

Gallring från luften

Potentiella effekter på virkesproduktion, produktions- och volymförluster, skaderisker samt tillgänglighet till svåråtkomliga bestånd vid gallring med drönare.

Lars Fridh, Patrik Ulvdal & Aron Davidsson



Gallring från luften med drönare - AirForestry.

Innehåll

Förord	5
Summary	6
Sammanfattning.....	7
Introduktion.....	8
Metod.....	9
Litteraturstudie: Effekten av gallringsprogram och stickvägsuttag.....	9
Litteratursökning.....	9
Kvantitativ syntes.....	10
Standardisering av effektmått.....	10
Hantering av variation och osäkerhet.....	12
Litteraturstudie: Risker för skador på träd och mark vid gallring.....	12
Litteratursökning.....	12
Kvantitativ syntes.....	12
Standardisering av effektmått.....	13
Hantering av skadornas betydelse, variation och osäkerhet.....	16
Simulering av olika gallringsstrategier med Heureka PlanVis	17
Heurekasystemet.....	17
Konventionell gallring.....	17
Drönargallring	18
Dataunderlag.....	18
Generering och val av skötselprogram och databearbetning	18
Fjärranalys: Potentiella gallringsarealer i svåråtkomlig terräng.....	18
Databearbetning och beräkningar.....	18
Brant terräng.....	19
Myrholmar.....	20
Resultat	21
Litteraturstudie: Effekten av gallringsprogram och stickvägsuttag.....	21
Övergripande resultat från kvantitativ sammanställning.....	23
Litteraturstudie: Risker för skador på träd och mark vid gallring	24
Övergripande resultat från kvantitativ sammanställning.....	26
Simulering av olika gallringsstrategier med Heureka PlanVis	29
Fjärranalys: Potentiella gallringsarealer i svåråtkomlig terräng.....	33
Samlad jämförelse mellan konventionell gallring och drönargallring.	34

Diskussion.....	35
Slutsatser.....	37
Referenser	38
Bilaga 1. Källor standardisering av effektmått	43



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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts juli 2026 av Maria Iwarsson Wide, programchef Värdeskapande Ekosystemtjänster. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 30 september 2026.

Redaktör: Charlotte Hessulf, charlotte.hessulf@skogforsk.se
©Skogforsk 2026 ISSN 1404-305X

Förord

Denna studie har genomförts inom projektet ”Effektivt och skonsamt skogsbruk” som pågått mellan 2024 och 2026. Projektet har bedrivits av AirForestry AB i samarbete med Skogforsk och Billerud och har finansierats av Energimyndigheten. Skogforsks analyser, slutsatser och tolkningar i rapporten har genomförts självständigt och utan påverkan från AirForestry AB eller andra externa aktörer. Tillhandahållet underlag har endast använts som faktaunderlag för beskrivning av tekniken.

Syftet med studien har varit att analysera potentialen för virkesproduktion vid gallring med drönare jämfört med konventionell gallring med skördare och skotare.

Vi tackar Olle Gelin och Anna Wigren på AirForestry för underlaget som ligger till grund för beskrivningen av drönargallring i rapporten samt Magnus Persson för hjälp med simuleringar av ingångsdata för Heurekasimuleringarna och Johan Sonesson för kommentarer och övergripande synpunkter, de båda senare på Skogforsk.

Uppsala, juni 2026

Lars Fridh

Summary

This study evaluates the potential effects of drone-based thinning compared with conventional mechanised thinning using harvesters and forwarders. The study focuses on timber production, volume losses, thinning-related damage risks, and access to stands that are difficult to manage with ground-based systems. Drone thinning is considered a system in which individual trees can be felled and transported from the air, potentially reducing the need for extraction roads and enabling lighter but more frequent thinning interventions.

The study combines two targeted Nordic literature reviews, simulations in Heureka PlanWise and a GIS-based analysis. The literature reviews addressed thinning intensity, extraction roads, and damage to remaining trees and soil. Reported effects were summarised in semi-quantitative syntheses and standardised into comparable measures of production loss, volume loss, and damage impact. In Heureka, conventional thinning was compared with a drone-thinning strategy based on repeated light thinnings without extraction roads. The GIS analysis identified potential thinning areas in steep terrain and on forested mire islands.

The results show that thinning primarily reallocates growth from many trees to fewer and larger trees. Thinning may therefore increase diameter development and sawlog production, but it does not automatically increase total volume production per hectare. Light thinning generally results in small production losses, whereas moderate and heavy thinning increase the risk of reduced volume increment, particularly in Scots pine. Extraction roads cause additional production losses by removing productive growing area and introducing a systematic component into the thinning operation.

The review of thinning damage shows that direct stem and root damage after a well-executed thinning is often limited, but long-term effects may be substantial. Damage close to the root collar, root damage, soil disturbance, stem rot, and wind and snow damage may all contribute to future production and volume losses. Drone thinning may therefore reduce some damage risks by reducing ground contact and limiting machine movements within the stand.

The Heureka simulations showed that drone thinning resulted in more frequent but lighter thinnings than conventional thinning. Over the full rotation, drone thinning increased net and gross volume production, particularly net sawlog production. When production was expressed on an annual basis, the differences were smaller because the rotation period was longer. The clearest positive effect remained in sawlog production, whereas the effect on total annual volume production was limited.

The GIS analysis showed that the largest geographical potential is found in steep terrain, where substantial areas of non-formally protected forest land and large standing volumes were identified. Forested mire islands represent a smaller but relevant category. Overall, the report indicates that drone thinning has clear but still indicative potential, mainly through reduced production losses, lower risk of some types of damage, and improved access to difficult terrain. The results should be interpreted with caution, as they are based on literature data, idealised simulations, and GIS-based area estimates.

Sammanfattning

Denna studie analyserar potentiella effekter av drönarbaserad gallring jämfört med konventionell gallring med skördare och skotare. Fokus ligger på virkesproduktion, produktions- och volymförluster, skaderisker samt tillgänglighet till svåråtkomliga gallringsbestånd. Drönargallring behandlas som ett system där enskilda träd kan avverkas och transporteras från luften, vilket kan minska behovet av stickvägar och möjliggöra svagare men oftare återkommande gallringar.

Studien bygger på två riktade nordiska litteraturstudier, simuleringar i Heureka PlanVis och en GIS-baserad analys. Litteraturstudierna behandlade gallringsstyrka, stickvägar och skador på träd och mark. Resultaten sammanställdes i metaanalysliknande synteser där rapporterade effekter standardiserades till jämförbara mått för produktionsförlust, volymförlust och skadepåverkan. I Heureka jämfördes konventionell gallring med en drönarstrategi med fler, svagare gallringar utan stickvägar. GIS-analysen identifierade potentiella arealer för gallringsavverkning i brant terräng och på myrholmar.

Resultaten visar att gallring främst omfördelar tillväxt från många träd till färre och grövre träd. Gallring kan därmed öka diameterutveckling och timmerandel, men ger inte automatiskt högre total volymproduktion per hektar. Svag gallring ger i regel små produktionsförluster, medan måttlig och stark gallring ökar risken för minskad volymtillväxt, särskilt i tall. Stickvägar bidrar dessutom till produktionsförlust genom att stamförande areal tas ur produktion och genom att en del av uttaget blir systematiskt snarare än selektivt.

Skadestudierna visar att direkta stam- och rotskador ofta är begränsade vid väl utförd gallring, men att långsiktiga földeffekter kan vara betydande. Skador nära rothalsen, rotskador, markpåverkan, röta samt storm- och snöskador kan ge produktions- och volymförluster över tid. Drönargallring kan därför ha potential att minska vissa skaderisker genom mindre markkontakt och färre maskinrörelser i beståndet.

Heurekasimuleringarna visade att drönargallring gav fler men svagare gallringar än konventionell gallring. Över hela omloppstiden ökade netto- och bruttovolymproduktionen, framför allt nettovolymproduktionen av timmer. När produktionen beräknades per år blev skillnaderna mindre, eftersom omloppstiden blev längre. Den tydligaste positiva effekten kvarstod för timmerproduktion, medan effekten på total årlig volymproduktion var begränsad.

GIS-analysen visade att den största geografiska potentialen finns i brant terräng, där betydande arealer av ej formellt skyddad skogsmark och stora stående virkesvolymmer identifierades. Myrholmar utgör en mindre men relevant arealtyp. Sammantaget visar rapporten att drönargallring har en tydlig, men ännu indikativ potential, främst genom minskade produktionsförluster, lägre risk för vissa skador samt ökad tillgänglighet. Resultaten bör tolkas med försiktighet eftersom de bygger på litteraturdata, idealiserade simuleringar och GIS-baserade arealberäkningar.

Introduktion

Gallring är en central skogsskötselåtgärd i Sverige och genomförs i de flesta bestånd minst en gång under omloppstiden. Syftet är att minska konkurrensen om vatten, näring och solljus mellan träd, vilket förbättrar tillväxtförhållandena för de kvarvarande träden (Agestam, 2015). Detta leder till ökad individuell tillväxt och ofta bättre stamkvalitet, även om den totala volymproduktionen i beståndet samtidigt kan minska något. Gallring bidrar även till att stärka beståndets vitalitet, minska risken för självgallring och snö- och stormskador samt skapa flexibilitet för fortsatt skogsskötsel. Samtidigt ger åtgärden möjlighet till löpande intäkter genom uttag av virke under beståndets utveckling (Eliasson m.fl. 2025).

Den första gallringen bör normalt genomföras när beståndet har nått cirka 10–15 meters övre höjd. För gran rekommenderas ofta gallring vid 12–15 meter och för tall vid 10–13 meter, medan lövträd vanligen bör gallras vid något lägre höjd (Agestam 2015). Gallringen anpassas efter trädslag, beståndets täthet, tidigare skötsel och virkesdimension. För att minska konkurrensen utan att försämra beståndets stabilitet bör gallringsstyrkan vanligtvis hållas inom cirka 20–40 procent av grundytan, och bestånd med högre medelhöjd bör gallras med försiktighet eftersom risken för vind- och snöskador ökar.

Valet av gallringsform påverkar beståndets struktur och ekonomiska utfall. Gallring underifrån (låg gallring), där mindre träd tas bort för att gynna större träd, är vanligast och passar särskilt i täta bestånd. Likformig gallring omfattar uttag av träd i olika storlekar, medan gallring ovanifrån (hög gallring) innebär uttag av större träd, vilket kan ge högre intäkter men också ökad skaderisk. Valet styrs därför av både biologiska och ekonomiska faktorer, såsom drivningskostnader och virkesvärden.

I dagens skogsbruk utförs gallring främst med skördare och skotare. Systemet är effektivt men kräver stickvägar, vilket tar produktiv areal i anspråk vid den första gallringen. Mekaniseringen ökar produktiviteten men kan samtidigt orsaka skador på kvarvarande träd, markpåverkan och jordpackning. Gallring kan även öka risken för rotröta, vilket gör förebyggande åtgärder, exempelvis stubbehandling, viktiga.

Gallring med drönare skulle på sikt kunna utgöra ett möjligt alternativ till konventionell gallring genom att avverkning och uttransport av enskilda träd kan ske från luften (Rönnqvist m.fl. 2026). Tekniken kan minska eller helt eliminera behovet av stickvägar. Genom minskad markbunden körning kan även risken för markskador, jordpackning, rotskador och stamskador på kvarvarande träd reduceras (Cedergren m.fl. 2024). Drönargallring kan dessutom öka tillgängligheten till gallringsbestånd i svåråtkomlig terräng och skapa förutsättningar för mer selektiva och återkommande gallringsingrepp. Sammantaget skulle tekniken kunna bidra till lägre produktions- och volymförluster samt en mer skonsam gallring, men potentialen behöver analyseras vidare med avseende på virkesproduktion, skadebild och praktisk tillämpning i olika beståndstyper.

Syftet med den här studien var att analysera potentialen för virkesproduktion vid gallring med drönare jämfört med konventionell gallring med skördare och skotare.

Metod

Undersökningen som redovisas i rapporten genomfördes med olika metoder, beroende på vilken fråga som studerades. Konkret undersöktes fyra frågeställningar för att belysa potentiella effekter av att gå över till drönargallring: (1) effekter av gallring utan stickvägsuttag, (2) effekter av svaga men tätt återkommande gallringar, (3) påverkan på risker för skador på träd och mark och effekter av dessa, (4) ökad råvarutillgång från gallringsarealer i svåråtkomlig terräng. För frågeställningarna 1–3 genomfördes två litteraturstudier. För frågeställningarna 1–2 genomfördes en kvantitativ modellstudie med Heureka PlanVis. För frågeställning 4 genomfördes en geografisk analysstudie baserad på tillgängliga geodata. De olika studierna beskrivs i separata metodavsnitt.

Gemensamt för litteraturstudierna var att de genomfördes som riktade systematiska översikter med nordiskt fokus. Sökningarna omfattade vetenskapliga artiklar, forskningsrapporter, arbetsrapporter, examensarbeten och doktorsavhandlingar som behandlar gallring och närliggande former av selektiv avverkning. Tyngdpunkten lades på studier från Sverige, Finland och Norge eftersom dessa länder har jämförbara boreala skogstyper, liknande maskinsystem och en hög grad av mekaniserad avverkning med skördare och skotare. De viktigaste databaserna och arkiven var: SLU:s publikationsdatabas och Epsilon, Skogforsk, Skogsstyrelsen, Silva Fennica, Jukuri/Luke, Theseus, Forestry, Scandinavian Journal of Forest Research, Canadian Journal of Forest Research och International Journal of Forest Engineering.

Litteraturstudie: Effekten av gallringsprogram och stickvägsuttag

Litteratursökning

Sökningen inriktades på publikationer som behandlar kommersiell gallring, maskinell gallring, stickvägar, gallringsstyrka, gallringsform, gallringsuttag, gallringstidpunkt och volymproduktion. Följande sökord och kombinationer användes på svenska och engelska:

Svenska sökord: gallring, maskinell gallring, skördare, skotare, stickväg, stickvägsbredd, stickvägsavstånd, gallringsstyrka, gallringsuttag, första gallring, gallringstidpunkt, volymproduktion, nettoproduktion, bruttotillväxt, virkesproduktion, tall, gran.

Engelska sökord: thinning, commercial thinning, thinning intensity, thinning regime, thinning timing, first thinning, strip road, extraction road, harvester, forwarder, volume production, gross volume increment, net volume production, Scots pine, Norway spruce, Sweden, Finland, Norway, Nordic.

Studier inkluderades i de fall de var vetenskapliga artiklar, doktorsavhandlingar, forsknings- eller arbetsrapporter och uppfyllde minst ett av följande kriterier:

- Studien behandlade gallring i tall- eller granbestånd i Sverige, Finland eller Norge.
- Studien redovisade effekter av gallringsstyrka, gallringsuttag eller gallringsform på produktion.
- Studien behandlade stickvägar, systematisk gallring eller halvsystematisk gallring.
- Studien redovisade volymtillväxt, bruttovolymproduktion, nettoproduktion eller volymförlust.

Studier exkluderades om de enbart behandlade maskinprestation, avverkningskostnad, ekonomiskt netto eller tekniska drivningsfrågor utan tydlig koppling till volymproduktion. Studier om röjning inkluderades endast när de gav relevant bakgrund till stamantal, beståndsstruktur och första gallring.

Kvantitativ syntes

Eftersom de inkluderade studierna redovisar produktionspåverkan på olika sätt genomfördes inte en full statistisk metaanalys. Studierna skiljer sig åt i trädslag, försöksperiod, gallringsstyrka, gallringsform och produktionsmått, och de redovisar inte varians, standardfel eller konfidensintervall på ett enhetligt sätt. I stället genomfördes en metaanalysliknande, semi-kvantitativ sammanställning med fokus på att jämföra riktning och storleksordning på rapporterade produktionsförluster. Detta är lämpligt när studierna är tematiskt jämförbara men för heterogena för statistisk sammanvägning (Borenstein m.fl. 2009, Koricheva m.fl. 2013).

Från varje studie extraherades uppgifter om trädslag, land, försöksperiod, gallringsbehandling, jämförelseled, produktionsmått, redovisad effekt och måttenhet. Jämförelseledet var i första hand ogallrat bestånd. I studier där frågan gällde stickvägsavstånd eller gallringssystem användes i stället det mest relevanta jämförelseledet, exempelvis längre stickvägsavstånd jämfört med kortare stickvägsavstånd eller selektiv gallring jämfört med systematisk gallring.

De produktionsmått som extraherades delades in i tre huvudgrupper: bruttovolymproduktion, nettoproduktion och löpande volymtillväxt. Bruttovolymproduktion avser total producerad stamvolym under försöksperioden. Nettoproduktion avser kvarstående volym plus uttagen volym, men inkluderar inte volym som gått förlorad genom mortalitet. Löpande volymtillväxt avser bruttotillväxt under en avgränsad mätperiod. Denna uppdelning gjordes eftersom olika studier använder olika produktionsmått och eftersom dessa mått inte alltid är direkt jämförbara.

Standardisering av effektmått

För att göra studierna mer jämförbara standardiserades effekterna i första hand till procentuell produktionsförlust. Tre typer av effektmått användes: procentuell produktionsförlust, absolut volymförlust i m³sk/ha och kvalitativ riktning. Procentuell produktionsförlust användes när jämförelseled och behandlingsled kunde jämföras direkt. Absolut volymförlust användes när studien redovisade volymskillnader men inte tillräckliga data för procentuell omräkning. Kvalitativ riktning användes när studien endast angav om effekten var positiv, negativ eller obetydlig.

Studier där endast kvalitativ riktning kunde utläsas användes som stöd i syntesen, men inte som underlag för kvantitativa riktvärden. Studier med tydliga procentuella eller absoluta produktionsmått gavs större vikt i sammanställningen.

Efter standardisering grupperades resultaten i fem analyskategorier: svag, måttlig, eller stark gallring, stickvägs- eller systematisk gallringseffekt samt försenad första gallring. Indelningen baserades på hur respektive studie beskrev gallringsstyrka, gallringsform eller behandling. När studier angav uttag i grundyta eller volym användes detta som stöd för klassificeringen. Svag gallring definieras som ett uttag <20 procent av grundytan före gallring, måttlig gallring 20–35 procent uttag, och stark gallring >35 procent uttag. Där det var möjligt redovisades resultaten separat för tall och gran, eftersom trädslagen kan skilja sig åt i tillväxtreaktion efter gallring.

Beräkningar genomfördes för relativ produktionsförändring, relativ produktionsförlust, absolut volymförlust, stickvägsandel och sammanvägd effekt. Formler och exempelberäkningar redovisas samlat i Tabell 1. I Bilaga 1 (Tabell B1.1.) finns en sammanställning av de källor som använts till respektive beräkning.

Tabell 1. Sammanställning av beräkningar och formler för standardisering av effektmått

Beräkning	Formel	Variabelförklaring
Relativ produktionsförändring	$Pf = ((P_b - P_j) / P_j) \times 100$	Pf = produktionsförändring i procent. P_b = produktion eller tillväxt i behandlingsled. P_j = produktion eller tillväxt i jämförelseled.
Produktionsförlust	$Pfl = ((P_j - P_b) / P_j) \times 100$	Pfl = produktionsförlust i procent. P_j = produktion eller tillväxt i jämförelseled. P_b = produktion eller tillväxt i behandlingsled.
Absolut volymförlust	$Avf = P_j - P_b$	Avf = absolut volymförlust. P_j = volymproduktion eller tillväxt i jämförelseled. P_b = volymproduktion eller tillväxt i behandlingsled.
Stickvägsandel	$SV_{andel} = (SV_b / SV_a) \times 100$	SV_{andel} = stickvägsandel i procent. SV_b = stickvägsbredd i meter. SV_a = stickvägsavstånd i meter.
Sammanvägd effekt	Se = riktning + storleksordning	Se = sammanvägd effekt. Riktning = positiv, negativ eller obetydlig effekt. Storleksordning = ungefärlig effekt i procent eller m^3sk/ha .

Relativ produktionsförändring (Pf)

När studier redovisade både ett behandlingsled och ett jämförelseled beräknades relativ produktionsförändring i procent. Beräkningen användes för att visa om behandlingsledet hade högre eller lägre produktion än jämförelseledet. Ett negativt värde innebär att behandlingsledet hade lägre produktion än jämförelseledet, medan ett positivt värde innebär högre produktion.

Relativ produktionsförlust (Pfl)

Eftersom litteraturstudien fokuserar på produktionsförlust redovisades resultaten i regel som positiva förlusttal. Relativ produktionsförlust användes därför som huvudmått när tillräckliga data fanns. Måttet gör det möjligt att jämföra studier med olika absoluta produktionsnivåer, eftersom skillnaden uttrycks i procent av jämförelseledet.

Absolut volymförlust (Avf)

När studier redovisade produktion eller tillväxt i m^3sk/ha kunde även absolut volymförlust beräknas. Den absoluta volymförlusten visar den faktiska volymskillnaden per hektar mellan jämförelseledet och behandlingsledet. När både absolut och relativ produktionsförlust kunde beräknas redovisades båda måtten. Den absoluta volymförlusten visar den faktiska volymskillnaden, medan den relativa produktionsförlusten gör det möjligt att jämföra studier med olika produktionsnivåer.

Om en studie redovisade skillnader i absoluta volymer, exempelvis m^3sk/ha , men saknade tillräcklig information för säker procentuell omräkning, behölls värdet i ursprunglig enhet. Detta gjordes för att undvika osäkra omräkningar mellan studier med olika försökslängd, bonitet och produktionsnivå.

Stickvägsandel (SV_{andel})

För att tolka effekter av stickvägsbredd och stickvägsavstånd användes stickvägsandel som ett principiellt arealmått. Stickvägsandelen visar den geometriska andelen av beståndsarealen som upptas av stickvägar.

Stickvägsandelen ska inte tolkas som direkt produktionsförlust, eftersom träd intill stickvägar kan få förändrade tillväxtförutsättningar. Den faktiska produktionsförlusten hämtades därför i första hand från empiriska studier, medan stickvägsandelen användes för att tolka och illustrera skillnader mellan olika stickvägssystem.

Sammanvägd effekt (Se)

Eftersom studierna inte redovisade osäkerhetsmått på ett enhetligt sätt användes en kvalitativ viktning. Studier gavs större betydelse om de hade lång försöksperiod, tydlig jämförelseled, direkt koppling till volymproduktion eller tillväxt, nordisk relevans och tydlig redovisning av effektmått. När flera studier visade samma riktning redovisades effekten som ett ungefärligt riktvärde eller intervall. När resultaten skilde sig åt redovisades skillnaderna i relation till trädslag, gallringsstyrka, gallringsform eller produktionsmått.

Hantering av variation och osäkerhet

Heterogenitet mellan studierna hanterades genom tematisk indelning och separat redovisning för trädslag. Effekter för gallringsstyrka, stickvägsutformning och gallringstidpunkt redovisades var för sig. På samma sätt skildes tall och gran åt när underlaget tillät detta.

Den metaanalysliknande metoden gör det möjligt att jämföra studier med olika upplägg och måttenheter, men den ger inte samma statistiska precision som en full metaanalys. Resultaten ska därför tolkas som litteraturbaserade riktvärden, inte som exakta generella effekter. Metoden ger inte konfidensintervall, signifikansnivåer eller formellt viktade medeleffekter. Styrkan är i stället att den systematiskt sammanställer riktning och storleksordning på rapporterade produktionsförluster i nordiska gallringsstudier.

Litteraturstudie: Risker för skador på träd och mark vid gallring

Litteratursökning

Sökningen inriktades på publikationer som behandlar studier om skador vid gallring och närliggande former av selektiv avverkning. Sökorden användes på svenska och engelska. Exempel på sökord var gallring, skördare, skotare, stamskador, rotskador, drivningsskador, körskador, markkompaktering, stormskador, snöskador, röta, thinning damage, harvesting damage, residual stand damage, forwarder, harvester, soil compaction, rutting, wind damage, snow damage och selection harvesting. Sökningen kompletterades genom kedjesökning i referenslistor.

Urvalet begränsades till studier som behandlar skador på kvarvarande träd, mark eller framtida produktion efter gallring eller selektiv avverkning. Studier som enbart behandlar ekonomi, maskinprestation eller avverkningskostnad exkluderades om de inte innehöll data om skador, tillväxt, volymproduktion eller biologiska följeffekter. Eftersom flera studier om kontinuitetsskogsbruk och selektiv avverkning i Norge och Finland behandlar skador på kvarvarande gran efter maskinell avverkning inkluderades dessa när resultaten bedömdes vara relevanta för gallringsliknande ingrepp.

Kvantitativ syntes

Den kvantitativa delen av litteraturstudien genomfördes som en metaanalysliknande sammanställning av skade- och effektmått från nordiska studier om gallringsskador. Syftet var att på ett systematiskt sätt jämföra vilka skadetyper som verkar ha störst

betydelse för tillväxt, volym och framtida produktionsförmåga. Eftersom studierna skiljde sig åt i upplägg, mätmetod, trädslag, uppföljningstid och redovisade mått bedömdes en full statistisk metaanalys inte vara lämplig. Sammanställningen gjordes därför som en kombination av berättande analys och enklare kvantitativ jämförelse. Den berättande delen användes för att beskriva skillnader mellan studier och förklara olika skadeprocesser. Den kvantitativa delen användes för att sammanställa skadefrekvenser, volymförluster, tillväxtförluster och rötforekomst. Detta arbetssätt följer principer för narrativ syntes och forskningssammanställning (Borenstein m.fl. 2009, Koricheva m.fl. 2013).

Endast studier som redovisade numeriska skade- eller effektmått ingick i den metaanalysliknande sammanställningen. Studier som enbart beskrev skador med ord användes som stöd i litteraturöversikten, men ingick inte i de kvantitativa jämförelserna. Studier som bara behandlade ekonomi, maskinprestation eller avverkningskostnad togs inte med, om de inte samtidigt innehöll biologiska data om skador, tillväxt eller produktion.

För att resultaten skulle kunna jämföras kodades varje studie efter skadekategori. Fem huvudgrupper användes:

- Stamskador, till exempel barkskador, sår på stammen och skador vid stambasen.
- Rotskador och skador nära rothalsen, till exempel skador på grova rötter eller skador nära marknivå.
- Markskador och kompaktering, till exempel körspår, markdeformation och försämrad rotmiljö.
- Storm- och snöskador, till exempel vindfällning, stambrott, snöbrott och skadad grundyta.
- Röta, framför allt rötforekomst och rötad stamvolym i gran.

Om en studie redovisade flera typer av skador kodades varje skadeutfall separat. En och samma studie kunde därför bidra med data till flera skadegrupper. På så sätt minskade risken att viktiga resultat gick förlorade.

För varje studie noterades författare, år, land, trädslag, beståndstyp, skadekategori, effektmått, rapporterat värde, uppföljningstid och om resultatet gällde enskilda träd eller hela bestånd. Skillnaden mellan trädnivå och beståndsnivå var viktig. En stor tillväxtförlust hos ett skadat träd betyder inte automatiskt att hela beståndet förlorar lika mycket tillväxt. Beståndseffekten beror också på hur många träd som skadats, vilka träd som skadats och om skadorna leder till långsiktiga följder som röta, nedsatt tillväxt eller sämre stabilitet.

Standardisering av effektmått

Eftersom de inkluderade studierna redovisade skador och effekter på olika sätt behövde resultaten standardiseras innan de kunde jämföras. Studierna rapporterade exempelvis andel skadade träd, skadearea, skadad grundyta, skadad volym, tillväxtförlust, rötforekomst och rötad stamvolym. För att göra materialet mer jämförbart grupperades dessa mått i ett antal gemensamma effektmått.

De huvudsakliga effektmåtten var skadefrekvens, relativ tillväxtförlust, skadad grundyta eller volym, absolut volym- eller produktionsförlust samt rötforekomst eller rötad stamvolym. I de fall där studierna redan redovisade procentvärden eller volymförluster användes dessa värden direkt. När studierna redovisade grunddata, exempelvis antal

skadade träd eller total inventerad volym, beräknades motsvarande effektmått enligt formlerna i Tabell 2. I Bilaga 1 (Tabell B1.2.) finns en sammanställning av de källor som använts till respektive beräkning.

Tabell 2. Sammanställning av beräkningar och formler för standardisering av effektmått

Beräkning	Formel	Variabelförklaring
Skadefrekvens på kvarvarande träd	$P_s = n_s / n_t \times 100$	P_s = skadefrekvens i procent. n_s = antal skadade träd. n_t = totalt antal inventerade kvarvarande träd.
Relativ tillväxtförlust hos skadade träd	$T_f = (T_o - T_s) / T_o \times 100$	T_f = relativ tillväxtförlust i procent. T_o = tillväxt hos oskadade träd eller kontrollträd. T_s = tillväxt hos skadade träd.
Skadad grundyta	$GY_{sp} = GY_{sk} / GY_{tot} \times 100$	GY_{sp} = andel skadad grundyta i procent. GY_{sk} = skadad grundyta. GY_{tot} = total grundyta före eller vid skadebedömning.
Skadad volym	$V_{sp} = V_{sk} / V_{tot} \times 100$	V_{sp} = andel skadad volym i procent. V_{sk} = skadad volym. V_{tot} = total stående volym.
Absolut volym- eller produktionsförlust	$V_f = V_k - V_s$	V_f = absolut volymförlust. V_k = volym eller produktion i kontroll eller oskadat tillstånd. V_s = volym eller produktion i skadat tillstånd.
Årlig volymförlust	$V_{f,år} = V_f / n_{år}$	$V_{f,år}$ = genomsnittlig årlig volymförlust. V_f = total volymförlust under perioden. $n_{år}$ = antal år.
Rötförekomst	$R_f = n_r / n_t \times 100$	R_f = rötförekomst i procent. n_r = antal träd med röta. n_t = totalt antal undersökta träd.
Rötad stamvolym	$R_v = V_r / V_{st} \times 100$	R_v = andel rötad stamvolym i procent. V_r = rötad volym. V_{st} = total stamvolym.
Förenklad beståndseffekt av trädskador	$B_{eff} = P_s \times T_f / 100$	B_{eff} = uppskattad beståndseffekt i procent. P_s = skadefrekvens i procent. T_f = tillväxtförlust hos skadade träd i procent.
Intervall mellan studier	$Int_s = x_{min} - x_{max}$	Int_s = rapporterat intervall. x_{min} = lägsta rapporterade värde. x_{max} = högsta rapporterade värde.
Ovikat medelvärde	$\bar{x} = \text{summa } x_i / k$	$\bar{x}$ = oviktat medelvärde. x_i = rapporterat värde i studie eller observation i. k = antal studier eller observationer.
Vikt för studie	$w_i = 1 / SE_i^2$	w_i = vikt för studie i. SE_i = standardfel för studie i.
Viktat medelvärde	$\bar{x}_w = \text{summa } w_i \times x_i / \text{summa } w_i$	$\bar{x}_w$ = viktat medelvärde. w_i = vikt för studie i. x_i = rapporterat effektmått.

Skadefrekvens (P_s)

Skadefrekvens användes för att beskriva hur stor andel av de kvarvarande träden som hade skador efter gallring. Måttet beräknades som antal skadade träd i relation till totalt antal inventerade träd. Det användes framför allt för studier som redovisade stam- och rotskador efter maskinell gallring. Om skadefrekvensen redan angavs i procent i den ursprungliga studien användes det rapporterade värdet direkt.

Relativ tillväxtförlust (T_f)

Relativ tillväxtförlust användes när studier jämförde tillväxt hos skadade träd med tillväxt hos oskadade träd eller kontrollträd. Måttet beskriver hur stor tillväxtminskningen är i procent. Detta var särskilt relevant för stam- och rotskador, där effekten ofta först kan ses på enskilda träd. Sådana värden tolkades som trädnivåeffekter och räknades inte automatiskt om till beståndsnivå.

Skadad grundyta och skadad volym (GY_{sp} & V_{sp})

När studier redovisade skadad grundyta eller skadad volym, exempelvis efter storm- eller snöskador, beräknades andelen skadad grundyta eller volym i relation till total grundyta eller total stående volym. Dessa mått gavs hög tolkningsvikt eftersom de ligger närmare faktisk påverkan på beståndet än enbart andelen skadade träd.

Absolut volym- eller produktionsförlust (V_f)

När studier redovisade volymförlust i kubikmeter användes det rapporterade värdet direkt. Om förlusten angavs som skillnad mellan kontroll och skadat tillstånd beräknades den som skillnaden mellan volymen i kontrollen och volymen i det skadade tillståndet. Om värdet redovisades per hektar angavs det som m^3/ha . Om värdet gällde en viss tidsperiod, exempelvis tio år, noterades även tidsperioden.

För att kunna jämföra volymförluster över olika tidsperioder kunde ett genomsnittligt årligt värde beräknas. Detta användes endast som ett kompletterande jämförelsemått, eftersom produktionsförluster inte alltid utvecklas linjärt över tid.

Rötförekomst och rötad stamvolym (R_f & R_v)

För röta användes två olika mått beroende på hur studierna redovisade resultaten. Rötförekomst användes när studien angav antal träd med röta i relation till totalt antal undersökta träd. Rötad stamvolym användes när studien redovisade hur stor andel av stamvolymen som var rötad.

Dessa mått hölls isär eftersom de beskriver olika aspekter av skadan. Rötförekomst visar hur vanligt röta är i beståndet, medan rötad stamvolym bättre beskriver den volymmässiga betydelsen.

Trädnivå och beståndsnivå (B_{eff})

En viktig del av metoden var att skilja mellan effekter på trädnivå och effekter på beståndsnivå. Trädnivå avser effekter hos enskilda skadade träd, till exempel minskad tillväxt efter en stam- eller rotskada. Beståndsnivå avser effekter på hela provytan eller beståndet, till exempel andel skadad grundyta efter storm eller total rötförekomst. Denna uppdelning var viktig eftersom en stor effekt på ett enskilt träd inte nödvändigtvis innebär en lika stor effekt på hela beståndet. Om endast en liten andel av träden är skadade blir den totala beståndseffekten lägre än effekten på de enskilda skadade träden. För att illustrera detta kunde en förenklad beståndseffekt beräknas genom att kombinera skadefrekvens med tillväxtförlust hos skadade träd.

Intervall och medelvärden (Int_s & $\bar{x}$)

Eftersom flera studier redovisade olika värden inom samma skadekategori sammanställdes resultaten i första hand som intervall. Intervallen visar det lägsta och högsta rapporterade värdet i det inkluderade materialet. De ska därför tolkas som beskrivande intervall, inte som statistiska konfidensintervall.

När flera studier redovisade samma typ av mått kunde ett oviktat medelvärde beräknas. Detta gjordes endast när måtten var tillräckligt jämförbara. Exempelvis kunde skadefrekvenser uttryckta som procent skadade träd jämföras med varandra, medan procent skadade träd inte slogs samman med volymförlust i m^3 eller rötad stamvolym.

Viktning av studier (w_i & $\bar{x}_w$)

En formell statistisk viktning baserad på varians, standardfel eller konfidensintervall genomfördes inte, eftersom flera studier saknade sådana uppgifter. I stället användes en kvalitativ evidensviktning (Tabell 3). Studier med lång uppföljningstid, tydlig studiedesign, fältförsök, data på beståndsnivå och direkta mått på volym, tillväxt eller röta gavs större betydelse i tolkningen än kortare inventeringar som enbart redovisade skadefrekvens.

Tabell 3. Kriterier för den kvalitativa evidensviktningen.

Kriterium	Högre vikt gavs till studier som...
Studiedesign	Hade fältförsök, försöksytor eller lång uppföljning
Effektmått	Redovisade data för tillväxt, volym eller röta
Skalenhet	Rapporterade resultat på beståndsnivå
Relevans	Genomfördes i nordiska gran- eller tallbestånd
Datatydlighet	Angav tydliga numeriska skadevärden
Uppföljningstid	Följde skador över flera år eller till slutavverkning

Hantering av skadornas betydelse, variation och osäkerhet

Efter sammanställningen klassades varje skadekategori efter bedömd betydelse för produktion och volym (Tabell 4). Bedömningen byggde på skadefrekvens, rapporterad volympåverkan, skadegrad, tidsskala och datakvalitet. Klassningen gjordes inte bara utifrån hur många träd som var skadade. En låg skadefrekvens kan ändå ha stor betydelse om skadorna sitter vid rothalsen, drabbar huvudstammar eller leder till röta. På samma sätt kan många små ytliga barkskador ha mindre betydelse om de inte påverkar tillväxten eller ökar risken för röta.

Skillnaderna mellan studierna var stora. De varierade i trädslag, beståndsålder, markförhållanden, maskinsystem, skadeinventering, uppföljningstid och vilka mått som redovisades. Därför analyserades varje skadekategori separat och resultaten redovisades som intervall i stället för ett enda sammanvägt värde. Den viktigaste begränsningen är att många studier redovisar hur många träd som skadats, men inte hur skadorna påverkar tillväxt, volym eller röta på längre sikt. Därför kan skadefrekvens inte automatiskt tolkas som produktionsförlust. En annan begränsning är att röta och storm- eller snöskador ofta uppstår långt efter gallringen, vilket gör det svårt att koppla skadan till ett enskilt gallringsingrepp.

Tabell 4. Klassning av skadekategori

Klass	Tolkning
Låg	Skadan förekommer men har begränsad dokumenterad påverkan på volym på beståndsnivå
Måttlig	Skadan kan ge mätbar påverkan på tillväxt eller volym under vissa förhållanden
Hög	Skadan kan ge tydlig volymförlust eller långsiktig produktionspåverkan
Mycket hög	Skadan kan orsaka omfattande volymförlust på beståndsnivå

Den metaanalysliknande sammanställningen ska därför ses som en strukturerad uppskattning av skadornas storleksordning och relativa betydelse, inte som en exakt statistisk beräkning. Metodens styrka är att den visar vilka skador som oftast är begränsade, vilka som kan få stor effekt på enskilda träd och vilka som kan ge betydande volymförlust på beståndsnivå.

Simulering av olika gallringsstrategier med Heureka PlanVis

Heurekasystemet

För att undersöka skillnaden mellan konventionell gallring med skördare och skotare och stickvägsfri gallring från luften genomfördes en simuleringsstudie med hjälp av Heureka PlanVis. Heurekasystemet är ett beslutsstödsystem utvecklat av Sveriges lantbruksuniversitet och Skogforsk som samlar de bästa tillgängliga prognostiseringsmodellerna för skog och skogsbruk i Sverige (Lämås *m.fl.*, 2023). Heureka består av flera olika programvaror (varav Heureka PlanVis är en av dem), men den gemensamma kärnan utgörs av validerade modeller för skoglig tillväxt under inflytande av olika skogsskötselåtgärder (Fahlvik, Elfving & Wikström, 2014).

Heureka PlanVis skriver fram skogens utveckling för skogsbestånd i femårssteg baserat på användardefinierade skötselstrategier som anger hur och när skogsskötseln ska eller kan genomföras. Dessa framskrivningar görs i formen av skötselprogram, som innebär en sammanhållen sekvens av åtgärder för en definierad tidsrymd, ofta 100 år. Skötselprogrammen innehåller också de data som beskriver skogens och flera ekosystemtjänsters utveckling, inklusive till exempel uttag av virke. Ett exempel på skötselprogram kan vara: gallring period 1 med 20 m³sk/ha i uttag, ingen åtgärd period 2, slutavverkning period 3 med 150 m³sk/ha i uttag.

Varje användardefinierad skogsskötselstrategi innebär en uppsättning regler som Heureka PlanVis följer för att räkna fram skogens utveckling givet inriktningen för strategin. Reglerna som avgör när åtgärder ska genomföras (till exempel slutavverkningstidpunkt) kan sättas med tillåtna spann, vilket innebär att flera alternativa skötselprogram kan genereras för samma strategi. Baserat på denna variation kan sedan det mest lämpliga programmet väljas, till exempel med hjälp av optimering.

För detta projekt definierades två skötselstrategier (konventionell gallring och drönargallring) för vilka inställningar specificerades i Heureka PlanVis. Detaljer för dessa strategier presenteras nedan. För båda skötselstrategierna gäller att inväxning av nya träd inte simuleras för att minimera dessa modellers inverkan på resultatet.

Konventionell gallring

Strategin för konventionell gallring definierades för att likna hur gallring genomförs i storskogsbruket idag. Det innebar relativt få men starka låggallringar, med en stor del av uttaget i förstagallring förlagt i stickvägen.

För strategin konventionell gallring genomförs en gallring under omloppstiden med en styrka (uttag av grundyta) på 30–45 procent. Gallringens tidpunkt bestäms av när skogen vuxit in i gallringsbehov enligt gallringsmallen INGVAR (Jacobsson *m.fl.* 2008, Agestam 2015), men där mallens kurvor sänkts med 10 procent. Tidpunkten för gallring tillåts dessutom senareläggas upp till 5 år från tiden när gallringsbehov uppstår första gången enligt gallringsmallen. Förstagallringen genomförs dock innan beståndets övre höjd är 16 m genom låggallring där 20 % av grundytan efter gallring ska vara björk, resten gran eller tall. Låggallringen genomförs genom ett trädval där förhållandet mellan medeldiametern i uttaget och beståndet innan gallring ska vara 0,8, vilket approximerar en gallringskvot runt 0,8. Stickvägarna är 4,2 m breda och stickvägsavståndet 21 m, vilket ger en stickvägsandel på ca 17 procent. Detta motsvarar också den systematiska delen av gallringsuttaget där inga selektiva val av träd görs. Slutavverkning av hela beståndet sker från lägsta slutavverkningsålder med en tillåten förlängning av omloppstiden på 30 år.

Drönargallring

Strategin för drönargallring definierades för att likna hur det skulle kunna fungera när gallring genomförs från luften med högkapacitetsdrönare. Det innebär i princip obegränsat antal svaga låggallringar utan uttag i stickvägar. Eftersom undvikandet av självgallring för maximerad arealproduktion är ett av motiven till drönargallring antas lägre gallringskvoter än vid konventionella gallringar.

I drönargallring tillåts ett obegränsat antal gallringar under omloppstiden med en styrka på 5–20 procent med minst 5 år mellan varje gallring. Gallringarna utförs med målet att förhållandet mellan medeldiametern i uttaget och beståndet innan gallring ska vara 0,7, vilket approximerar en gallringskvot runt 0,7. Gallringar som inte är förstagallringar genomförs innan beståndets övre höjd är 20 m. Till skillnad från konventionell gallring tas inga stickvägar upp. Utöver vad som nämnts här är skötselstrategierna lika.

Dataunderlag

För att testa skötselstrategierna genererades 72 ideala bestånd utifrån gallringsmallen INGVAR (Jacobsson m.fl. 2008, Agestam 2015). Bestånden genererades för tre klasser (låg, medel och hög) avseende grundyta och stamantal (baserat på mallens utgångsläge) för tall respektive gran på ståndortsindex mellan 22 och 32.

Generering och val av skötselprogram och databearbetning

Med Heureka PlanVis genererades mellan 21 och 42 alternativa skötselprogram per bestånd för respektive skötselstrategi. För varje bestånd och strategi valdes det skötselprogram som gav maximal nettovolymproduktion av timmer per år fram till och med slutavverkning. Utfallet för dessa två skötselprogram per bestånd användes sedan för att göra jämförelser mellan strategierna, där bestånden agerade som upprepningar. En linjär modell anpassades och användes för att undersöka skillnaden mellan strategierna samtidigt som bestånds- och ståndortstyper kontrollerades. Databearbetningen och visualiseringen gjordes med R version 4.5.2 i R-Studio.

Fjärranalys: Potentiella gallringsarealer i svåråtkomlig terräng

Databearbetning och beräkningar

Analysen genomfördes som en GIS-baserad rumslig analys med syfte att identifiera två typer av skogliga miljöer: Brant terräng (BT) och Myrholmar (MH). Analysen baserades på nationella raster- och vektordata över höjd, marktäckning, skoglig volym och formellt skyddade områden (Tabell 5).

Samtliga geodata harmoniserades till ett gemensamt koordinatsystem och analyserades i ArcGIS. Rasterdata anpassades till gemensam geografisk utbredning och cellstruktur där detta krävdes för överlagringsanalyser. Vid samkörning mellan raster- och vektordata användes rumslig överlagring för att koppla marktäckningsklass, lutning, skyddsstatus och skoglig volym till respektive analysyta.

Areal beräknades för samtliga identifierade ytor. Virkesvolym beräknades genom att multiplicera volymvärdet i Skogliga grunddata, uttryckt som m^3sk/ha , med den aktuella cell- eller ytarealen. Summerad volym beräknades därefter för respektive analyskategori: brant terräng, myrholmar, formellt skyddad skog och ej formellt skyddad skog.

Resultatet redovisades som areal och stående virkesvolym för de två analyserna BT och MH, uppdelat på formellt skyddad respektive ej formellt skyddad skog.

Tabell 5. Sammanställning av de nationella raster- och vektordata över höjd, marktäckte, skoglig volym och formellt skyddade områden som använts i analysen.

Källdata	Källa	Datotyp/innehåll	Användning i analysen	Analys
Markhöjdmodell, DEM	(Lantmäteriet, uå)	Terrängmodell i gridform med koordinatsatta höjdpunkter i regelbundet rutnät. Lantmäteriets markhöjdmodell har 1 meters upplösning och hög höjdnoggrannhet.	Användes för att beräkna marklutning i grader. Rasterceller med lutning över 20 grader selekterades som potentiellt brant terräng.	BT
Nationellt marktäckedata, NMD	(Naturvårdsverket, 2026)	Rikstäckande marktäckekartering i rasterformat. NMD används för att klassificera olika marktäcketyper, bland annat skogsmark, våtmark, myr/torvmark och övriga markslag.	Användes för att avgränsa skogsmark i analysen av brant terräng samt för att identifiera skogsmark respektive myr-/våtmarksmark vid avgränsning av myrholmar.	BT, MH
Skogliga grunddata – volymiskt	(Skogsstyrelsen, uå)	Rasterbaserat skogligt dataunderlag som redovisar virkesvolym i m ³ sk/ha. Skogliga grunddata omfattar även variabler som grundyta, medelhöjd, medeldiameter och biomassa.	Användes för att hämta och summera stående virkesvolym inom identifierade ytor för brant terräng och myrholmar.	BT, MH
Formellt skyddad skog / skyddade områden	(Skogsstyrelsen m.fl. 2025, Naturvårdsverket uå)	Geodata över skyddade områden och formellt skyddad skogsmark, exempelvis nationalparker, naturreservat, biotopskyddsområden, Natura 2000-områden och naturvårdsavtal.	Användes för att klassificera identifierade skogsytor som formellt skyddade eller ej formellt skyddade.	BT, MH

Brant terräng

Brant terräng (BT) definierades som skogsmark med en marklutning över 20 grader. Lutning beräknades utifrån den digitala markhöjdmodellen genom rasterbaserad lutningsanalys. Resultatet uttrycktes i grader. Rasterceller med en lutning större än 20 grader selekterades och användes som ett första urval av potentiellt branta ytor.

De selekterade ytorna samkördes därefter med Nationellt marktäckedata för att avgränsa de delar som utgjordes av skogsmark. Celler eller ytor som inte klassades som skogsmark exkluderades från den fortsatta analysen. De kvarvarande skogsytorna överlagrades med geodata över formellt skyddade områden för att dela upp ytorna i formellt skyddad respektive ej formellt skyddad skog.

Slutligen kopplades de identifierade skogsytorna i brant terräng till Skogliga grunddata, där volymskiktet användes för att beräkna stående virkesvolym. För varje yta beräknades

areal och virkesvolym. Volymen beräknades utifrån rastervärden i m³sk/ha och summerades för de ytor som ingick i respektive analysklass.

Myrholmar

Myrholmar (MH) definierades som fastmarksöar med skog som helt omsluts av myr- eller våtmark. Analysen utgick från Nationellt marktäckedata, där skogsmark och myr-/torvmark först selekterades som separata klasser. Därefter identifierades sammanhängande skogsytor som var geografiskt isolerade inom eller helt omslutna av myr- eller våtmarksmark.

Identifieringen genomfördes som en rumslig GIS-analys där skogsytornas topologiska relation till omgivande myr- och våtmarksmark analyserades. Skogsytor som hade kontakt med annan fastmark eller andra marktäcketyper utanför myr-/våtmarksområdet exkluderades. Endast skogsytor som helt omslöts av myr- eller våtmarksmark klassades som myrholmar.

De identifierade myrholmarna överlagrades därefter med geodata över formellt skyddade områden. Varje myrholme klassificerades som formellt skyddad eller ej formellt skyddad. Slutligen kopplades myrholmarna till Skogliga grunddata för att beräkna areal och stående virkesvolym. Volymen beräknades från volymskiktets rastervärden i m³sk /ha och summerades per myrholme samt per skyddsklass.

Resultat

Litteraturstudie: Effekten av gallringsprogram och stickvägsuttag

Den nordiska litteraturen visar samstämmigt att gallring främst omfördelar tillväxt från många träd till färre och grövre träd. Gallring leder därför ofta till ökad diameter- och volymtillväxt hos kvarvarande träd, men inte nödvändigtvis till högre total volymproduktion per hektar. I flera långtidsförsök är den totala bruttovolymproduktionen högst i ogallrade bestånd, särskilt i tall (Mäkinen & Isomäki 2004a, Nilsson m.fl. 2010)

Nilsson m.fl. (2010) sammanställde svenska långtidsförsök i tall och gran och visade att gallring i tall generellt minskade bruttovolymproduktionen jämfört med ogallrat. I gran var effekten mindre tydlig och framför allt kopplad till starka gallringsprogram. Detta tyder på att gran i högre grad än tall kan kompensera för reducerad grundyta efter måttlig gallring. Liknande resultat redovisas i finska långtidsförsök. Mäkinen och Isomäki (2004a) visade att svag gallring i tall gav nästan samma volymtillväxt som ogallrat, medan måttlig och stark gallring gav tydligare produktionsminskning.

I norsk litteratur beskrivs samma grundläggande samband. Braastad och Tveite (2001) samt Søgaard m.fl. (2017) beskriver gallring som en åtgärd som kan öka medeldiameter och dimensionsutveckling, men där totalproduktionen normalt blir lägre än i ogallrade eller svagt gallrade bestånd.

Gallringsstyrkan är den faktor som tydligast påverkar produktionsförlusten. I svenska långtidsförsök var effekten särskilt tydlig i tall. Nilsson m.fl. (2010) visade att samtliga gallringsprogram i tall gav lägre bruttovolymproduktion än ogallrat, medan starka gallringar även kunde minska nettoproduktionen. I gran var effekten svagare, men starka gallringsprogram och vissa höggallringar kunde ge lägre nettoproduktion än låggallring. I finska tallförsök visade Mäkinen och Isomäki (2004a) att svag gallring gav nästan samma volymtillväxt som ogallrat. Måttlig gallring minskade däremot volymtillväxten med omkring 15 procent och stark gallring med omkring 25 procent. Dessa resultat visar att tallbestånd har begränsad förmåga att fullt ut kompensera för kraftigt reducerad grundyta.

För gran visar resultaten ett något annorlunda mönster. Mäkinen och Isomäki (2004b) visade att enskilda granar reagerade positivt på ökat växtutrymme efter gallring, men att totalproduktionen per hektar inte nödvändigtvis ökade. Gran kan därför ha bättre kompensationsförmåga än tall, men även i gran innebär stark gallring en risk för lägre totalproduktion. Wallentin (2007) behandlade gallring i gran och visade att gallringsstrategi, initialförband och gallringsstyrka påverkar både volym- och kvalitetsutfall. Avhandlingen stödjer slutsatsen att gallring i gran bör bedömas utifrån kombinationen av produktion, dimensionsutveckling och kvarvarande grundyta.

Maskinell gallring förutsätter normalt stickvägar. Stickvägar påverkar produktionen genom att delar av beståndsytan får lägre stamantal eller helt saknar produktionsstammar. Produktionsförlusten beror främst på stickvägsbredd, stickvägsavstånd och hur stor del av det totala gallringsuttaget som sker som tvingande stickvägsuttag.

Skogforsk (Pettersson 2016) redovisade resultat från tallförsöket Kolfallet, där olika gallringsformer och stickvägsavstånd jämfördes. Under tio år efter första gallring var nettotillväxten 6 m³sk/ha, eller cirka 5 procent, högre vid 32 meters stickvägsavstånd

(med motormanuell mellanonzonsfällning) än vid 18 meters stickvägsavstånd. Pettersson (2016) sammanfattade också tidigare nordiska studier som visade att stickvägsupptagning vid 25–30 meters stickvägsavstånd kan ge cirka 8–10 procent lägre volymtillväxt under en tioårsperiod.

Mäkinen, Isomäki och Hongisto (2006) studerade selektiv, systematisk och halv-systematisk gallring i finska tall- och granbestånd. Resultaten visade att halv-systematisk gallring, där stickvägar kombineras med selektiv gallring mellan stickvägarna, gav relativt små skillnader jämfört med selektiv gallring. Ren systematisk gallring gav däremot lägst volymtillväxt. Detta visar att stickvägarnas negativa produktionspåverkan kan begränsas om uttaget mellan stickvägarna fortfarande baseras på selektivt trädval.

De Castro Segtowich (2025) visade i sin doktorsavhandling om tall att kvarvarande grundyta var viktigare för beståndsutvecklingen än trädens exakta rumsliga fördelning. Detta är relevant för diskussionen om stickvägar eftersom det antyder att produktionsförlusten inte enbart beror på stickvägens geometriska utformning, utan även på hur mycket produktiv grundyta som lämnas kvar i beståndet efter gallring. Sammantaget visar resultaten att stickvägar ger en mätbar produktionspåverkan, men att effekten kan minskas genom längre stickvägsavstånd, begränsad stickvägsbredd och selektiv gallring mellan stickvägarna.

Gallringstidpunkten påverkar både beståndets produktionsförmåga och möjligheten att genomföra ett lämpligt uttag. Nilsson m.fl. (2010) visade att en måttligt försenad första gallring inte tydligt minskade total volymproduktion i tall eller gran. Detta tyder på att gallringstidpunkten i sig inte alltid är lika avgörande för volymproduktionen som gallringsstyrkan.

Samtidigt visar nyare forskning att gallringstidpunkt måste förstås i relation till beståndets stamantal, grundyta och variation. Persson m.fl. (2024) studerade planterade barrbestånd i södra Sverige före och efter första gallring. Studien visade att gallringen minskade variationen i stående volym, grundyta och stamantal, men att variation i höjd och diameter till stor del kvarstod. Författarna fann också att efterlevnaden av gallringsrekommendationer ofta var låg till måttlig vid rekommenderad första gallringshöjd, omkring 12–14 meter. Full överensstämmelse med gallringsmålen uppnåddes främst vid högre dominerande höjd, cirka 15 meter för tall och 17 meter för gran, i bestånd med fler än 2 250 stammar per hektar.

Detta innebär att första gallringen inte enbart bör styras av höjd. Om stamantal och grundyta är för låga vid rekommenderad höjd kan en gallring bli för stark och därmed ge produktionsförlust. Om beståndet däremot är tätt och har hög grundyta kan en tidigare gallring vara motiverad. Gallringstidpunkt bör därför bedömas utifrån kombinationen av höjd, stamantal, grundyta och beståndsvariation.

Beståndets struktur före gallring påverkar hur gallringen kan genomföras och vilken produktionspåverkan den får. Fahlvik (2005) visade i studier av röjning i heterogena bestånd att tidig beståndsbehandling påverkar framtida stamantal, diameterfördelning och produktionsförutsättningar. Även om avhandlingen inte behandlar kommersiell maskinell gallring direkt är den relevant eftersom beståndsstruktur före första gallring påverkar hur stort uttag som krävs och hur mycket grundyta som kan lämnas kvar.

Fridman & Nilsson (2025) ger en nationell bakgrund genom att beskriva skogstillståndets utveckling i Sverige sedan 1993. Rapporten används här inte som direkt gallringsförsök, men är relevant eftersom den visar att gallringens roll måste förstås mot bakgrund av förändringar i virkesförråd, åldersstruktur och skogsbruksåtgärder.

Övergripande resultat från kvantitativ sammanställning

Den kvantitativa sammanställningen visar att produktionsförlusten varierar kraftigt beroende på trädslag och gallringsutformning (Tabell 6 & Figur 1). Resultaten redovisas som ungefärliga produktionsförluster eller skillnader i volymtillväxt. Värdena bör tolkas som litteraturbaserade riktvärden, eftersom försöken skiljer sig åt i trädslag, ståndort, gallringsform och observationsperiod. I Bilaga 1 (Tabell B1.1.) finns en sammanställning av de källor som använts till respektive beräkning.

Tabell 6. Kvantitativa sammanställning för produktionsförluster eller skillnader i volymtillväxt vid gallring. Grundyteuttag i gallring: Svag <20%, Måttlig 20–35%, Stark >35%

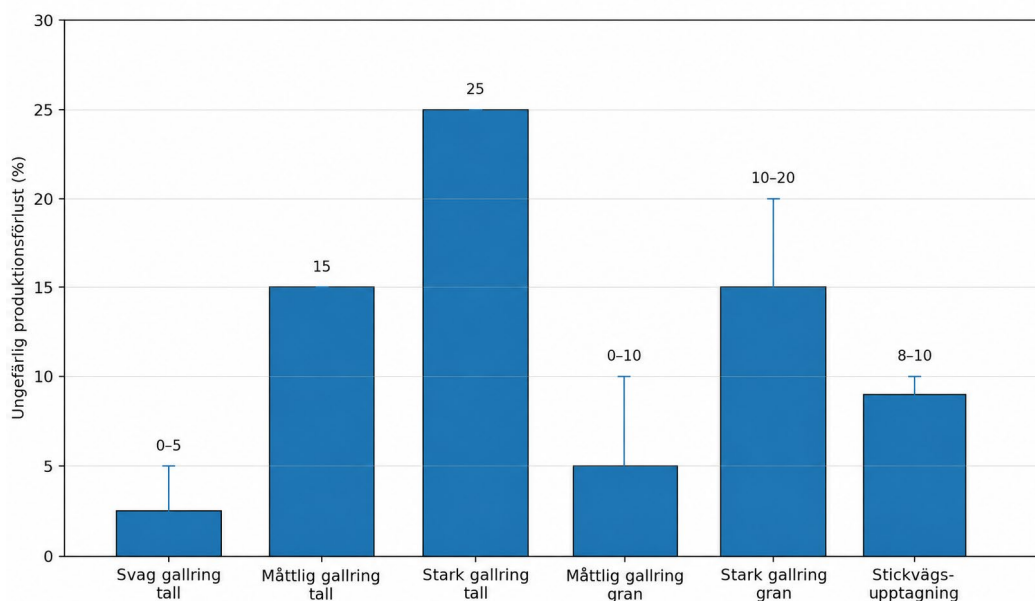
Faktor	Trädslag	Produktionsförluster/ skillnader i tillväxt	Tolkning
Svag gallring	Tall	~ 0–5 % lägre tillväxt	Liten produktionsförlust
Måttlig gallring	Tall	~ 15 % lägre tillväxt	Tydlig produktionsförlust
Stark gallring	Tall	~ 25 % lägre tillväxt	Stor produktionsförlust
Måttlig gallring	Gran	~ 0–10% lägre tillväxt	Gran kompenserar relativt väl
Stark gallring	Gran	~ 10–20% lägre tillväxt	Risk för lägre nettoproduktion
Stickvägsupptagning	Tall/gran	~ 8–10 % lägre tillväxt	Direkt areal- och grundyteeffekt i förstagallring
Försenad första gallring	Tall/gran	ingen tydlig effekt	Tidpunkt mindre avgörande än styrka
Systematisk gallring	Tall/gran	lägre volymtillväxt än selektiv/halv-systematisk gallring	Volymproduktion påverkas av lågt selektivt trädval
Låg kvarvarande grundyta	Tall	negativ effekt på fortsatt produktion	Grundytan efter gallring central

För tall är mönstret tydligast: svag gallring ger liten eller obetydlig produktionsförlust, medan måttlig och stark gallring kan minska volymtillväxten med ungefär 15 respektive 25 procent jämfört med ogallrat i finska långtidsförsök (Mäkinen & Isomäki 2004a). Svenska långtidsförsök visar samma riktning, där gallrade tallbestånd generellt hade lägre bruttovolymproduktion än ogallrade bestånd (Nilsson *m.fl.* 2010).

För gran är produktionsförlusten mindre entydig. Gran verkar kunna kompensera bättre efter måttlig gallring, sannolikt genom ökad tillväxt hos kvarvarande träd. Stark gallring och höggallring kan dock minska nettoproduktionen även i gran (Mäkinen & Isomäki 2004b, Wallentin 2007, Nilsson *m.fl.* 2010)

Stickvägar och systematisk gallring ger en mer direkt produktionspåverkan genom att delar av beståndet tas ur normal stamproduktion. Baserat på Pettersson (2016) och tidigare nordiska studier kan stickvägsupptagning ge cirka 8–10 procent lägre volymtillväxt under en tioårsperiod. Skillnaden mellan 18 och 32 meters stickvägsavstånd i Kolfallet visar också att kortare stickvägsavstånd kan minska nettotillväxten med omkring 5 procent under tio år.

Gallringstidpunkten gav däremot inte lika tydliga direkta produktionsförluster i långtidsförsök. Nilsson *m.fl.* (2010) visade att måttligt försenad första gallring inte påverkade total volymproduktion tydligt. Nyare resultat visar dock att gallringstidpunkt bör anpassas till stamantal, grundyta och variation inom beståndet snarare än att enbart styras av höjd (Persson *m.fl.* 2024).



Figur 1. Ungefärlig produktionsförlust vid olika gallringsstyrkor baserat på nordiska långtidsförsök. Värdena ska tolkas som riktvärden eftersom försöken skiljer sig åt i träslag, försöksperiod och ståndort.

Litteraturstudie: Risker för skador på träd och mark vid gallring

Stam- och rotskador är de mest direkt observerbara skadorna vid mekaniserad gallring. De uppkommer när skördare, aggregat, kran, fällda stammar, virke eller skotare kommer i kontakt med kvarvarande träd. I praktiken är skadorna ofta koncentrerade till stickvägar, svängar, korsningar och trånga passager. Skogsstyrelsens gallringshandledning anger att mekaniserad gallring kan orsaka direkta skador på kvarvarande träd och att gallring även påverkar risken för vind-, snö-, insekts- och svampskador senare i beståndsutvecklingen.

Svenska examensarbeten visar att skadefrekvensen efter gallring ofta ligger i storleksordningen några procent av kvarvarande träd, men med stor variation mellan objekt. Andersson (2011) studerade stamskador i gallringsbestånd och redovisar att 3,4 % av träden var skadade efter gallring, där merparten av skadorna var stamskador och en mindre andel rotkrageskador. Detta ligger nära den ofta använda kvalitetsgränsen att högst cirka 5 % av kvarvarande träd tillåts vara skadade efter gallring, vilket också nämns i svenska studentarbeten med hänvisning till Skogsstyrelsens äldre rekommendationer.

Även finska examensarbeten visar att skadorna ofta är kopplade till körstråkens utformning. Lindsköld (2016) analyserade drivningsskador i gallringsskogar. Studien behandlar uppkomst av stam- och rotskador i gallring, och materialet visar att skadorna ofta uppkommer i anslutning till körstråk, svängar, träd nära stickväg och situationer där maskinens utrymme begränsas.

Finska studier har särskilt stor betydelse för kunskapen om stam- och rotskadors biologiska följder. Isomäki och Kallio (1974) visade att skador orsakade av avverkningsmaskiner på gran kan leda till både tillväxtnedsättning och röta. Studien är en klassisk nordisk referens eftersom den kopplar samman mekaniska skador, tillväxt och

rötspridning. Senare översikter och citeringar av nordiska skadeförsök visar att skador nära rothals och grövre rötter är särskilt allvarliga eftersom de kan reducera tillväxten hos enskilda träd och samtidigt öka infektionsrisken för rötsvampar.

Sirén (1998) är en central finsk doktorsavhandling om engreppsskördare, drivningskvalitet och möjligheten att förutsäga trädskador. Avhandlingen behandlar skördarbete, skogsvårdsresultat och prediktion av trädskador. Sirén m.fl. (2013) analyserade senare skador vid gallring av gran på ofrusen mark. Studien är särskilt relevant eftersom den behandlar kombinationen av stamskador, körskador och markens bärighet under icke-frusna förhållanden.

Fjeld och Granhus (1998) studerade skador efter selektiv avverkning i flerskiktade granbestånd i Norge och analyserade hur operativt system och avverkningssintensitet påverkade skadefrekvensen. Studien är en central nordisk referens för skador i kvarvarande bestånd efter maskinella ingrepp. Granhus och Fjeld (2001) studerade den rumsliga fördelningen av skador på granföryngring efter selektiv avverkning. I senare sammanställningar anges att skadenivån i sådana bestånd främst påverkas av uttagsnivå och avstånd till stickväg eller körstråk. Dessa norska resultat är inte helt identiska med konventionell gallring i likåldriga bestånd, men de är relevanta eftersom mekanismerna är desamma: kvarvarande träd skadas framför allt nära körstråk och där uttaget är stort.

Norska och finska studier av selektiv avverkning visar också att skaderisken ökar i täta, flerskiktade bestånd där fällda träd och maskinrörelser har svårt att undvika underväxt och kvarvarande huvudstammar. Sirén m.fl. (2015) visade i en nordisk kontext att mekaniserad selektiv avverkning i olikåldriga grandominerade bestånd kan ge trädskador, och studien bygger vidare på tidigare arbeten (Fjeld & Granhus 1998, Granhus & Fjeld 2001).

Marskadur vid gallring uppstår främst genom skördarens och framför allt skotarens körning i stickvägar. De vanligaste skadeformerna är hjulspår, markdeformation, kompaktering, syrebrist och rotskadur längs körstråken. Skogforsk och Skogsstyrelsen beskriver körskadur som ett centralt problem eftersom de kan påverka både mark, vattenmiljö, rötter och kvarvarande träd.

Edlund (2012) behandlar drivning på mjuka marker i boreal skog och visar att markens bärighet, maskinens marktryck, körningens upprepning och tekniska lösningar är centrala faktorer för risken för marskadur. Avhandlingen är särskilt relevant för gallring eftersom skotning i gallringsbestånd ofta sker med upprepade transporter längs samma stickvägar, vilket ökar risken för kompaktering och spårbildning på fuktiga marker.

Sirén m.fl. (2013) visar att gallring i granskog på ofrusen mark kan orsaka både skadur på kvarvarande träd och marskadur. I anslutning till studien anges att cirka 12,5 % av det avverkade området utanför försöksytan var täckt av körspår, och att kompaktering på primära stickvägar inte kunde undvikas enbart genom sänkt däcktryck, medan lägre däcktryck kunde minska kompaktering på sekundära stickvägar som passerades mer sällan.

Marskadur är svårare att koppla direkt till produktionsförlust än stam- och rotskadur, eftersom effekten ofta uppstår indirekt genom försämrad rotmiljö, syrebrist och skadur på finrötter. Svenska studier och sammanställningar visar att mer omfattande körskadur kan ge produktionsreduktioner i storleksordningen 5–15 m³/ha under en tioårsperiod (Kardell 1978, Andersson 1980, Wallentin 2007). Storleken på förlusten varierar dock kraftigt beroende på marktyp, fuktighet, skadans omfattning och hur stor del av beståndsarealen som påverkas.

Wallentin och Nilsson (2014) är en av de tydligaste svenska kvantitativa studierna av storm- och snöskador efter gallring. I ett 33-årigt granbestånd i sydvästra Sverige jämfördes ogallrad kontroll, normal gallring och hård gallring med 0, 30 respektive 61 procent uttag av grundyta. Efter den första stormen skadades 7 procent av stående grundyta i kontrollen, 42 procent i normalt gallrade ytor och 74 procent i hårt gallrade ytor. Efter både storm- och snöskador var motsvarande skadeandelar 8, 53 respektive 89 procent. Detta är ett centralt resultat eftersom det visar att den största volymförlusten efter gallring inte alltid orsakas av direkta maskinskadorna, utan kan uppstå som en indirekt effekt av ökad storm- och snökänslighet.

Valinger och Pettersson (1996) studerade vind- och snöskador i ett gallrings- och gödslingsförsök i grandominerade bestånd i södra Sverige. Studien visade att gallrade bestånd kan vara känsliga för skador från vind och snö, särskilt när beståndet nyligen har öppnats upp och träden ännu inte hunnit anpassa sig till förändrad exponering. Valinger m.fl. (1994) studerade på liknande sätt vind- och snöskador i gallrings- och gödslingsförsök i tall, och lyfts av Nilsson m.fl. (2010) fram som en viktig svensk studie av skadeeffekter efter gallring. Studien visade att även tallbestånd kan påverkas av vind- och snöbelastning efter skötselåtgärder. Även om tall generellt är mer stormfast än gran kan snöskador förekomma, särskilt i yngre och täta bestånd där kron- och stamform kan öka risken för snöbrott.

Skogforsk (Grönlund m.fl. 2015) har också undersökt skador efter tidig gallring i täta tallungskogar. I fjorton täta men välröjda tallbestånd rapporterades knappt 1 procent avverkningsskador efter förstagallringen, men cirka 1 procent av stammarna per år drabbades av snö- och vindskador. Resultatet visar att direkt maskinskada kan vara låg i väl genomförd gallring, medan följdskador från vind och snö ändå kan bli betydelsefulla över tid.

Rönnerberg m.fl. (2013) studerade förekomst av rotticka efter olika gallringsregimer i gran i södra Sverige. Försöket etablerades 1961 och slutavverkades 2001, vilket ger en ovanligt lång uppföljningstid. Studien rapporterar 44 procent genomsnittlig rötfförekomst och att rotticka identifierades i 85 procent av rötskadorna. Detta visar att röta bör betraktas som en långsiktig produktions- och volymfråga, även om skadan inte alltid kan kopplas till en enskild gallring.

Mattila och Nuutinen (2007) studerade förekomsten av rotröta i gran i södra Finland. Studien behandlar sannolikheten för skador av rotticka och anger att rotröta är starkt kopplad till ståndort, riskområde och beståndsegenskaper. I en senare sammanställning anges att rotticka står för nästan 90 procent av den totala rötvolymen i gran i södra Finland, vilket understryker patogenens betydelse för långsiktig volymförlust.

Övergripande resultat från kvantitativ sammanställning

Den kvantitativa sammanställningen (Tabell 7 & Figur 2) visar att direkta maskinskadorna i väl genomförd gallring oftast ligger på en relativt låg nivå, vanligen omkring 1–5 procent av kvarvarande träd. Detta gäller framför allt svenska och finska inventeringar av stamskadorna efter gallring, exempelvis Andersson (2011) och Lindsköld (2016). Samtidigt visar äldre finska skadeförsök att allvarliga stam- och rotskadorna kan ge betydande tillväxtförluster hos de träd som skadas.

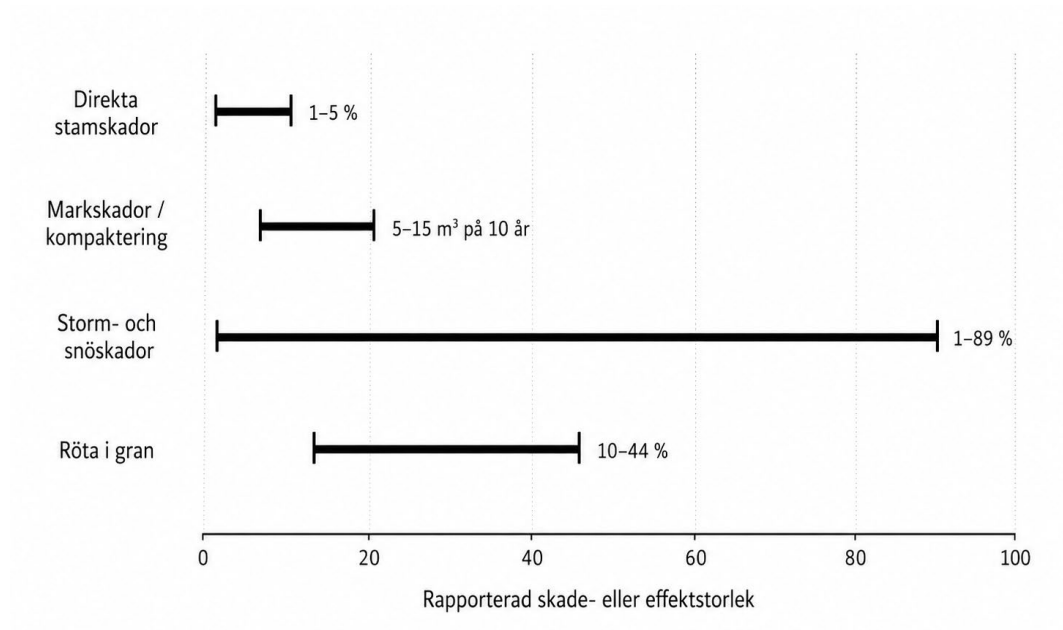
Tabell 7. Kvantitativ sammanställning Metaanalysliknande syntes per skadekategori

Skadekategori	Rapporterad effekt		Samlad tolkning
	Lägsta	Högsta	
Direkta maskinskador på stam	<1–3 % i väl utförda eller tidiga gallringar	omkring 5 % eller mer vid sämre förhållanden	Direkta skador är ofta begränsade, men påverkas starkt av maskinförare, stickvägar, beståndstäthet och terräng.
Rotskador och rothalsnära skador	Låg frekvens i vissa inventeringar	Stor tillväxtpåverkan på svårt skadade träd	Rotskador är färre men mer allvarliga än många stamskador, särskilt i gran.
Markskador och kompaktering	Begränsad påverkan på bäriga marker	ca 5–15 m ³ /ha produktionsreduktion under tio år i vissa fall	Markskador är starkt platsberoende och svåra att kvantifiera, men kan ge betydande lokal produktionsförlust.
Storm- och snöskador	ca 1 % per år i vissa tallbestånd	89 % skadad grundyta i hårt gallrat granförsök	Storm och snö kan ge de största volymförlusterna efter gallring, särskilt i gran och vid hård gallring.
Röta	Låg påverkan i lågriskbestånd	44 % rötförekomst i svenskt granförsök	Viktigaste faktorn är obehandlade stubbar under "sporspridningstid",

Markskador och stickvägar var svårare att sammanställa kvantitativt eftersom studierna använde olika mått, exempelvis spårdjup, andel körspårstäckt areal, stickvägsbredd eller kvalitativa markskadeklasser. De tillgängliga resultaten visar dock att markskador kan ge produktionsförluster i storleksordningen 5–15 m³ under en tioårsperiod i vissa svenska sammanställningar, medan Sirén m.fl. (2013) visar att gallring av gran på ofrusen mark kan ge betydande körspår och kompaktering. Markskador bör därför ses som en skadegrupp där den omedelbara skadefrekvensen ofta underskattar den långsiktiga produktionspåverkan.

De största rapporterade volymförlusterna återfanns i studier av storm- och snöskador efter gallring. Wallentin och Nilsson (2014) visade att skadad grundyta efter storm och snö i ett svenskt granförsök ökade från 8 procent i ogallrad kontroll till 53 procent i normalt gallrade ytor och 89 procent i hårt gallrade ytor. Detta visar att gallringsstyrka kan ha mycket stor betydelse för framtida volymrisk, särskilt i granbestånd.

Röta utgjorde den tydligaste långsiktiga följdskadan. Rönnberg m.fl. (2013) rapporterade 44 procent rötförekomst i ett långliggande svenskt granförsök och att rotticka identifierades i 85 procent av rötskadorna. Mattila och Nuutinen (2007) visade på motsvarande sätt att rotröta är en betydande skadefaktor i gran i södra Finland. Den största och viktigaste inkörsporten för rotticka är färsk stubbytor. För att minska risken för angrepp kan man ytbehandla stubbarna om gallring sker under vegetationsperioden eller att gallring sker om vintern. Sammantaget visar detta att gallringsskador i gran inte enbart bör bedömas utifrån omedelbar skada efter avverkning, utan också utifrån risken för röta och framtida volymförlust.



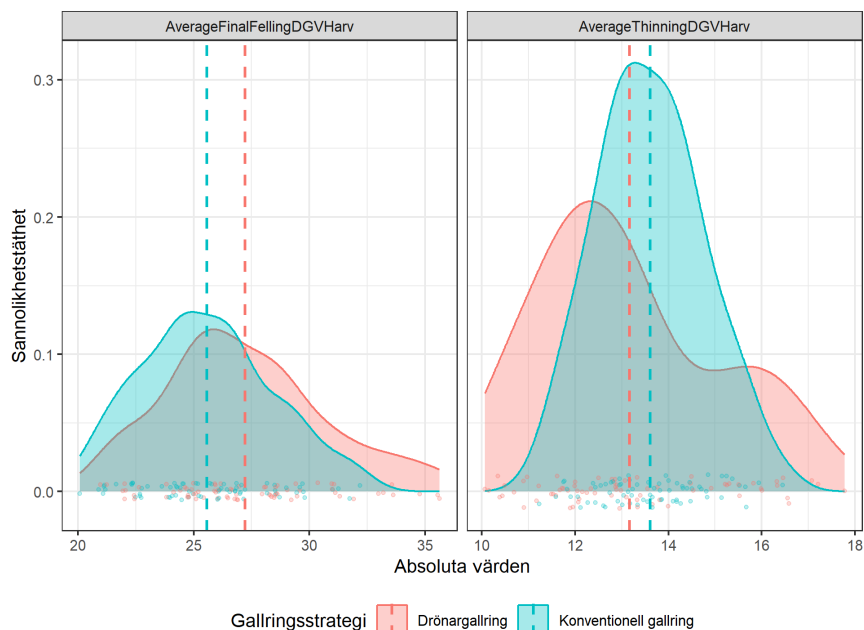
Figur 2. Sammanfattande syntes av rapporterade skade- och effektstorlekar för olika skadekategorier. Intervallen är en syntes av heterogena studier. Olika måttenheter förekommer i underlaget och figuren ska tolkas illustrativt.

Simulering av olika gallringsstrategier med Heureka PlanVis

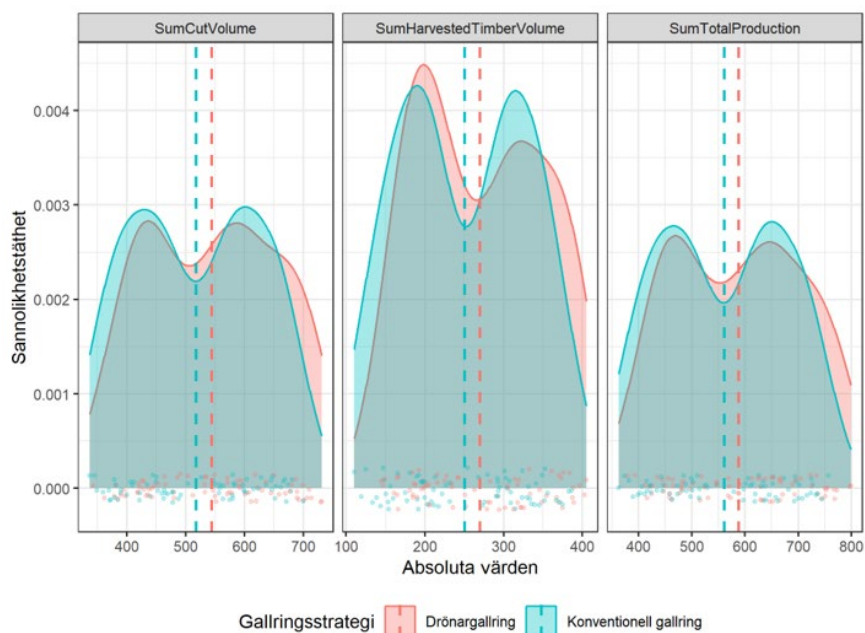
Skillnaden mellan konventionell gallring och drönargallring undersöktes dels genom att visuellt visa skillnaden mellan strategierna i sannolikhetstäthetsfigurer för ett antal olika variabler, dels genom att anpassa en linjär modell.

Drönargallringen, som den är simulerad i Heureka PlanVis, genomfördes i snitt med 2,5 gallringar jämfört med en (1) i den konventionella gallringen. Gallringsstyrkan blev i medel (volymvägd) 14 procent för drönargallring jämfört med 28 procent för konventionell.

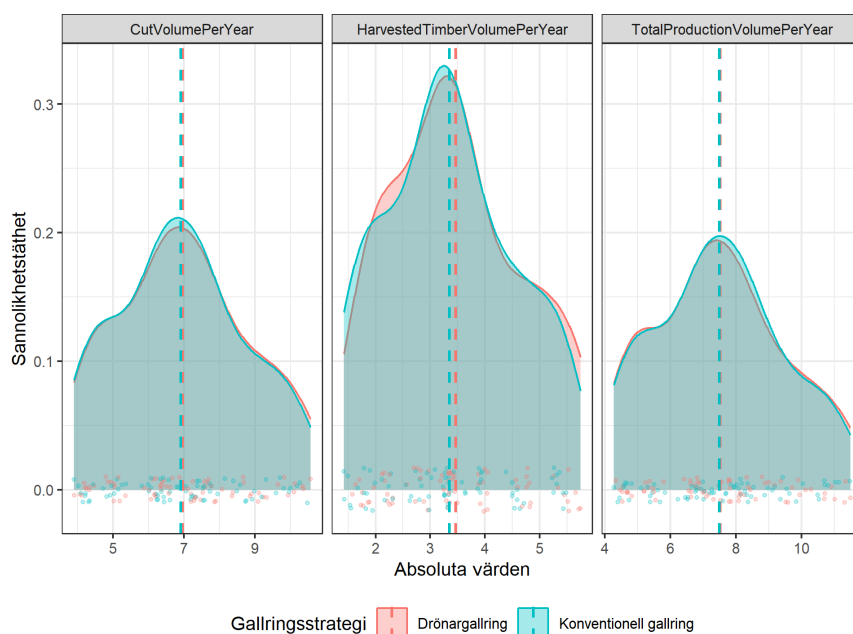
Drönargallringen resulterade i att något klenare träd tas ut i gallring (-3,5 %), men grövre i slutavverkningen (+6,6 %) (Figur 3). Vad gäller total volymproduktion över en omloppstid resulterar drönargallring i större nettovolymproduktion (+5,6 %), nettovolymproduktion av timmer (+9,5 %) och bruttovolymproduktion (+5 %) (Figur 4). Men eftersom omloppstiderna tilläts vara olika för de olika strategierna kan det vara mer relevant att jämföra normaliserade produktionsvärden (per år). Drönargallringen gav nämligen i snitt 2,8 år längre omloppstider. Efter normalisering gav drönargallring endast 0,7 procent högre nettovolymproduktion och 0,2 procent högre bruttovolymproduktion (Figur 5). För timmer ger drönargallring dock i 4,2 procent högre nettovolymproduktion, och jämför man enbart slutavverkningar blir ökningen för timmer 9 procent.



Figur 3. Sannolikhetstäthetsfördelningar och medelvärden för volymvägda medeldiametern (cm) i slutavverkning (vänster) respektive gallring (höger). De streckade linjerna visar respektive fördelnings medelvärden. Punkterna längs med x-axeln är resultatet för respektive strategi i varje bestånd.



Figur 4. Sannolikhetstäthetsfördelningar och medelvärden för den nettovolymproduktionen ($\text{m}^3\text{sk/ha}$, vänster), nettovolymproduktionen av timmer ($\text{m}^3\text{fub/ha}$, mitten) samt bruttovolymproduktionen inklusive avgång ($\text{m}^3\text{sk/ha}$, höger). De streckade linjerna visar respektive fördelnings medelvärden. Punkterna längs med x-axeln är resultatet för respektive strategi i varje bestånd.



Figur 5. Sannolikhetstäthetsfördelningar och medelvärden för nettovolymproduktionen per år ($\text{m}^3\text{sk/ha år}$, vänster), nettovolymproduktionen av timmer ($\text{m}^3\text{fub/ha år}$, mitten) och bruttovolymproduktionen inklusive avgång ($\text{m}^3\text{sk/ha år}$, höger). De streckade linjerna visar respektive populations medelvärden.

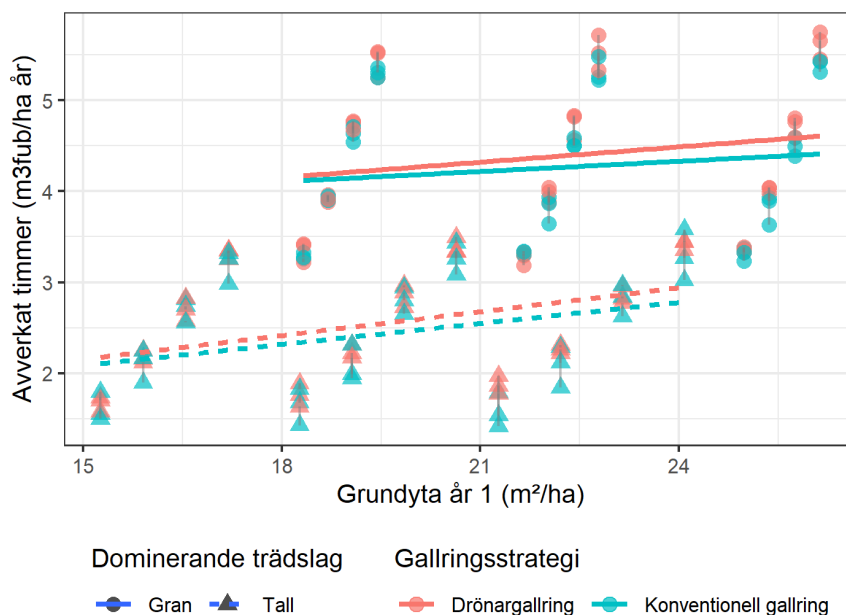
Eftersom det är möjligt att ståndortsfaktorer och beståndsegenskaper påverkar jämförelserna undersöktes även detta. Total avverkning av timmer hade en positiv korrelation med ståndortsindex, och det fanns en visuell skillnad i lutning och avstånd mellan strategierna (Figur 6). Drönargallringseffekten varierade mest för gran. Samma förhållanden, men med en svagare korrelation gäller för grundyta (Figur 6). Antal stammar per hektar hade en svag negativ korrelation (Figur 7) medan ståndortsindex hade en stark positiv korrelation (Figur 8).

En linjär modell för dessa variabler sattes upp och anpassades för att undersöka sambanden noggrannare. Den resulterande modellen blev:

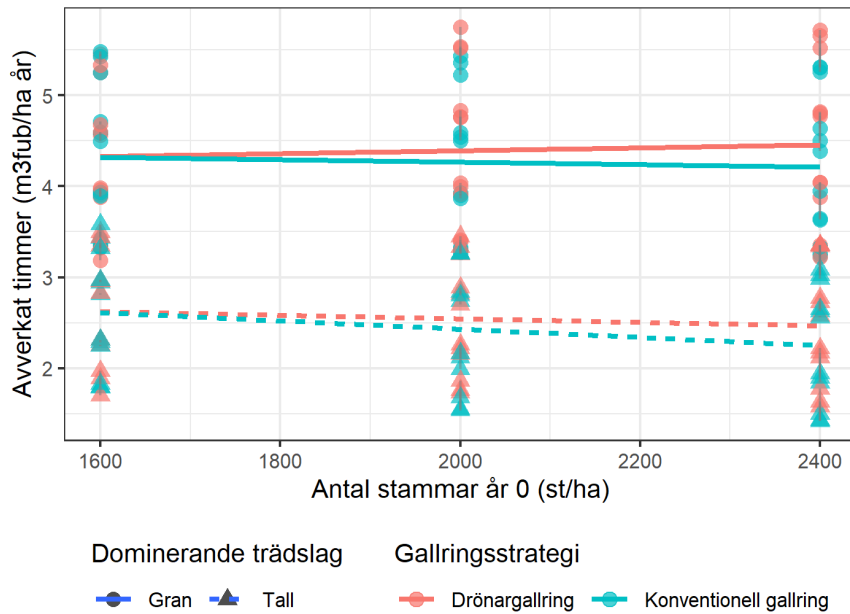
$$y = 2,23 + 0,12 * D + 0,03 * GY_{Medel} + 0,05 * GY_{Hög} - 0,57 * Tall + 0,47 * SI_{24} + 1,08 * SI_{26} + 1,64 * SI_{28} + 2,38 * SI_{30} + 3,18 * SI_{32} - 0,04 * N_{2000} - 0,14 * N_{2400}$$

där y är den avverkade timmervolymen per hektar år, D är en indikator som blir 1 om drönargallring använts, $GY_{Medel, Hög}$ är en indikator som blir 1 om grundytan hör till någon av klasserna Medel eller Hög (annars antal klass Låg), $Tall$ är en indikator som blir 1 om dominerande trädslag är tall (annars antas gran), SI_{24-32} en indikator som blir 1 om ståndortsindex är i någon av klasserna 24, 26, 28, 30 eller 32 m (annars antas 22 m) och $N_{2000,2400}$ är indikator som blir 1 om stamantalet är i någon av klasserna 2000 eller 2400 (annars antas 1600). Övriga klasser ingår i interceptet. Inga signifikansnivåer rapporteras eftersom de data som modellen bygger på är simulerat och därmed inte innehåller tillräcklig stor variation för att en sådan analys ska ge något värde (White *m.fl.*, 2014).

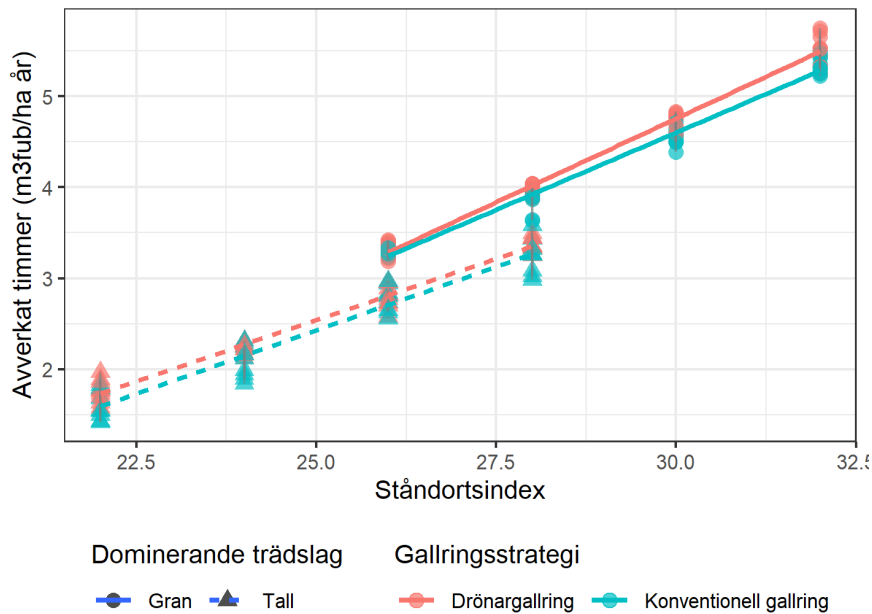
Det justerade medelvärdet för konventionell gallring visar en timmervolymproduktion på 3,37 m³fub/ha år om man kontrollerar för grundyta, trädslag, ståndortsindex och stamantal. Motsvarande värde för drönargallring är 3,49 m³fub/ha år vilket är en ökning med 3,6 procent.



Figur 6. Samband mellan grundyta (m²) och avverkat timmer per år (m³fub/ha år) för bestånd med olika dominerande trädslag (gran: cirklar; tall: trianglar) och gallringsstrategier. Heldragna linjer visar skattade linjära samband för granbestånd och streckade linjer motsvarande samband för tallbestånd.



Figur 7. Samband mellan antal stammar (st/ha) och avverkat timmer per år ($\text{m}^3\text{fub/ha år}$) för bestånd med olika dominerande trädslag (gran: cirklar; tall: trianglar) och gallringsstrategier. Heldragna linjer visar skattade linjära samband för granbestånd och streckade linjer motsvarande samband för tallbestånd.



Figur 8. Samband mellan ståndortsindex (m) och avverkat timmer per år ($\text{m}^3\text{fub/ha år}$) för bestånd med olika dominerande trädslag (gran: cirklar; tall: trianglar) och gallringsstrategier. Heldragna linjer visar skattade linjära samband för granbestånd och streckade linjer motsvarande samband för tallbestånd.

Fjärranalys: Potentiella gallringsarealer i svåråtkomlig terräng

Resultatet från GIS-analyserna visar att den största potentialen för drönarbaserad gallring finns i brant terräng. Inom denna kategori identifierades drygt 570 000 hektar ej formellt skyddad skogsmark, vilket gör den till den klart största tillgängliga arealen i analysen. Den stående virkesvolymen var också störst i denna kategori, med över 94 miljoner m³sk. Samtliga areal- och volymvärden redovisas i Tabell 8.

Myrholmar utgjorde en betydligt mindre potentiell areal. Den ej skyddade skogsmarksarealen uppgick till cirka 92 000 hektar och den stående virkesvolymen var låg i jämförelse med brant terräng. Resultatet visar därmed att myrholmar kan vara relevanta för drönarbaserad avverkning, men i betydligt mindre omfattning.

De formellt skyddade arealerna var mindre än de ej skyddade inom båda analyserna. Dessa ytor redovisas separat eftersom de normalt inte utgör samma praktiska potential för avverkning. Sammantaget visar resultatet att ej formellt skyddad brant terräng är den mest betydande miljön för framtida användning av drönare i avverkning, medan myrholmar utgör en mer begränsad kompletterande potential.

Tabell 8. Arealer och stående virkesvolym för de två analyserna Brant terräng (BT) och Myrholmar (MH), uppdelat på formellt skyddad respektive ej formellt skyddad skog.

Analys	Skogsmark (tusental Ha)	Stående volym (miljoner m ³ sk)	Volym m ³ sk/ha
Brant terräng >20°			
Ej skyddad	570,3	94,2	165
Skyddad	112,7	16,8	149
Myrholmar			
Ej skyddad	92,0	3,6	39
Skyddad	28,0	1,3	45

Samlad jämförelse mellan konventionell gallring och drönargallring.

Tabell 9. Sammanslagen (litteraturstudier & Heureka-simulering) jämförelse mellan konventionell gallring och drönargallring.

Jämförelse	Konventionell	Drönare	Effekt	Betydelse
Stickvägar	Kräver permanenta stickvägar	Inga eller kraftigt minskade stickvägar	Undviker ca 8–10 % tillväxtförlust över tio år	Största direkta produktionsvinsten är att produktiv areal bibehålls.
Markskador	Risk vid skotning och upprepade körning	Minskad markkontakt	Minskad risk för 5–15 m ³ /ha volymförlust under tio år	Särskilt viktig effekt på fuktiga och känsliga marker.
Rotskador	Risk nära stickvägar och körstråk	Minskad mekanisk rotpåverkan	Lägre risk för ca 5–15 % skadeeffekt	Kan minska röta, instabilitet och långsiktig tillväxtnedsättning.
Stamskador	Risk vid kranarbete, körning och svängar	Potentiellt lägre fysisk kontakt	Lägre risk än ca 1–5 % skadefrekvens	Främst betydelse för kvalitet och framtida rötrisk.
Röta	Ökad risk efter stam- och rotskador	Lägre risk genom minskad mekanisk skada	Kan minska risk för 20–50 % värde-/volymförlust vid rötskador	Viktig långsiktig effekt, ytbehandling av stubbytor minskar risk oavsett metod
Stormskador	Ökad risk efter hård gallring och vid instabila bestånd	Möjliggör svagare och mer upprepade ingrepp	Skadad grundyta 1–89 %	En av de största potentiella volymförlusterna, särskilt i granbestånd efter stark gallring.
Snöskador	Ökad risk vid glesare och mer exponerade bestånd	Lägre risk genom försiktigare gallringsstrategi	Kan ge hög skadad grundyta vid hård gallring	Betydande risk för ackumulerad volymförlust, särskilt i utsatta bestånd och efter kraftiga ingrepp.
Gallringsstrategi	Ofta färre och kraftigare ingrepp	Möjliggör fler svagare ingrepp	Lägre risk för produktionsbortfall	Svagare gallring ger normalt mindre volymförlust än stark gallring.
Nettovolym/omloppstid	Referens	Alternativt	+5,6 %	Högre total nettovolym över omloppstiden.
Nettotimmervol./omloppstid	Referens	Alternativt	+9,5 %	Tydligaste positiva effekten i simuleringen.
Nettovolym/år	Referens	Alternativt	+0,7 %	Liten skillnad när resultatet normaliseras per år.
Nettotimmer/år	Referens	Alternativt	+4,2 %	Starkast kvarstående produktionsfördel efter tidsnormalisering.
Omloppstid	Kortare referensscenario	Längre alternativt scenario	+2,8 år	En del av volymökningen förklaras av längre produktionstid.

Diskussion

Resultaten visar att drönargallringens främsta potential ligger i att minska produktionsförluster och förbättra värdeutbytet, snarare än att generellt öka den biologiska totalproduktionen per hektar. Gallring innebär i grunden att tillväxten omfördelas från fler träd till färre och grövre träd. En ökad diameterutveckling och en större andel timmer kan därför uppnås utan att den totala volymproduktionen nödvändigtvis ökar. Drönargallring bör därför främst betraktas som ett möjligt skogsskötselsystem för att minska produktionsbortfall och begränsa framtida skaderisker kopplade till stickvägar, markpåverkan, skador och starka gallringsingrepp.

Den tydligaste skillnaden mellan konventionell gallring och drönargallring är behovet av stickvägar. Konventionell maskinell gallring kräver att delar av beståndet tas ur produktion för att skapa åtkomst för skördare och skotare. Stickvägarna innebär inte bara ett direkt bortfall av stamförande areal, utan påverkar också hur gallringsuttaget fördelas i beståndet. Drönargallringens möjlighet att minska eller helt undvika stickvägar tidigt i omloppstiden framstår därför som en av teknikens mest robusta produktionsmässiga fördelar. Det innebär att den potentiella volymökningen framför allt bör förstås som bibehållen produktionsförmåga och minskat bortfall, snarare än som en ny tillväxteffekt.

Heurekasimuleringarna stödjer bilden av att drönargallring främst påverkar produktionen genom en annan skötselstrategi. Den simulerade drönargallringen gav fler men svagare ingrepp än den konventionella strategin. Det innebär att beståndet kan hållas i produktion med mindre kraftiga förändringar i grundytta och konkurrensförhållanden. Resultaten pekar på att detta kan gynna timmerproduktionen och dimensionsutvecklingen, medan effekten på total årlig volymproduktion är mer begränsad. Detta stärker slutsatsen att drönargallringens största produktionsmässiga värde sannolikt ligger i högre timmerutbyte och minskade förluster, inte i en kraftigt ökad totalvolym.

Möjligheten till svagare och mer återkommande gallringar är särskilt intressant eftersom litteraturen i rapporten visar att starka gallringar ofta innebär större risk för produktionsförlust än svaga ingrepp. Drönargallring kan i teorin skapa ett mer flexibelt gallringsprogram där uttaget anpassas mer successivt till beståndets utveckling. Detta kan minska risken för att beståndet efter gallring hamnar på en för låg produktionsnivå. Samtidigt är denna typ av skötselregim fortfarande relativt oprövad i långsiktiga fältförsök. Den bör därför ses som en lovande men osäker utvecklingsväg, snarare än som en färdig skötselmodell.

En central begränsning är att dagens tillväxtmodeller huvudsakligen bygger på historiska försök med mer traditionella gallringsprogram. Mycket svaga och återkommande gallringar utan stickvägar ligger delvis utanför det empiriska underlag som modellerna är kalibrerade för. Heurekasimuleringarna ska därför tolkas som scenarier som visar möjlig riktning och storleksordning, inte som säkra prognoser för all gallringsskog. För att minska osäkerheten behövs fältförsök där drönargallring följs över tid och där resultaten används för att utveckla och kalibrera befintliga tillväxtmodeller.

Skador på träd och mark är en annan viktig del av drönargallringens potential. Vid konventionell gallring kan skador uppstå genom körning, kranarbete, fällning och skotning. Alla skador leder inte till mätbar produktionsförlust, men skador nära rothalsen, rotskador, markpåverkan och röta kan få betydelse över längre tid. Drönargallring kan minska vissa av dessa risker genom att reducera markkontakt och

minska behovet av maskinrörelser inne i beståndet. Den största och viktigaste inkörsporten för rotticka är färsk stubbytor oavsett drönargallring eller konventionell gallring. För att minska risken för angrepp kan man ytbehandla stubbarna om gallring sker under vegetationsperioden eller att gallring sker om vintern. Den faktiska betydelsen för produktion och virkesvärde är dock svår att bedöma utan långsiktig uppföljning. Skadefrekvens direkt efter gallring är inte tillräckligt; det är effekten på tillväxt, timmerkvalitet och användbar volym som är avgörande.

Särskilt i granbestånd kan skador få långsiktiga konsekvenser genom röta och ökad instabilitet. Hårda gallringsangrepp kan dessutom påverka risken för storm- och snöskador. Om drönargallring gör det möjligt att gallra svagare och mer selektivt kan detta bidra till att minska vissa stabilitetsrisker. Samtidigt påverkas storm- och snöskador av många faktorer som inte kan styras av gallringssystemet ensamt, exempelvis beståndshöjd, markförhållanden, trädslag, tidigare skötsel och väderhändelser. Denna del av potentialen bör därför tolkas försiktigt.

GIS-analysen visar att drönargallring också kan ha betydelse genom att öka tillgängligheten till bestånd där konventionell gallring är tekniskt svår, dyr eller förenad med hög risk för skador. Brant terräng framstår som den mest intressanta arealtypen i analysen, medan myrholmar utgör en mer begränsad men principiellt relevant kategori. Det är dock viktigt att skilja mellan geografisk potential och praktiskt realiserbar potential. Den stående volym som identifieras i en GIS-analys är inte detsamma som gallringsbar volym. Den faktiska möjligheten att nyttja dessa arealer beror på gallringsbehov, beståndsålder, naturvärden, markäggande, logistik, väderförhållanden, teknikens kapacitet och ekonomiska förutsättningar.

Teknikutvecklingen blir därför avgörande för om den skogliga potentialen kan omsättas i praktisk nytta. Drönargallring är inte enbart en skogsskötselmetod utan ett tekniskt system som måste fungera under varierande förhållanden i komplexa skogsmiljöer. Centrala utvecklingsområden är lyftkapacitet, energiförsörjning, grip- och kapteknik, stabilisering, positionering, autonom navigering, säkerhet och samspel mellan flera drönare. En systematisk översikt över UAV i skogliga operationer visar att tekniken har potential för planering, uppföljning och operativt beslutsstöd, men också att flygtid, hinder i skogsmiljö, databehandling och standardiserade arbetsflöden fortfarande är viktiga begränsningar (Ojha, 2026).

Den pågående teknikutvecklingen visar att drönargallring håller på att förflyttas från koncept till praktisk testning. Swedish AirForestry Pilot Project, där AirForestry samarbetar med Holmen, SCA, Stora Enso och Sveaskog, är ett exempel på hur tekniken nu prövas i mer operativa sammanhang. Projektet är inriktat på att vidareutveckla, testa och utvärdera drönarbaserad teknik för gallring. Sådana pilotförsök är viktiga eftersom de kan ge kunskap om driftsäkerhet, arbetsorganisation, produktivitet, kostnader och tekniska begränsningar under verkliga förhållanden. För att bli vetenskapligt användbara bör försöken kopplas till standardiserad datainsamling före, under och efter gallring (AirForestry 2026, SCA 2026, Sveaskog 2026).

Utvecklingen av fjärranalys, AI och automatiserat trädval är också central. En förutsättning för drönargallring är att rätt träd kan identifieras, avverkas och transporteras ut med hög precision (Perry m.fl. 2026). UAV-baserade system används redan inom flera delar av skogsbruket, bland annat för datainsamling, uppföljning av markpåverkan och analys av operativa förhållanden. För drönargallring behöver dessa tekniker integreras med skogliga beslutsmodeller så att trädvalet kan optimeras utifrån produktion, stabilitet, kvalitet, naturhänsyn och framtida beståndsutveckling. Nyare forskning om LiDAR-baserat trädval och optimering visar att automatiserade metoder

kan användas för att stödja urval av gallringsträd, men sådana metoder behöver anpassas till nordiska bestånd, operativ gallring och drönarbaserad avverkning (Lee m.fl. 2025, Ojha 2026).

En viktig metodologisk begränsning i studien är att de olika analyserna beskriver olika delar av potentialen. Litteraturstudierna visar biologiska samband och risker, Heureka-simuleringarna visar möjliga skötselutfall och GIS-analysen visar geografisk tillgänglighet. Dessa delar kompletterar varandra, men de kan inte summeras till ett enda mått på möjlig volymökning. Det är därför inte metodiskt lämpligt att addera minskade stickvägsförluster, minskade skador och tillkommande arealer till ett samlat volymtal. Den samlade tolkningen bör i stället vara att drönargallring kan ge störst nytta där flera fördelar sammanfaller.

Den mest sannolika nyttan är högre timmerproduktion, minskade volymförluster, begränsning av framtida skaderisker, lägre markpåverkan och ökad tillgänglighet till vissa svåråtkomliga bestånd. För att bedöma teknikens verkliga betydelse krävs långsiktiga jämförande fältförsök där biologiska effekter, teknisk prestanda och ekonomi studeras tillsammans.

Slutsatser

Resultaten visar att drönargallring har en tydlig potentiell produktionsnytta, men främst genom minskade förluster snarare än genom en generell ökning av den biologiska totalproduktionen. Den största potentialen ligger i att undvika stickvägar, möjliggöra svagare återkommande gallringar, minska risken för mark- och trädskador samt öka tillgängligheten till svåråtkomliga gallringsarealer. Resultaten bör samtidigt tolkas som indikativa, eftersom analyserna bygger på litteraturredata, idealiserade simuleringar och GIS-baserade arealberäkningar.

De viktigaste slutsatserna är:

- Drönargallring kan minska produktionsförluster genom att undvika eller reducera stickvägar.
- Den största produktionsvinsten bedöms ligga i bibehållen produktiv areal och ökad timmerandel, inte i kraftigt ökad totalvolym per år.
- Svagare och fler återkommande gallringar kan minska risken för tillväxtförluster samt begränsa risken för framtida vind- och snöskador jämfört med färre och starkare ingrepp.
- Minskad markkontakt kan reducera risken för markskador, rotskador och stamskador på kvarvarande träd.
- Brant terräng och andra svåråtkomliga miljöer utgör en viktig potentiell arealresurs för tekniken.
- Den praktiskt realiserbara volymökningen är osäker och beror på beståndsförhållanden, teknikens kapacitet, ekonomi, logistik och naturvårdshänsyn.

Referenser

- Agestam, E. 2015. *Gallring*. Skogsstyrelsen (Skogsskötselserien). Tillgänglig vid: <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/mer-om-skog/skogsskotselserien/skogsskotsel-serien-7-gallring.pdf> (Åtkomstdatum: 19 maj 2026).
- AirForestry. 2026. *Thinning from above: Leading forestry companies and AirForestry in groundbreaking collaboration*. Tillgänglig vid: <https://airforestry.com/blog/2026/05/27/thinning-from-above-forest-industry-and-airforestry-in-groundbreaking-collaboration/> (Åtkomstdatum: 07 juli 2026).
- Andersson, A.-S. 2011. "Stamskador i gallringsbestånd". SLU, School for Forest Management. Tillgänglig vid: <http://stud.epsilon.slu.se/3744/> (Åtkomstdatum: 11 maj 2026).
- Andersson, L. 1980. *Skador efter körning med tunga maskiner i gallring. Omfattning, orsaker och effekter på beståndets tillväxt och kvalitet – en litteraturstudie*. SLU, Institutionen för skogsskötsel.
- Borenstein, M., Hedges, L.V., Higgins, J.P. & Rothstein, H.R. 2009. *Introduction to meta-analysis*. John Wiley & Sons.
- Braastad, H. & Tveite, B. 2001. *Tynning i gran- og furubestand. Effekt av tynning på volumproduksjon, middeldiameter og diameter av de 800 grøste trær per ha*. Rapport fra Skogforskningen 10/01. Ås: Norsk institutt for skogforskning. Tillgänglig vid: <https://agris.fao.org/search/en/providers/125329/records/6748e3c27625988a37219835> (Åtkomstdatum: 03 juni 2026).
- Cedergren, J., Djupström, L., Eliasson, L., Fredriksson, E., Persson, M. & Öhrn, P. 2024. *Aerial drones for thinning - a desk study*. Arbetsrapport 1225–2024. Skogforsk.
- De Castro Segtowich, A. 2025. *Thinning strategies and their impact on growth dynamics, allocation patterns and water use efficiency in Scots pine stands*. Swedish University of Agricultural Sciences (Acta Universitatis Agriculturae Sueciae). Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.54612/a.4cosifpl24>.
- Edlund, J. 2012. "Harvesting in the boreal forest on soft ground", *Rapport/Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning och geomatik* [Preprint], (20). Tillgänglig vid: <http://pub.epsilon.slu.se/id/eprint/9171> (Åtkomstdatum: 27 maj 2026).
- Eliasson, L., Adolfsson, G., Ling, E. & Thor, M. 2025. *Kostnader, intäkter, lönsamhet, produktivitet och kvalitet på utförda åtgärder i svenskt skogsbruk*. Arbetsrapport från Skogforsk 1231–2025. Skogforsk, s. 1–82.
- Fahlvik, N. 2005. *Aspects of precommercial thinning in heterogeneous forests in southern Sweden*. Alnarp: Southern Swedish Forest Research Centre, Swedish University of Agricultural Sciences (Acta Universitatis agriculturae Sueciae, 2005:68).
- Fahlvik, N., Elfving, B. & Wikström, P. 2014. "Evaluation of growth functions used in the Swedish Forest Planning System Heureka", *Silva Fennica*, 48(2). Tillgänglig vid: <https://www.silvafennica.fi/article/1013> (Åtkomstdatum: 09 juni 2026).

- Fjeld, D. & Granhus, A. 1998. "Injuries after selection harvesting in multi-stored spruce stands—the influence of operating systems and harvest intensity", *International Journal of Forest Engineering* [Preprint]. Tillgänglig vid: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/30185> (Åtkomstdatum: 27 maj 2026).
- Fridman, J. & Nilsson, P. 2025. "Skogstillståndets utveckling sedan 1993", *Arbetsrapport/Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning* [Preprint], (558). Tillgänglig vid: <https://pub.epsilon.slu.se/id/eprint/36526/contents> (Åtkomstdatum: 19 maj 2026).
- Granhus, A. & Fjeld, D. 2001. "Spatial distribution of injuries to Norway spruce advance growth after selection harvesting", *Canadian Journal of Forest Research*, 31(11), s. 1903–1913. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1139/x01-103>.
- Grönlund, Ö., Wide, M.I., Hjerpe, T., Sonesson, J. & Jacobson, S. 2015. *Skador på kvarvarande träd efter tidig gallring - Omfattning och orsaker*. Arbetsrapport från Skogforsk 871–2015. Skogforsk.
- Isomäki, A. & Kallio, T. 1974. "Consequences of injury caused by timber harvesting machines on the growth and decay of Spruce (*Picea abies* (L.) Karst)." Tillgänglig vid: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19740617953> (Åtkomstdatum: 27 maj 2026).
- Jacobsson, S., Pettersson, F., Sikström, U., Nyström, K. & Övergaard, B. 2008. *INGVAR - gallringsmall och planeringsinstrument*. Resultat från Skogforsk 10–2008. Skogforsk.
- Kardell, L. 1978. "Traktorskador och tillväxtförluster hos gran – analys av ett 10-årigt försök.", *Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift*, 76(3), 305–322.
- Koricheva, J., Gurevitch, J. & Mengersen, K. 2013. *Handbook of meta-analysis in ecology and evolution*. Princeton University Press.
- Lantmäteriet (uå) *Markhöjdmodell DEM*. Lantmäteriet. Tillgänglig vid: <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/vara-produkter/produktlista/markhojdmodell-nedladdning/> (Åtkomstdatum: 28 maj 2026).
- Lee, Y., Sim, W., Lee, S. & Lee, J. 2025. "Development and Evaluation of a Thinning Tree Selection System Using Optimization Techniques Based on Multi-Platform LiDAR", *Forests*, 16(12), s. 1776. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3390/f16121776>.
- Lindsköld, G. 2016. *Drivningsskadornas uppkomst i gallringsskogar*. Yrkeshögskolan Novia. Tillgänglig vid: <http://www.theseus.fi/handle/10024/114430> (Åtkomstdatum: 09 april 2026).
- Lämås, T., Sängstuvall, L., Öhman, K., Lundström, J., Årevall, J., Holmström, H., Nilsson, L., Nordström, E.-M., Wikberg, P.-E., Wikström, P. & Eggers, J. 2023. "The multi-faceted Swedish Heureka forest decision support system: context, functionality, design, and 10 years experiences of its use", *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1163105>.
- Mattila, U. & Nuutinen, T. 2007. "Assessing the incidence of butt rot in Norway spruce in southern Finland". Tillgänglig vid: <https://jukuri.luke.fi/bitstreams/10ec6489-64b8-4fd7-8012-54407a1c80d7/download> (Åtkomstdatum: 27 maj 2026).

- Mäkinen, H. & Isomäki, A. 2004a. "Thinning intensity and growth of Scots pine stands in Finland", *Forest Ecology and Management*, 201(2), s. 311–325. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.016>.
- Mäkinen, H. & Isomäki, A. 2004b. "Thinning intensity and long-term changes in increment and stem form of Norway spruce trees", *Forest Ecology and Management*, 201(2), s. 295–309. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.017>.
- Mäkinen, H., Isomäki, A. & Hongisto, T. 2006). "Effect of half-systematic and systematic thinning on the increment of Scots pine and Norway spruce in Finland", *Forestry*, 79(1), s. 103–121. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpio61>.
- Naturvårdsverket. 2026. *Nationella Marktäckedata (NMD)*. Naturvårdsverket. Tillgänglig vid: <https://www.naturvardsverket.se/verktyg-och-tjanster/kartor-och-karttjanster/nationella-marktackedata/> (Åtkomstdatum: 28 maj 2026).
- Naturvårdsverket (uå) *Skyddad natur*. Naturvårdsverket. Tillgänglig vid: <https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/skyddad-natur/skyddad-natur/> (Åtkomstdatum: 28 maj 2026).
- Nilsson, U., Agestam, E., Ekö, P.-M., Elfving, B., Fahlvik, N., Johansson, U., Karlsson, K., Lundmark, T. & Wallentin, C. 2010. "Thinning of Scots pine and Norway spruce monocultures in Sweden: effects of different thinning programmes on stand-level gross- and net stem volume production", *Studia Forestalia Suecica*, 219(219), s. 1–46.
- Ojha, P. 2026. "How are Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Revolutionizing Forest Operations? A Systematic Review of Current Applications and Future Opportunities", *Environmental Management* [Preprint]. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1007/s00267-026-02536-8>.
- Perry, N., Schweier, J., Bont, L.G., Kushwaha, S.K.P., Peltola, H., Eyvindson, K., Astrup, R., Chapman, M. & Blattert, C. 2026. "Towards precision forestry: A systematic review of optimisation methods for individual-tree decisions in forest management", *Trees, Forests and People*, 24, s. 101226. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2026.101226>.
- Persson, M., Bader, M.K.-F. & Holmström, E. 2024. "Exploring the interplay between within-stand variation and thinning practices in southern Sweden", *Forest Ecology and Management*, 561, s. 121888. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121888>.
- Pettersson, F. 2016. *Effekter av olika gallringsformer och stickvägsavstånd på virkesproduktion och ekonomi i tallförsöket Kolfallet*. Arbetsrapport från Skogforsk 900–2016. Skogforsk.
- Rönnberg, J., Berglund, M., Johansson, U. & Cleary, M. 2013. "Incidence of Heterobasidion spp. following different thinning regimes in Norway spruce in southern Sweden", *Forest ecology and management*, 289, s. 409–415.
- Rönnqvist, M., Flisberg, P., Andersson, G. & Jönsson, P. 2026. "Evaluation of drone system for thinning operations—a case study in Sweden", *International Transactions in Operational Research*, n/a(n/a). Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1111/itor.70168>.

- SCA. 2026. *Thinning from above with drones*. Tillgänglig vid: <https://www.sca.com/en/media/news/2026/thinning-from-above-with-drones/> (Åtkomstdatum: 07 juli 2026).
- Sirén, M. 1998. *Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen*. [One-grip harvester operation, its silvicultural result and possibilities to predict tree damage]. Metsäntutkimuslaitos. Tillgänglig vid: <https://jukuri.luke.fi/handle/11111/94818> (Åtkomstdatum: 27 maj 2026).
- Sirén, M., Ala-Ilomäki, J., Mäkinen, H., Lamminen, S. & Mikkola, T. 2013. "Harvesting damage caused by thinning of Norway spruce in unfrozen soil", *International Journal of Forest Engineering*, 24(1), s. 60–75. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1080/19132220.2013.792155>.
- Sirén, M., Hyvönen, J. & Surakka, H. 2015. "Tree damage in mechanized uneven-aged selection cuttings", *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 36(1), s. 33–42.
- Skogsstyrelsen (uå) *Skogliga grunddata*. Skogsstyrelsen. Tillgänglig vid: <https://www.skogsstyrelsen.se/skogligagrunddata> (Åtkomstdatum: 28 maj 2026).
- Skogsstyrelsen, Statistiska centralbyrån, Naturvårdsverket, och Sveriges lantbruksuniversitet. 2025. *Formellt skyddad skogsmark, frivilliga avsättningar, hänsynsytor samt improduktiv skogsmark*. Skogsstyrelsen. Tillgänglig vid: <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/skyddad-skog/formellt-skyddad-skogsmark-frivilliga-avsattningar-hansynsytor-samt-improduktiv-skogsmark/> (Åtkomstdatum: 28 maj 2026).
- Sveaskog. 2026. *Gallring från luften – skogsnäringen och AirForestry i innovativt samarbete*. Tillgänglig vid: <https://www.sveaskog.se/press/2026/gallring-fran-luften--skogsnaringen-och-airforestry-i-innovativt-samarbete/> (Åtkomstdatum: 07 juli 2026).
- Søgaard, G., Astrup, R., Allen, M., Andreassen, K., Bergseng, E., Fløistad, I.S., Granhus, A., Hanssen, K.H., Hietala, A.M., Kvaalen, H., Solberg, S., Solheim, H., Steffenrem, A., Stokland, J.N. & Økland, B. 2017. "Skogbehandling for verdiproduksjon i et klima i endring", *NIBIO RAPPORT*, vol 3 Nr. 99.
- Valinger, E., Lundqvist, L. & Brandel, G. 1994. "Wind and snow damage in a thinning and fertilisation experiment in *Pinus sylvestris*", *Scandinavian Journal of Forest Research*, 9(1–4), s. 129–134. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1080/02827589409382822>.
- Valinger, E. & Pettersson, N. 1996. "Wind and snow damage in a thinning and fertilization experiment in *Picea abies* in southern Sweden", *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 69(1), s. 25–33.
- Wallentin, C. 2007. *Thinning of Norway spruce*. Swedish University of Agricultural Sciences (Acta Universitatis Agriculturae Sueciae). Tillgänglig vid: <https://res.slu.se/id/publ/14225> (Åtkomstdatum: 03 juni 2026).
- Wallentin, C. & Nilsson, U. 2014. "Storm and snow damage in a Norway spruce thinning experiment in southern Sweden", *Forestry*, 87(2), s. 229–238.
- White, J.W., Rassweiler, A., Samhouri, J.F., Stier, A.C. & White, C. 2014. "Ecologists should not use statistical significance tests to interpret simulation model results",

Oikos, 123(4), s. 385–388. Tillgänglig vid: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2013.01073.x>.

Bilaga 1. Källor standardisering av effektmått

Bilagan redovisar vilka beräkningar, effektmått och källor som användes i de två litteraturstudierna. Syftet är att tydliggöra hur de olika studiernas resultat har standardiserats och tolkats i den metaanalysliknande sammanställningen. Tabell B1 avser litteraturstudien om gallringsprogram, gallringsstyrka och stickvägsuttag, medan Tabell B2 avser litteraturstudien om skador på träd och mark vid gallring. Tabellerna ska därför ses som ett metodstöd till resultatredovisningen, snarare än som en fullständig redovisning av samtliga enskilda studieresultat.

Tabell B1.1. Beräkningar och använda källor för litteraturstudien: Effekten av gallringsprogram och stickvägsuttag.

Beräkning	Kommentar	Använda källor
Relativ produktionsförändring (Pf)	Användes när både behandlingsled och jämförelseled redovisades, främst vid jämförelser mellan gallrade och ogallrade bestånd eller mellan olika gallringsbehandlingar.	Nilsson m.fl. (2010), Mäkinen & Isomäki (2004a, 2004b), Mäkinen m.fl. (2006), Pettersson (2016).
Produktionsförlust (Pfl)	Användes som huvudsakligt effektmått för att uttrycka lägre produktion eller tillväxt i behandlingsledet som positivt förlusttal.	Nilsson m.fl. (2010), Mäkinen & Isomäki (2004a, 2004b), Mäkinen m.fl. (2006), Braastad & Tveite (2001), Søgaaard m.fl. (2017).
Absolut volymförlust (Avf)	Användes när studier redovisade volymskillnader i m ³ sk/ha eller motsvarande volymmått.	Pettersson (2016), Nilsson m.fl. (2010), Mäkinen m.fl. (2006).
Stickvägsandel (SV _{andel})	Användes som geometriskt stödmått för att tolka hur stickvägsbredd och stickvägsavstånd påverkar andelen stamförande areal.	Pettersson (2016), Mäkinen m.fl. (2006).
Sammanvägd effekt	Användes för den metaanalysliknande syntesen när statistisk viktning inte var möjlig. Effekten sammanfattades som riktning och ungefärlig storleksordning.	Nilsson m.fl. (2010), Mäkinen & Isomäki (2004a, 2004b), Mäkinen m.fl. (2006), Pettersson (2016), Braastad & Tveite (2001), Søgaaard m.fl. (2017), Persson m.fl. (2024), de Castro Segtowich (2025).

Tabell B1.2. Beräkningar och använda källor för litteraturstudien: Risker för skador på träd och mark vid gallring.

Beräkning	Kommentar	Använda källor
Skadefrekvens på kvarvarande träd (P_s)	Användes för att beskriva andel skadade träd efter gallring.	Andersson (2011), Lindsköld (2016), Sirén (1998), Sirén m.fl. (2013), Grönlund m.fl. (2015))
Skadearea och skadeplacering	Rapporterad skadearea, skadehöjd eller placering Användes för att bedöma skadans allvarighet och risk för röta.	Lindsköld (2016), Isomäki & Kallio (1974), Sirén m.fl. (2013), Vasiliauskas (2001)
Relativ tillväxtförlust hos skadade träd (T_r)	Användes som trädnivåeffekt för att beskriva biologisk påverkan av allvarliga stam- och rotskador.	Isomäki & Kallio (1974), Vasiliauskas (2001)
Skadad grundyta (GY_{sp})	Användes för storm- och snöskador där skadans omfattning redovisades på beståndsnivå.	Wallentin & Nilsson (2014), Valinger & Pettersson (1996), Valinger m.fl. (1994)
Skadad volym (V_{sp})	Användes för att beskriva volymmässig påverkan av storm-, snö- och avgångsskador.	Wallentin & Nilsson (2014), Valinger & Pettersson (1996), Grönlund/Skogforsk (2015/2016)
Absolut volym- eller produktionsförlust (V_f)	Användes där studier eller sammanställningar redovisade produktions- eller volymförlust i m^3 eller m^3/ha .	Wallentin (2007), Edlund (2012), Sirén m.fl. (2013)
Årlig volymförlust ($V_f, \text{år}$)	Användes när total volymförlust kunde relateras till en angiven tidsperiod.	Wallentin (2007), Grönlund/Skogforsk (2015/2016)
Markskador och kompaktering	Rapporterat spår djup, markpåverkan, kompaktering eller m^3 -förlust Användes för att bedöma indirekt produktionspåverkan via försämrad rotmiljö och markfunktion.	Kardell (1978), Andersson (1980), Wallentin (2007), Edlund (2012), Sirén m.fl. (2013)
Rötförekomst (R_f)	Användes för att beskriva andel träd med röta.	Rönnberg m.fl. (2013), Mattila & Nuutinen (2007), Isomäki & Kallio (1974)
Rötad stamvolym (R_v)	Användes för att beskriva långsiktig volym- och kvalitetsförlust i gran.	Rönnberg m.fl. (2013), Mattila & Nuutinen (2007), Vasiliauskas (2001)
Förenklad beståndseffekt av trädsador (B_{eff})	Användes endast som illustrativ princip för att visa hur skadefrekvens och trädnivåeffekt kan kombineras.	Beräkningsprincip baserad på Andersson (2011), Lindsköld (2016), Isomäki & Kallio (1974)
Intervall mellan studier (Int_s)	Användes för att visa spridningen i rapporterade skade- och effektstorlekar.	Samtliga kvantitativa studier i respektive skadekategori
Oviktnat medelvärde ($\bar{x}$)	Användes endast när studierna redovisade jämförbara procentmätt.	Andersson (2011), Lindsköld (2016), Sirén (1998), Sirén m.fl. (2013), Grönlund/Skogforsk (2015/2016)