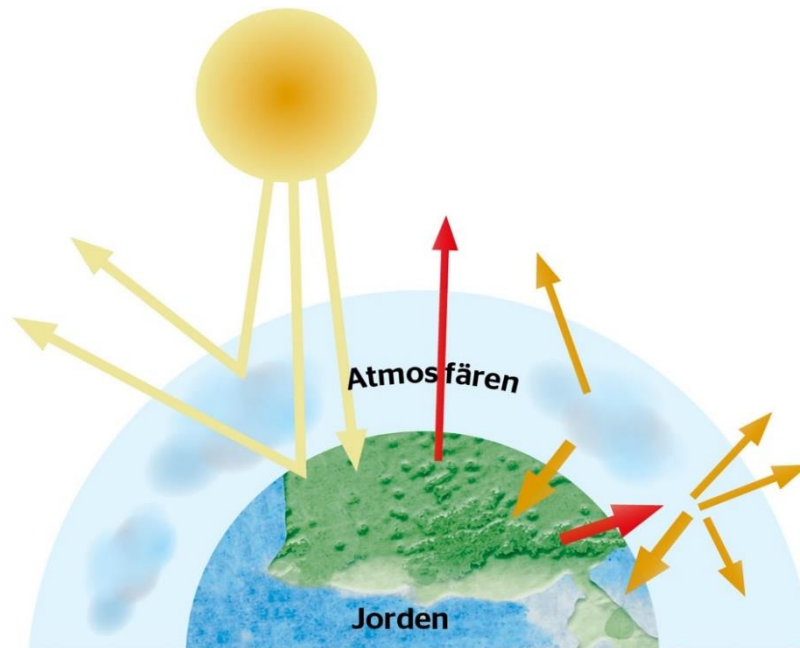
Jordens atmosfär består till 99 % av kväve (N) och syre (O). De är båda relativt genomsläppliga för den kortvågiga solinstrålningen. En del av den energi från solen som tillförs jordytan (land och hav) reflekteras i form av långvågig värmestrålning. Hur mycket som reflekteras beror på det reflekterade materialets albedo.¹⁴⁴

Kväve och syre är i stort sett ”genomskinliga” för värmestrålning. Atmosfärens vattenånga (H₂O), koldioxid (CO₂) och andra växthusgaser fångar däremot upp den mesta värmestrålningen som reflekteras från jordytan så den inte direkt kan stråla ut i rymden. En del av den uppfångade strålningen kommer på det sättet tillbaka och värmer de lägre delarna av atmosfären och jordytan. Vattenången och koldioxiden fungerar ungefär som väggar och tak på ett växthus och höjer temperaturen på jorden vilket också är orsaken till att det brukar kallas för växthusgaser (figur SK25).

¹⁴³ Rikstermbanken. 2019. Rikstermbanken.

<http://www.rikstermbanken.se/visaTermpost.html?id=57642>. (Hämtat 2020-09-23.)

¹⁴⁴ Albedo är den andel av en strålning som återkastas av en belyst yta eller en kropp. 1,00 albedo betyder att allt ljus reflekteras och 0,00 albedo betyder att inget ljus reflekteras. Till exempel har snö och is betydligt högre albedo än skog.



Figur SK25 Solen driver jordens klimat genom att tillföra kortvågig strålningsenergi (ljusgula pilar), främst i den synliga delen av spektrumet. Av den solenergi som når atmosfären reflekteras ungefär en tredjedel direkt tillbaka till rymden (ljusgula pilar som pekar ut från jorden). De återstående två tredjedelarna tränger ner genom atmosfären och absorberas både av jordytan och av atmosfären där den reflekteras i olika riktningar av växthusgasmolekyler och moln (orangea pilar). För att balansera den inkommande solenergin till jorden skulle samma mängd energi behöva reflekteras tillbaka till rymden (röda pilar). Men eftersom jorden är kallare än solen reflekteras den inkommande energin i form av långvågig värmestrålning (röda pilar) med egenskapen att till stor del absorberas av atmosfären och reflekteras tillbaka och värmer upp jorden (orangea pilar). Det är detta som kallas växthuseffekten. Källa: IPCC (2007).¹⁴⁵

Medeltemperaturen vid jordytan är idag nästan +15 °C. Utan växthuseffekten skulle den varit omkring –19 °C. Det är atmosfärens vattenånga som huvudsakligen bidrar till denna temperatureffekt. Eftersom atmosfären alltid innehållit växthusgaser ska växthuseffekten ses som ett naturligt fenomen. Människans användning av fossila material och ändrad markanvändning genom bland annat avskogning har dock förstärkt växthuseffekten och anses vara huvudorsaken till senare decenniernas globala uppvärmning.¹⁴⁶

Också aerosoler, små partiklar finfördelade i gas, bidrar till växthuseffekten genom att de reflekterar tillbaka delar av värmestrålningen från jorden.

¹⁴⁵ IPCC. 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The Physical Science Basis. What is the Greenhouse Effect? https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html. (Hämtad 2020-09-23.)

¹⁴⁶ IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)

Kraftiga vulkanutbrott kan fylla atmosfären med stora mängder stoft som tillfälligt sänker jordens medeltemperatur.

När någon i dagligt tal beskriver den pågående globala uppvärmningen som ”ett resultat av växthuseffekten” menar hen därför i allmänhet att den beror på en antropogen (av människan orsakad) förstärkning av den redan befintliga växthuseffekten.

Även om atmosfärens vattenånga bidrar starkt till växthuseffekten bör den inte räknas bland de antropogent genererade växthusgaserna. Orsaken är att halten vattenånga huvudsakligen ändras som en effekt av ändrat temperaturklimat. En liten höjning i temperatur som ett resultat av ökad koldioxidhalt gör att mer vattenånga kan finnas i luften, vilket i sin tur leder till ytterligare ökad temperatur. Växthuseffekten förstärks alltså genom ökad mängd vattenånga i atmosfären som en följd av att koldioxid och andra växthusgaser ökar.

Men ökad vattenhalt i atmosfären leder också till ökad molnbildning. Det minskar instrålningen och därmed växthuseffekten. Ökade vattenmängder i atmosfären både ökar och minskar därför växthuseffekten. Hur molnbildningen kommer att förändras är en av de största osäkerheterna i de klimatmodeller som används idag.

Koldioxid viktigast bland antropogena växthusgaser

Koldioxid är den växthusgas förutom vattenånga som bidrar klart mest till växthuseffekten, mer än de här nedan uppräknade växthusgaserna tillsammans (se faktaruta om växthusgasernas styrka). Som ett resultat av förbränning av fossila bränslen har halten av koldioxid i atmosfären ökat markant sedan 1800-talet. Även vid tillverkning av cement (ingrediens i betong) frigörs koldioxid till atmosfären. Globalt släpper cementtillverkning ut omkring 4 % koldioxid jämfört med utsläppen från förbränning av fossila bränslen.¹⁴⁷

Metan (CH₄) är en stark växthusgas som bildas vid syrefri nedbrytning av organiskt material. Under svenska förhållanden kan avgången därför ofta vara hög från odikad torvmark men låg eller obefintlig från dikad torvmark.¹⁴⁸ Även boskap avger betydande mängder metan. Metan räknas dock inte till de långlivade växthusgaserna då dess livslängd i atmosfären är omkring 8 år.

Lustgas (N₂O) är också en stark växthusgas. Den framställs syntetiskt men når också ut i miljön från naturliga källor. Utsläpp kommer från kemisk industri, framställning och bearbetning av papper och trä, energisektorn, avfallshantering och avloppsrening. Lustgas avges även från dikade torvmarker, särskilt om de är uppbyggda av kväverika material (låg kol/kväve-kvot).

Andra mycket kraftfulla växthusgaser är halokarboner (CFC och HCFC). De flesta är inte naturliga utan framställs av människan. De har inte bara stor effekt som växthusgaser utan bryter också ner ozon. Produktion och

¹⁴⁷ Andrew, R.A. 2018. Global CO₂ emissions from cement production. Earth Syst. Sci. Data 10: 195–217.

¹⁴⁸ Drott, A. 2016. Kunskapssammanställning skogsbruk på torvmark. Skogsstyrelsen. Rapport 3–2016.

användning av halokarboner minskar dock och en avveckling är reglerad genom flera internationella avtal. Om avtalen följs kommer en del CFC-gaser att sakta försvinna ur atmosfären.

Växthusgasernas styrka och bidrag till växthuseffekten

De olika växthusgaserna påverkar klimatet olika mycket. Det uttrycks i global uppvärmningspotential (Global Warming Potential, GWP), där koldioxid har värdet 1, metan 28, lustgas 265 och de olika halokarbonerna (CFC och HCFC) har värden mellan 5 000 och 14 000.¹⁴⁹

Koldioxid är betydligt mindre kraftfull än övriga växthusgaser, men eftersom koldioxid släpps ut och förekommer i så stora mängder i atmosfären blir den viktigast ur klimatpåverkanssynpunkt och står för cirka 75 % av den totala antropogena växthusgaseffekten, medan metan står för 16 %, lustgas för 6 % och halokarbonerna för 2 %.¹⁵⁰

Observera att GWP-värdena kan skilja sig åt i olika källor. Det beror bland annat på att uppvärmningspotentialen kan anges med olika tidshorisonter. Det vanligaste GWP-värdet är givet över 100 år = GWP₁₀₀.

GWP-värdet används för att räkna fram det totala utsläppet av växthusgaser då det redovisas som koldioxidekvivalenter.

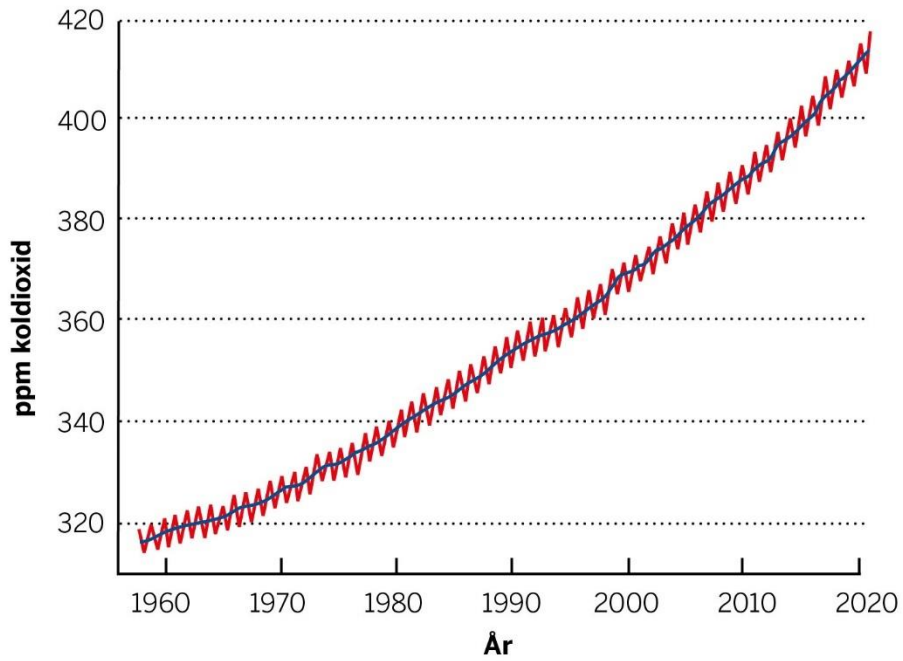
Eftersom koldioxidutsläppen bidrar mest till växthuseffekten av växthusgaserna är det extra viktigt att känna till utvecklingen av koldioxidhalten i atmosfären, varifrån koldioxiden kommer, den totala globala mängden koldioxid och vilka möjligheter det finns att påverka utsläppen.

I slutet av 1800-talet var koldioxidhalten i atmosfären cirka 280 ppm (parts per million, miljondelar). Industrialiseringen har medfört en ökad användning av fossila bränslen och en sakta ökning av koldioxidhalten kunde påvisas i början av 1900-talet. I takt med den industriella utvecklingen, ökningen av människans materiella levnadsstandard, ökat resande och den globala befolkningsökningen har koldioxidhalten ökat allt snabbare.

Under 2019 översteg koldioxidhalten 410 ppm vid observatoriet i Mauna Loa, Hawaii, där också den längsta mätserien finns. Mätserien visar att koldioxidhalten i atmosfären ökat för varje år sedan 1960 (figur SK26).

¹⁴⁹ IPCC. 2005. IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Climate System. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sroc_full-1.pdf. (Hämtad 2020-09-23.)

¹⁵⁰ Earth System Research Laboratory. 2020. Monthly Average Mauna Loa CO₂. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. (Hämtad 2020-09-23.)



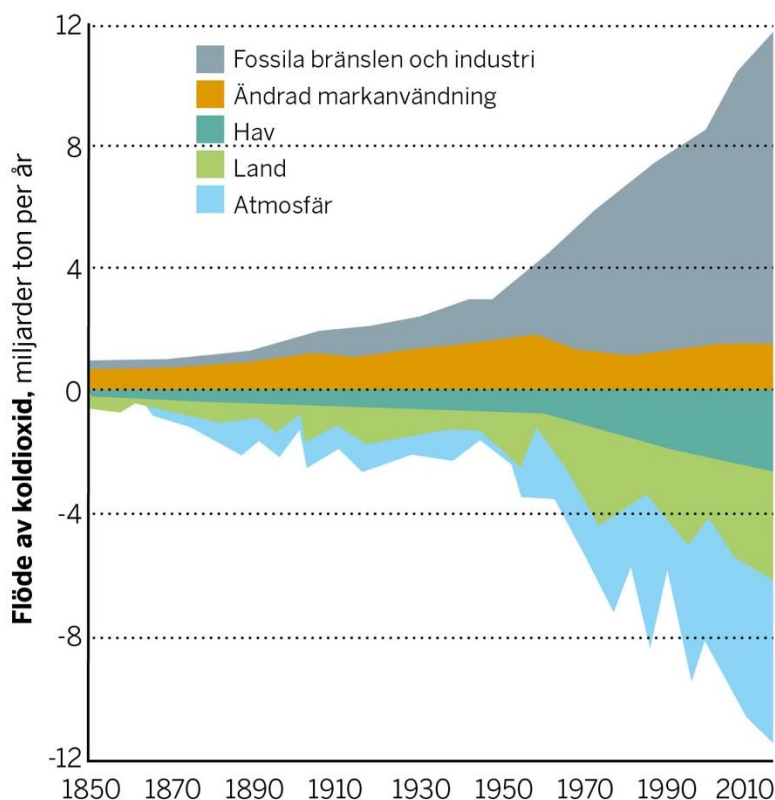
Figur SK26 Koldioxidhalten i atmosfären uppmätt vid Mauna Loa-observatoriet på Hawaii från år 1958 fram till september 2018. Den minskning i koldioxidhalt som varje år syns som nedåtgående hack i kurvan beror på det betydande upptaget av koldioxid under sommarhalvåret till stor del genom tillväxt i norra halvklottets skogar. Källa: ESRL (2019).¹⁵¹

¹⁵¹ Earth System Research Laboratory. 2019. Monthly Average Mauna Loa CO₂. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. <https://esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. (Hämtad 2020-09-23.)

Bilaga 2: Fossil förbränning största koldioxidkällan

Fram till omkring 1950 har förändrad markanvändning varit det största bidraget till de globala utsläppen av koldioxid, framförallt genom att kolrika skogar och torvmarker omvandlats till jordbruksmark. Därefter har förbränning av fossila bränslen ökat kraftigt och är sedan flera decennier den helt dominerande utsläppskällan.

Förbränningen av fossila bränslen har stigit i takt med ökade transporter, ökad varuproduktion och en växande befolkning i världen och står idag för mer än 80 % av det totala utsläppet av koldioxid (figur SK27). Även cementindustrin står för en del av koldioxidutsläppen, där processen är energikrävande och koldioxid avgår vid framställningen. Problemet med fossilanvändning och tillverkning av cement är att ny koldioxid tillförs till atmosfären, koldioxid som tidigare inte befunnit sig i det biogena kretsloppet. Landekosystemen, haven och atmosfären tar upp den frigjorda koldioxiden, det vill säga de utgör sänkor för koldioxiden. Nära hälften av upptaget sker i atmosfären.



Figur SK27 Källor för koldioxidutsläpp (positiva värden i diagrammet) och koldioxidupptagets fördelning mellan upptag i atmosfären, på land och i hav (negativa värden i diagrammet) för perioden 1870–2018, uttryckt som Gton (gigaton, miljarder ton) kol per år. Källa: Global Carbon Budget 2019.¹⁵²

¹⁵² Friedlingstein, P. m.fl. 2019. Global Carbon Budget 2019. Earth Syst. Sci. Data 11: 1783–1838. Tillgänglig på: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.

Källorna till koldioxidutsläppen är förbränning av fossila bränslen och tillverkning av cement, som globalt år 2018 beräknas ha stått för sammanlagt cirka 37 Gton (gigaton, miljarder ton) koldioxid, medan cirka 5 Gton härrör från förändrad markanvändning. Detta blir totalt cirka 42 Gton. Av dessa 42 Gton beräknas 13 Gton (cirka 30 %) tagits upp av vegetation (i första hand skog), 10 Gton (cirka 23 %) av haven och 19 Gton (cirka 44 %) av atmosfären.¹⁵³

I denna kolbalans kvarstår ytterligare 3 % eller 1 Gton koldioxid, vilka man med de metoder man använt inte funnit någon sänka för. Detta kan naturligt bero på osäkerheter då man skalar upp mätdata till att gälla för hela jorden med omgivande atmosfär.

Det globala kolets fördelning

Av det globala kolförrådet som skattas till drygt 50 000 Gton finns den största mängden i världshaven (77 %), därefter återfinns 15 % långtidslagrat i fossila bränslen (kol, naturgas och olja), 5 % i marken, drygt 1 % i levande biomassa och 1,5 % i atmosfären.¹⁵⁴

De globala proportionerna är intressanta då de visar hur stor andel av kol lagret som återfinns i fossila bränslen i förhållanden till det kol som finns i världens skogar och annan vegetation. Att använda de fossila kollagren fullt ut skulle innebära en total tillförsel av tre gånger så mycket kol som finns i vegetation och mark globalt sett. Detta ger perspektiv på förutsättningarna att motverka klimatförändringen med hjälp av ökad kolinlagring i vegetation och mark.

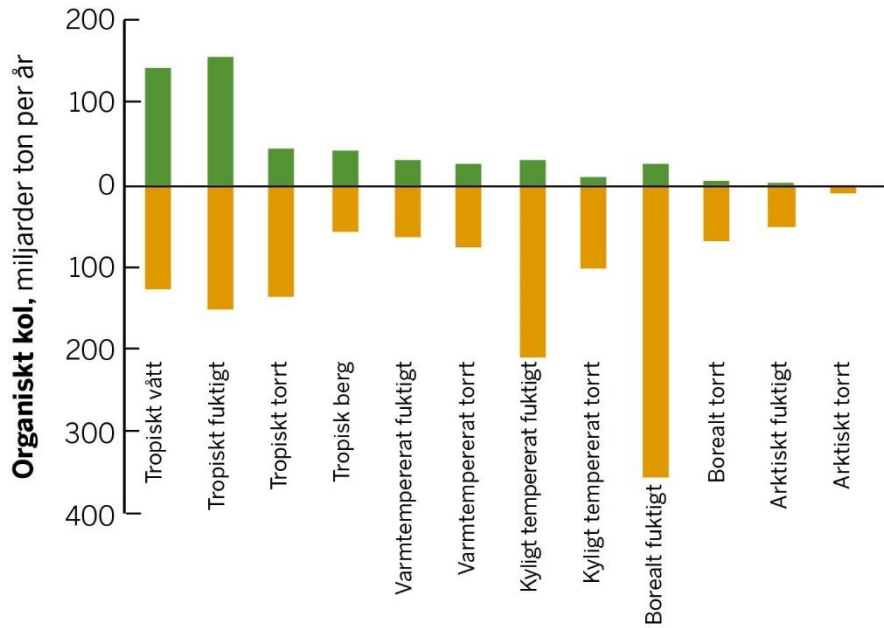
Fördelningen mellan hur mycket kol som finns i biomassa ovan jord i förhållanden till mängden kol i marken är olika i olika klimatområden och beroende på markfuktighet. I tropiska områden är skillnaden i kolförråd ovan och under mark ganska liten. Skillnaden växer när man förflyttar sig mot kallare klimat med en allt större andel av kolet lagrat i marken, inte minst på fuktiga marker (figur SK28). De största mängderna levande biomassa finns i våta och fuktiga tropiska klimatområden.

Totalt sett stora kolförråd finns på nordliga breddgrader där det också finns stora arealer med torvmarker, särskilt i de norra permafrostregionerna (ingår i "boreal fuktig" i figur SK28) som är en av de regioner som förväntas bli mest utsatta för klimatförändringar.

Hur skogsmarker och torvmarker i den boreala zonen (där huvuddelen av Sverige är beläget) används av människan eller påverkas direkt och indirekt genom klimatförändringen, har stor betydelse för hur jordens kolförråd fördelar sig mellan kol upplagrat i mark och vegetation respektive som koldioxid i atmosfären.

¹⁵³ Friedlingstein, P. m.fl. 2019. Global Carbon Budget 2019. Earth Syst. Sci. Data 11: 1783–1838. Tillgänglig på: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.

¹⁵⁴ Lal, R. 2010. Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. BioScience 60: 708–721.



Figur SK28 Globalt kolförråd i mark ner till 1 m djup (orange) och i levande biomassa ovan och under jord (grönt) inom olika klimatområden så som de definierats av IPCC (översatt till svenska). Källa: Scharlemann m.fl. (2014).¹⁵⁵

¹⁵⁵ Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Hiederer, R. & Kapos, V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. Carbon Management 5:1: 81–91.

Bilaga 3: Rapportering av skogens kolbalans och växthusgasbalanser i Sverige

Inom ramen för FN:s klimatkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)), rapporterar Sverige genom Naturvårdsverket årligen upptag och utsläpp av växthusgaser.¹⁵⁶ För den svenska skogens del görs detta för ”Förändrad markanvändning och skogsbruk”, inom ramen för den så kallade LULUCF-förordningen (Land Use, Land-Use Change and Forestry).

Rapporteringen avser hela landets skogsmark enligt den vidare FAO-definitionen (cirka 28 miljoner hektar) och omfattar följande delar:

- Kolpoolsförändringen i hela biomassan av levande träd som uppnått en höjd av minst 1,3 meter. Mindre träd och övrig vegetation ingår inte.
- Kolpoolsförändringen i dött organiskt material, vilket omfattar död ved och färsk förna.
- Kolpoolsförändringen i skogsmarkens organiska horisont, vilket omfattar äldre förna, humus och eventuellt torvlager.
- Kolpoolsförändringen 50 centimeter ner i mineraljorden.
- Kolpoolsförändringen i skogsprodukter (sågade trävaror, panelvirke och pappersprodukter). Energiveden, vilken står för ungefär hälften av den avverkade volymen, anses förbränd direkt i samband med avverkning och ingår inte i någon kolpool. Detta är skälet till att energisektorn inte rapporterar något utsläpp av växthusgaser vid förbränning av skogsbränsle då detta skulle resultera i dubbel bokföring. Cirka 80 % av skogsprodukterna exporteras till andra länder.
- Övriga emissioner, vilket bland annat omfattar lustgasemissioner (N₂O) orsakade av skogsmarksgödsling, lustgas- och metanemissioner (CH₄) orsakade av dikning och återvätning av torvmarker, samt emissioner orsakade av skogsbränder.

Sammantaget landade den svenska rapporteringen för skogsmark på ett upptag motsvarande 43 miljoner ton CO₂e år 2017 med det största upptaget på 37 miljoner ton CO₂e i levande träd. Till detta kan sedan läggas en kolpoolsökning i träprodukter motsvarande ett upptag på 6,7 miljoner ton CO₂e.

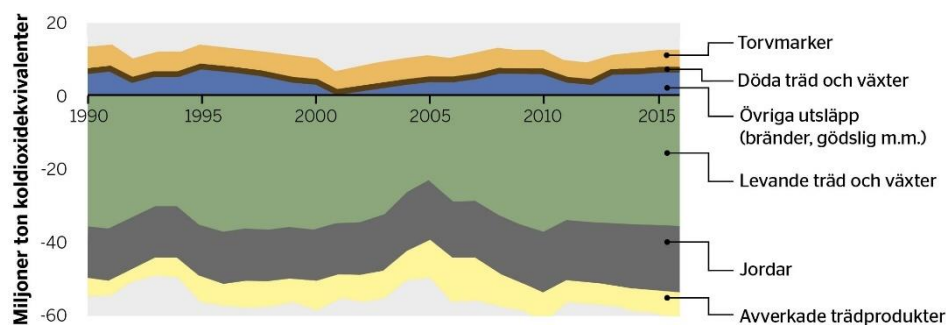
Förutsättningarna för framtida rapportering inom LULUCF kommer också att påverkas av EU:s klimatravverk 2030. Dessa förändringar kommer att påverka rapporteringen från och med år 2021. Förutsättningarna för svensk del är i skrivande stund (september 2020) inte helt klara då det fortfarande pågår förhandlingar.

¹⁵⁶ United Nations. Climate Change. 2020. Sweden. 2020 National Inventory Report (NIR). <https://unfccc.int/documents/224123> (Hämtad 2020-09-23.)

Den svenska skogens växthusgasbalans

I Sverige redovisar Naturvårdsverket årligen utsläpp och upptag av växthusgaser i landets skogar. Under perioden 1990–2016 var nettoupptaget av koldioxid i skogen inklusive inbindning av koldioxid i ett ökat lager av skogsprodukter från avverkade träd i medeltal cirka 45 miljoner ton per år (figur SK29). Det mesta av lagerökningen var i trädbiomassan, cirka 34 miljoner ton, medan ökningen av kolförrådet i marken var cirka 15 miljoner ton. Produkter från avverkade träd (Harvested Wood Products¹⁵⁷) har nettoinbundit cirka 7 miljoner ton per år.

Markutsläpp av växthusgaser från torvmarker skattas i medeltal under perioden till cirka 5,3 miljoner ton per år (koldioxidekvivalenter), nedbrytning av döda träd och växter till cirka 4,5 miljoner ton per år och övriga utsläpp från skogsmarker (vid gödsling, dränering, bränder med mera) till cirka 1,4 miljoner ton per år.



Figur SK29 Utsläpp och upptag av växthusgaser i svensk skog under perioden 1990–2016. Diagrammets fält under noll-linjen beskriver upptag och inbindning av koldioxid. Fält över noll-linjen beskriver utsläpp av växthusgaser (främst koldioxid). Miljoner koldioxidekvivalenter. Källa: Naturvårdsverket.¹⁵⁸

Skogsbrukets totala koldioxidutsläpp genom *förbränning av diesel och bensen*, inklusive vidaretransporten av skogsråvara till industri, kraftvärmeverk, med mera, uppgår till knappt 1 miljon ton per år (se avsnittet *Skogsbrukets och skogsindustrins koldioxidbalans*).

Den svenska skogens totala kolbalans, beräknad med ovan angivna data, resulterar i en klimatnytta på i medeltal omkring 44 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år för perioden 1990–2016.¹⁵⁹

I sammanhanget kan anges att Sveriges bruttoutsläpp av växthusgaser på 2018 års nivå var cirka 52 miljoner ton koldioxidekvivalenter per år (se nedan). Utöver det ökande kollagret i skogen samt i byggnader och träkonstruktioner ska läggas skogens klimatnytta i form av substitutions-effekter som innebär undvikna utsläpp av koldioxid, till exempel i transport- och byggsektorn.

¹⁵⁷ Harvested Wood Products (HWP) inkluderar trä- och pappersprodukter och definieras av IPCC:s riktlinjer för nationella växthusgasinventeringar: United Nations Climate Change. 2020. Harvested Wood Products. <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use-land-use-change-and-forestry-lulucf/harvested-wood-products-1>. (Hämtad 2020-09-23.)

¹⁵⁸ Naturvårdsverket. 2020. Skogen är en ovärderlig resurs för klimatet. <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Klimat/Klimatneutralt-Sverige/Skogen/>. (Hämtad 2020-09-23.)

¹⁵⁹ Beräkning: $34+15+7-5,5-4,5-1,5 \approx 44$ miljoner ton CO₂e.

Definieras klimatnytta på det sätt som görs i detta kapitel bidrar varje avverkad kubikmeter med undvikna utsläpp mellan cirka 500–800 kg koldioxid, beroende på hur råvaran används.¹⁶⁰ På nationell nivå motsvarar det 40–60 miljoner ton lägre koldioxidutsläpp än vad som annars skulle vara fallet, det vill säga en mängd av samma storlek som Sveriges bruttoutsläpp 2016 uttryckt i koldioxidekvivalenter. En del av denna klimatnytta bokförs i länder som importerar våra skogsprodukter.

Sveriges totala växthusgasbalans

Naturvårdsverket redovisar också uppgifter om Sveriges totala utsläpp av växthusgaser.¹⁶¹ Sveriges klimatpåverkande utsläpp (utsläpp av växthusgaser exklusive upptag av koldioxid) var 51,8 miljoner ton år 2018. Jämfört med 2017 är det en minskning med 1,8 %. Utsläppen har minskat med 27 % mellan åren 1990 och 2018.

Den långsiktiga utsläppsminskningen har framförallt skett mellan år 2003 och 2014. Minskningen kan delvis förklaras av genomförda åtgärder, till exempel övergång till förnybar energi och energieffektivisering, delvis av avstannad tillväxt inom industrin.

De åtgärder som har påverkat utsläppsutvecklingen har genomförts under en längre tid och påbörjades till viss del redan före år 1990. Det handlar bland annat om:

- en utbyggnad av koldioxidfri elproduktion (vattenkraft och kärnkraft samt på senare år biokraft, vindkraft och solkraft),
- en utbyggnad av fjärrvärmenäten och den följande övergången från oljeeldade värmepannor till både el och fjärrvärme,
- en större användning av biobränslen och avfallsbränslen inom el- och fjärrvärmeproduktionen,
- bränsleskiften inom industrin,
- minskad deponering av avfall.

Bortsett från effekter av ändrad markanvändning utgör Sveriges utsläpp av koldioxid cirka 0,15 % (57,5 miljoner ton dividerat med 37 miljarder ton) av de globala utsläppen.

Import till Sverige av varor och tjänster innebär utsläpp i andra länder. Hushållens och offentlig konsumtion samt offentliga investeringar ledde år 2016 till utsläpp på cirka 101 miljoner ton koldioxidekvivalenter (CO₂e). Av det uppstod 65 miljoner ton CO₂e i andra länder och därmed 36 miljoner ton CO₂e i Sverige. Det kan hävdas att dessa 65 miljoner ton bör adderas till de 52,7 miljoner tonnen utsläpp inom landets gränser för att

¹⁶⁰ Hurmekoski, E., Myllyviita, T., Seppälä, J., Heinonen, E., Kilpeläinen, A., Pukkala, T., Mattila, T., Hetemäki, L., Asikainen, A. & Peltola, H. 2020. Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12981>

¹⁶¹ Naturvårdsverket. 2019. Sveriges officiella statistik. <http://www.naturvardsverket.se/Samar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag>. (Hämtat 2019-09-23.)

ge en rättvis bild av Sveriges bidrag till de globala växthusgasutsläppen. Om så, bör minskade utsläpp i länder dit Sverige exporterar varor och tjänster som genererat utsläpp i Sverige på samma sätt dras ifrån de 52,7 miljoner tonnen. Även markanvändningssektorn, där skogsbruk är den dominerande delen, kan räknas in i den nationella balansen. Den står för ett årligt upptag på 42 miljoner ton.¹⁶²

I hushållen står konsumtion av livsmedel för ungefär lika mycket utsläpp som transporter; i båda fall för ungefär en femtedel av de totala konsumtionsbaserade utsläppen.

¹⁶² Naturvårdsverket. 2020. Territoriella utsläpp och upptag av växthusgaser. <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Vaxthusgaser-territoriella-utslapp-och-upptag> (Hämtad 2020-09-23.)