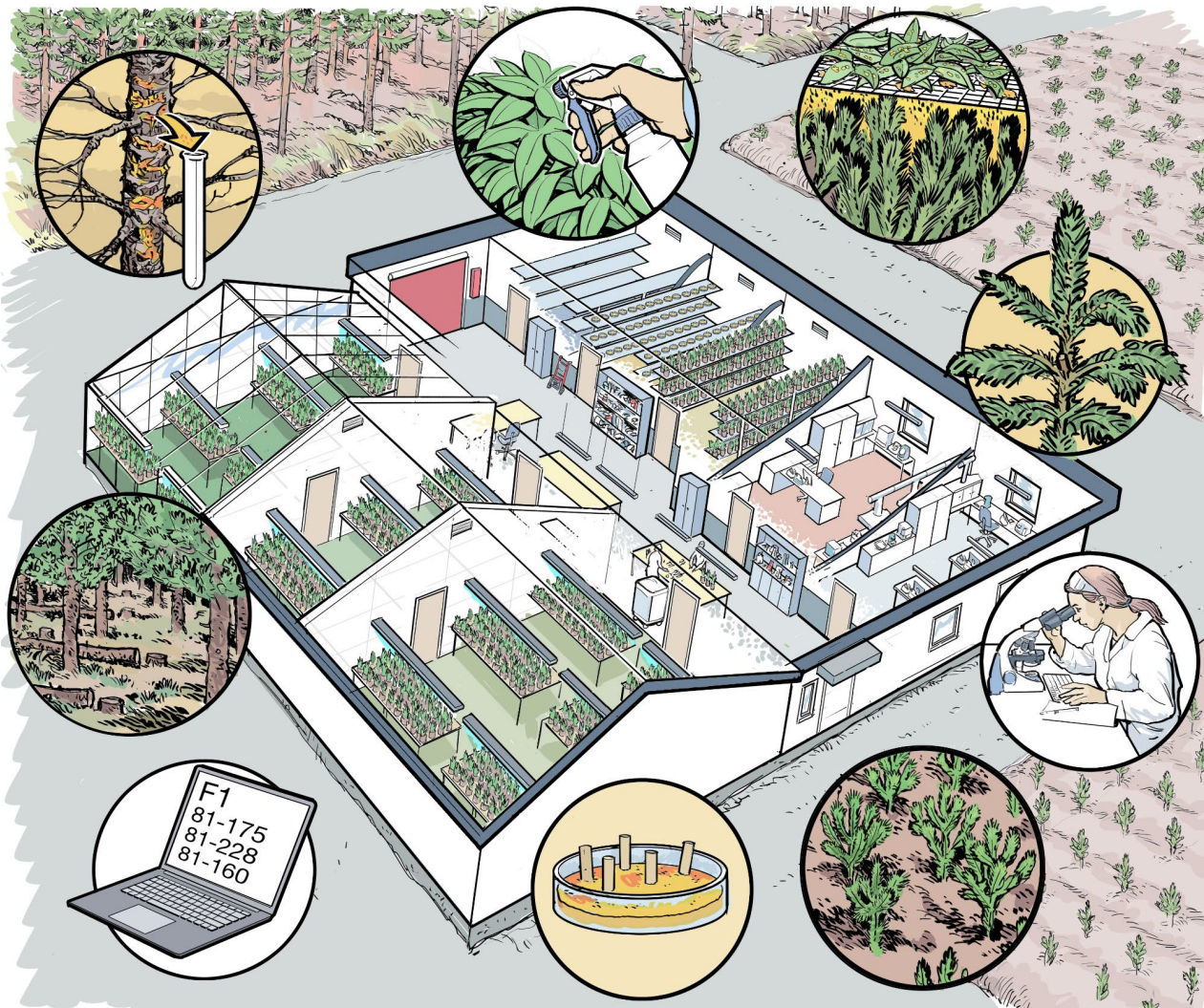


Friskare träd i framtidens skog

– med ett screeningcenter för törskate och rotröta

Mats Hannerz, Torgny Persson, Henrik Svennerstam och Jan Stenlid



Idéskiss till screeningcenter för testning av resistens mot rotröta och törskate.

Illustration: Gösta Lindwall.

Innehåll

Förord	4
Summary	5
Sammanfattning	7
Inledning	9
Inspiration från USA	9
Potential att öka resistensen även i Sverige	9
Tidiga tester håller på att utvecklas	10
Varför screeningcenter?	10
Syfte	11
Rotröta	12
Förekomst och skadeomfattning	13
Rötresistens och arvbarhet	14
Tidiga tester av rötresistens	17
Genmarkörer och genomisk selektion	18
Törskatesvamp	19
Förekomst och skadeomfattning	20
Skador i ungskog	20
Multiskadad skog	23
Förtida avverkning	24
Mortalitet	24
Minskad tillväxt	24
Törskateresistens och arvbarhet	24
Genetisk gallring	26
Tidiga tester av törskateresistens	27
Resistensscreening i Nordamerika	28
Screening för fusiform rust, Asheville, NC	29
Screening för white pine blister rust, Dorena, OR	30
Kostnader och ekonomiska vinster av mer resistenta träd	32
Kostnader för skador av rotröta på gran	33
Minskad tillväxt	33
Mortalitet och stormfällningsrisk	33
Kvalitetsnedsättning	33
Tidigare beräkningar av rotrötans ekonomiska kostnader	34

Stubbehandlingsens ekonomi.....	34
Lönsamhet med förädling för resistens.....	35
Överslagsberäkning av rotrotens kostnader på nationell nivå	36
Förutsättningar.....	36
Använda värden och antaganden:.....	37
Virkesvärdesförsämring, beståndsskattningar	37
Kostnad på nationell nivå, virkesvärdesförlust.....	38
Kostnad på nationell nivå, tillväxtförluster.....	38
Kostnader för skador av törskate på tall.....	40
Studie av produktionsnedsättning.....	41
Avverka eller inte avverka.....	42
Ett svenskt screeningcenter.....	44
Möjliga genetiska vinster	45
Kostnader.....	45
Slutsatser	46
Referenser.....	47



skogforsk

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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts i januari 2024 av Torgnys Persson och Henrik Svennerstam, forskare. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 16 februari 2024.

Redaktör: Caroline Rothpfeffer, caroline.rothpfeffer@skogforsk.se
©Skogforsk 2024 ISSN 1404-305X

Förord

Rotröta är en av de svåraste och ekonomiskt mest belastande svampskadorna på gran. Törskate är en svampskada som drabbar tallskog i framför allt norra Sverige. Motståndskraft mot såväl rotröta som törskate har visat sig vara genetiskt kontrollerad, och det finns potential att med förädling och genetiskt urval ta fram plantmaterial med ökad motståndskraft. I Nordamerika har man sedan mer än 50 år framgångsrikt arbetat med att förbättra ett antal inhemska träarters motståndskraft mot rostsvamparna *fusiform rust* och *white pine blister rust*. År 2022 gjorde representanter för organisationerna och företagen nämnda nedan en studieresa till North Carolina och Oregon i USA. Inspirerade av de nordamerikanska resultaten från de uppbyggda testcentren (*screening center*) lyftes behovet av ett svenskt nationellt screeningcenter för rotröta och törskate. Ett sådant screeningcenter kan på sikt utnyttjas även för andra, och nya, skadesvampar.

Denna rapport utgör ett faktaunderlag inför en potentiell investering i genetisk screening för motståndskraft mot rotröta hos gran och törskatesvamp hos tall. Rapporten beskriver kunskapsläget om möjligheterna att förbättra resistensen och en beräkning av kostnader och tillväxtförluster på grund av svampskadorna. Den förväntade vinsten i form av mer resistent plantmaterial måste ställas i relation till kostnaden för att bygga upp och långsiktigt driva ett screeningcenter vid Skogforsks fältstation i Sävar.

Uppdragsgivare för rapporten är Skogforsk som representant för en projektgrupp där SLU, Skogforsk, Sveaskog, Holmen, SCA, Skogsstyrelsen, Södra och Stora Enso ingår. En första version av rapporten presenterades för projektgruppen i juni 2023. Efter synpunkter har rapporten sedan bearbetats vidare av de fyra författarna. Många andra har också bidragit med goda råd och tips per telefon, e-post och i Teams-möten: Ett stort tack till Malin Elfstrand (SLU), Gisela Björse (Sveaskog), Magnus Thor (Skogforsk), Olof Falkeström (Norra Skog), Patrik Fredriksson (Sveaskog), Berit Samils (SLU), Urban Nilsson (SLU), Mattias Berglund (Skogforsk), Andreas Helmersson (Skogforsk), Göran Örlander (f.d. Södra) och Ola Rosvall (f.d. Skogforsk).

Kalmar, Umeå och Uppsala december 2023

Mats Hannerz, Torgny Persson, Henrik Svennerstam, Jan Stenlid

Summary

Root rot is the economically most important pathogen on Norway spruce in Sweden. About 15% of all spruces in thinning and final felling forests in Sweden up to the Norrland coast show rot infection in the stump, and the fungus occurs throughout the entire country except the mountain range. Several studies have shown a large genetic variation in susceptibility to root rot. About 35% of the variation is due to genetics, and the heritability varies across studies between 0.11 and 0.42, which is on par with the heritability of growth. A majority of studies also show a lack of genetic correlation between rot resistance and growth. This suggests that selection for rot resistance need not compromise the growth of the improved spruces, although it cannot be ruled out. Methods to quickly test young seedlings (screening) for rot resistance has been established for decades. Pieces of wood with the mycelium of root rot are applied to the trunks of the spruce seedlings. After 3–6 weeks, the spread of the rot can be examined and used to estimate the breeding value for rot resistance.

A calculation of the costs of root rot throughout the country concluded that the value of quality reduction in final felling with spruce was at least SEK 458 million per year. Added to that is a loss of growth reduction of SEK 301 million (669,000 m³), a total of SEK 759 million per year. The cost is likely an underestimate based on a 15% rot rate. In many final felling forests, the percentage of rot is higher, and in addition losses in thinning and other losses such as missed carbon sequestration, sub-optimal tree species selection and lost values in the industry are not included. The calculated cost means that each percent reduction in the proportion of rotted trees results in a saving in timber value and root net worth of SEK 51 million per year. A separate calculation for all spruces delivered from the Brelinge seed orchard concluded that a genetic improvement in root rot resistance of 5 percentage points would have meant an increased growth of 76,000 cubic meters per year, corresponding to approximately SEK 38 million per year.

The Scots pine blister rust has always existed in Sweden, but in recent decades, damage to young forest in northern Sweden has received particular attention. Skogforsk's inventories show that 87% of the pine-dominated young forests in Norrbotten and 60% in Västerbotten have trees damaged by the rust. In Norrbotten, approximately 15% of the young forests have more than 10% damaged pines. Both anecdotal testimony and inventories of the Swedish National Forest Inventory show that damage has increased in recent decades. The Scots pine blister rust benefits from a warmer climate and higher rainfall during the summer, and also from the fact that Scots pine trees have been planted to a greater extent than before on more fertile land with the presence of the host plant *Melampyrum sylvaticum*. Scots pine blister rust leads to mortality in young trees when it grows into the trunk and strangles nutrient and water transport. Attacks on older trees, often higher up the stem, lead to reduced growth and damaged wood.

Like root rot, infection of Scots pine blister rust on pine shows genetic variation. Heritability measured in damaged field trials shows a heritability of 0.4, and no genetic correlation between infestation level, growth and vigor has been demonstrated. Genetic thinning of less resistant families has been carried out in three Nordic pine seed orchards, and the expected results in the form of a lower percentage of damage have been confirmed in demonstration trials.

Early tests (screening) are being developed for Scots pine blister rust of both the host-alternating and non-host-alternating forms. For the host-alternating form, spores collected on pine trees in the field are used to inoculate peony leaves, as peony is one of

several alternative intermediate hosts for the fungus. Spores from the peony leaves are then allowed to infect the test pine seedlings. For the non-host-alternating form, spores are taken directly from pine and applied to the test seedlings. These are planted outdoors, and the damage can be examined after about 3 years. Tests are underway to try to shorten the waiting time using genetic markers.

Calculations of the economy of stands affected by Scots pine blister rust have been made with the aim of investigating when an early harvest is profitable. Two separate studies both show that it is only in more extreme cases that it is economically worthwhile to clearcut a growing stock and replace it with a new stand. On the other hand, the damage entails large costs both in the form of reduced growth and increased mortality. A calculation of the total costs of the Scots pine blister rust in a national perspective is not possible with today's level of knowledge. Here, significantly more data is needed on the extent of the attack and the impact on growth and mortality.

In North America, screening against harmful rust fungi has occurred for over 50 years. In North Carolina, seedlings are tested for susceptibility to fusiform rust and in Oregon to white pine blister rust. The screening has been successful and led to a halved susceptibility to fusiform rust in genetically improved loblolly pine. The experiences from North America show that a screening center is a long-term strategic investment that requires persistence and ongoing method development. Calculations of the profitability concluded that every dollar invested has provided an added value of 5-20 dollars in terms of healthier forests.

The Swedish breeding is based on selection breeding, and results from field trials are the most important component. Field trials have many advantages, but they run the risk of missing pests that appear locally and more randomly in time and space. However, resistance to both root rot and Scots pine blister rust can be investigated by screening test seedlings, and the results can be used in both operational breeding work and for selective selection and genetic thinning in seed orchards. Calculation of genetic gains for resistance to root rot and Scots pine blister rust shows that it is reasonable in the long term to be able to halve the susceptibility to the damage through selective breeding.

A proposal has been drawn up for a screening center for root rot and Scots pine blister rust to be located at Skogforsk's station in Sävar, Västerbotten. Screening of pine seedlings and spruce cuttings is proposed to take place according to the recipes described in the report. The estimated cost of the physical facility, including furnishings, is still under investigation but is estimated to approximately SEK 30 million. The annual long-term operation is estimated to SEK 5 million.

In addition to including root rot and Scots pine blister rust in selection breeding, the screening center contributes a resource to test and investigate new pests that can be expected to increase with a changing climate. The large amount of measurement data, together with collected field results from progeny trials, also provides a stable basis for the development of molecular genetic selection methods, for example genomic selection. Large-scale controlled testing methods can also be used in future research projects on the genetic basis of resistance to pests.

Sammanfattning

Rotröta är den ekonomiskt viktigaste skadegöraren på gran i Sverige. Cirka 15 procent av alla granar i gallrings- och slutavverkningsskog i Sverige upp till norrlandskusten har röta i stubbskäret, och rötsvampen förekommer i hela landet utom fjällkedjan. Flera studier har visat på en stor genetisk variation hos träden i mottaglighet för röta. Cirka 35 procent av variationen beror på genetik, och heritabiliteten (arvbarheten) varierar i olika studier mellan 0,11 och 0,42, vilket är i nivå med arvbarheten för tillväxt. Flertalet studier visar också på avsaknad av genetisk korrelation mellan rötresistens och tillväxt. Det tyder på att urval för rötresistens inte behöver äventyra tillväxten hos de förädlade granarna, även om det inte kan uteslutas. Det finns sedan årtionden etablerade metoder för att snabbtesta unga plantor (screening) för rötresistens genom att vedbitar med mycel av rotticka appliceras på stammar av granplantorna. Efter 3–6 veckor kan rötans spridning läsas av och användas för att skatta avelsvärdet för rötresistens.

En beräkning av rotrötans kostnader i hela landet kom fram till att värdet av kvalitetsnedsättning i slutavverkning med gran var minst 458 miljoner kronor per år. Till det kommer en förlust av tillväxtnedsättning på 301 miljoner kronor (669 000 m³), totalt minst 759 miljoner kronor per år. Kostnaden är sannolikt en underskattning baserad på en rötfrekvens på 15 procent. I många slutavverkningsskogar är rötandelen högre, och dessutom ingår inte förluster i gallring och andra förluster som missad kolinbindning, inoptimala trädslagsval och förlorade värden vid industrin. Den beräknade kostnaden innebär att varje procents minskad andel rötade träd ger en besparing i virkesvärde och rotnetto på 51 miljoner kronor per år. En separat beräkning för alla levererade granar från Bredingeplantagen kom fram till att en genetisk förbättring av rotröteresistensen på 5 procentenheter skulle ha inneburit en ökad tillväxt på 76 000 kubikmeter per år, motsvarande ca 38 miljoner kronor per år.

Törskatesvampen har alltid funnits i Sverige men de senaste decennierna har skador på ungskog i norra Sverige blivit särskilt uppmärksammade. Skogforsks inventeringar visar att 87 procent av de talldominerade ungskogarna i Norrbotten och 60 procent i Västerbotten har träd med skada av törskate. I Norrbotten har ungefär 15 % av ungskogarna mer än 10 procent skadade tallar. Såväl anekdotiska vittnesmål som inventeringar av Riksskogstaxeringen visar att skadorna har ökat de senaste decennierna. Törskatesvampen gynnas av ett varmare klimat och högre nederbörd under sommaren, och dessutom av att tall i högre grad än tidigare har planterats på bördigare marker med förekomst av värdväxten skogskovall. Törskatesvampen leder till mortalitet hos unga träd när den växer in i stammen och stryker närings- och vattentransport. Angrepp på äldre träd, ofta högre upp på stammen, innebär nedsatt tillväxt och skadat virke.

Liksom rotröta uppvisar törskateangrepp på tall en genetisk variation. Arvbarheten uppmätt i skadade fältförsök visar på en heritabilitet på 0,4, och någon genetisk korrelation mellan angreppsnivå, tillväxt och vitalitet har inte kunnat påvisas. Genetisk utgallring av mindre resistent familjer har utförts i tre norrländska tallfröplantager, och de förväntade resultaten i form av lägre andel skador har bekräftats i demonstrationsförsök.

Tidiga tester (screening) håller på att utvecklas för törskate av både den värdväxlande och den icke värdväxlande formen. För den värdväxlande formen används sporer insamlade på tallar i fält till att inokulera pionblad, eftersom pion är en av flera alternativa mellanvärdar för svampen. Sporer från pionbladen får sedan infektera testplantorna av tall. För den icke värdväxlande formen tas sporer direkt från tall och appliceras på testplantorna. Dessa planteras på friland och skadorna kan läsas av efter cirka 3 år. Tester pågår för att försöka förkorta väntetiden med hjälp av genetiska markörer.

Beräkningar av törskatedrabbade bestånds ekonomi har gjorts med syfte att undersöka när en förtida avveckling är lönsam. Två separata studier visar båda att det bara är i mer extrema fall som det lönar sig ekonomiskt att avveckla ett växande bestånd och ersätta det

med en ny föryngring. Däremot innebär skadorna stora kostnader både i form av nedsatt tillväxt och ökad dödlighet. En beräkning av törskateskadornas totala kostnader i ett nationellt perspektiv är inte möjlig att göra med dagens kunskapsnivå. Här behövs betydligt mer data om angreppens omfattning och påverkan på tillväxt och mortalitet.

I Nordamerika har screening mot skadliga rostsvampar förekommit i över 50 år. I North Carolina testas plantor för mottaglighet mot fusiform rust och i Oregon mot white pine blister rust. Screeningen har varit framgångsrik och lett till en halverad mottaglighet för fusiform rust hos förädlade tallar (loblolly pine). Erfarenheterna från Nordamerika visar att ett screeningcenter är en långsiktigt strategisk investering som kräver uthållighet och löpande metodutveckling. Beräkningar av lönsamheten kom fram till att varje investerad dollar har gett ett mervärde på 5–20 dollar i form av friskare skogar.

Den svenska förädlingen bygger på urvalsföräldring där resultat från fältförsök är den viktigaste komponenten. Fältförsök har många fördelar men de riskerar att missa de skadegörare som uppträder lokalt och mer slumpmässigt i tid och rum. Resistens mot såväl rotröta som törskate kan dock undersökas med screening av testplantor och resultaten kan användas i både det operativa förädlingsarbetet och för särplockning och genetisk gallring i fröplantager. Beräkning av genetiska vinster för resistens mot rotröta och törskate visar att det långsiktigt är rimligt att kunna halvera mottagligheten för skadorna genom urvalsförädling.

Ett förslag har tagits fram till ett screeningcenter för rotröta och törskate med placering på Skogforsks station i Sävar, Västerbotten. Screening av fröplantor av tall och sticklingar av gran föreslås ske enligt de recept som beskrivs i rapporten. Kostnaden för den fysiska anläggningen, inklusive inredning, uppskattas preliminärt till cirka 30 miljoner kronor. Den långsiktiga driften uppskattas till cirka 5 miljoner kronor per år.

Utöver att inkludera rotröta och törskate i urvalsförädlingen bidrar screeningcentret med en resurs för att testa och undersöka nya skadegörare som kan förväntas öka med ett förändrat klimat. Den stora mängden mätdata, tillsammans med insamlade fältresultat från avkommeförsök, ger också ett stabilt underlag för utveckling av molekylärgenetiska urvalsmetoder, till exempel genomisk selektion. Storskaliga kontrollerade testmetoder kan också utnyttjas i framtida forskningsprojekt kring den genetiska basen för resistens mot skadegörare.

Inledning

Inspiration från USA

I USA:s sydstater är rostsvampen fusiform rust (*Cronartium quercuum* f. sp. *fusiforme*) ett stort problem för skogsbruket, framför allt för de kommersiellt viktiga sydstatstillarna loblolly pine (*Pinus taeda*) och slash pine (*Pinus elliotti*). Det beräknas att svampskadorna kostar över 100 miljoner dollar per år. Nära 6 miljoner hektar planterad tall har mer än 10 procent skadade träd och på en halv miljon hektar är mer än hälften av träden skadade. En annan rostsvamp orsakar stora skador på Weymouthtall (*Pinus strobus*) och dess 5-barriga släktingar; den ofrivilligt införda white pine blister rust (filtrost, *Cronartium ribicola*) som har dödat miljontals träd under de 100 år som svampen har funnits i Nordamerika. Båda svamparna är nära släkt med vår inhemskatörskatesvamp (*Cronartium pini*).

Problemen med dessa svampar och möjligheterna att sortera fram plantmaterial med högre resistens blev tidigt uppmärksammat i USA. I början av 1970-talet etablerades ett testcenter (screening center) i Asheville, North Carolina. Testning och urval har steg för steg förbättrat sydstatstillarnas motståndskraft mot fusiform rust. Screeningcentret används för forskning, förädling och urval av både universitet och de skogsföretag som har egna förädlingsprogram. Efter fyra förädlingscykler har andelen angripna träd av loblolly pine kunnat minska till mindre än hälften jämfört med oförädlade träd, och samtidigt har virkesproduktionen ökat med cirka 30 procent (se sidan 29).

I Dorena, Oregon, har ett annat screeningcenter en lika lång historik. Här testas tallplantor rutinmässigt för motståndskraft mot white pine blister rust. Även om få tallarter uppvisar fullständig resistens har testningen inneburit en stor förbättring av trädens genomsnittliga motståndskraft. I dagens förädlingspopulationer har de bästa familjerna 40 procent högre överlevnad jämfört med icke-resistenta familjer (se sidan 30).

Dessa två screeningcenter är bara ett par exempel av flera i USA och Kanada. På jordbrukssidan är svampskador ett ännu större globalt problem, och där finns många exempel på att förädling och testverksamhet framgångsrikt har ökat grödornas resistens (El-Baky m.fl. 2021).

Potential att öka resistensen även i Sverige

De svenska förädlingsprogrammen för tall och gran bygger i första hand på fälttestning. Fältförsöken ger på lång sikt en stegvis förbättring av trädens vitalitet och motståndskraft mot olika skadegörare eftersom naturligt skadade träd kan sorteras bort i urvalsprocessen. Fältförsök har dock begränsningar. Dels kan det ta lång tid innan skador visar sig, dels uppträder många svampangrepp slumpmässigt, både i tid och rum. Med tidig testning av motståndskraft hos unga plantor skulle resistensförädlingen kunna snabbas på och användas som ett urvalskriterium redan innan fältförsöken planteras eller kommersiella plantpartier sås upp. Idag används frystestning rutinmässigt för att på ett motsvarande sätt sortera familjer och plantpartier i olika hårdighetsklasser.

Den här rapporten fokuserar på den kommersiellt viktigaste svampskadegöraren på gran – rotticka (*Heterobasidion annosum* s.l.) – samt på törskaterost (*Cronartium pini*) – som de senaste decennierna har uppmärksammats för sina omfattande skador på ungskog av tall i norra Norrland. Utöver dessa finns en stor mängd svampar som på sikt kan bli hot mot den svenska skogen, många är det redan nu. Exempel är *Gremmeniella abietina*, knäckesjuka (*Melampsora pinitorqua*), tallskytte (*Lophodermium seditiosum*), snöskytte (*Phacidium infestans*), *Diplodia pinea* och de svampar som orsakar askskottsjuka och almsjuka. I takt med ett förändrat klimat riskerar fler svampar att bli epidemiska, och dessutom kan nya svamparter få fäste i vårt land såväl spontant som via handel.

Som nämnts fångar fältförsök inte alltid förekomsten av svampskador under den tid de följs upp med inventeringar. Den stora mängden försök på många lokaler ger dock information som kan användas för att skatta hur genetiken kontrollerar motståndskraften. Angrepp av *Gremmeniella abietina* uppvisar exempelvis en heritabilitet (arvbarhet) på 0,22–0,42, och det finns hittills ingen påvisad genetisk korrelation mellan svampskador och tillväxtegenskaper (Sonesson m.fl. 2007). Rotröta har undersökts både i naturligt infekterade och artificiellt okulerade fältförsök med gran. Heritabiliteten för rötresistens är i samma storleksordning som den för diameter- och höjdtillväxt, och den genetiska variationen är tillräckligt stor för att förädling ska vara framgångsrik (Swedjemark & Karlsson 2004, Karlsson & Swedjemark 2006). Fältförsök med angrepp av törskate har också undersökts och visat på en hög genetisk variation och en heritabilitet för angrepp på 0,38–0,42, vilket är mer än arvbarheten för höjdtillväxt (Persson m.fl. manus, Persson m.fl. 2008).

Resultaten från de genetiska studierna tyder alla på att det finns en förädlingspotential för ökad resistens mot skadesvampar, och att denna resistens inte behöver äventyra tillväxt och den klimatrelaterad överlevnad.

Tidiga tester håller på att utvecklas

Det finns utvecklade metoder för att mäta resistensen redan på unga plantor. Inokulering med rottickesporer för att testa resistensen har gamla anor och från 1980-talet och framåt har metoderna utvecklats och använts i studier av både plantor och träd i fältförsök (Swedjemark m.fl. 1998). Studierna indikerar att tidigt urval för rötresistens inte behöver ha någon påverkan på vare sig tillväxt eller virkeskvalitet i uppvuxna bestånd, även om ett sådant samband inte kan uteslutas (Chen m.fl. 2018). Idag är screening-metoden så utvecklad att den skulle kunna skalas upp till operativ tillämpning. Resultaten av en inokulering blir synlig redan efter några veckor.

Törskatesvampen har också potential för tidig testning på motsvarande sätt som hos de amerikanska rostsvamparna nämnda ovan. Försök har genomförts med insamlade sporer som har använts för att infektera mellanvärdet pion (*Paeonia sp.*), och sporer från dessa infekterar sedan tallplantor. Tester har även genomförts med att infektera tallplantor direkt med sporer från den icke värdväxlande varianten av törskatesvampen. Plantorna odlas några år för att därefter läsa av infektionsgraden. Metodutveckling för tidig detektion av resistensen pågår också.

Det finns alltså en genetisk potential att öka resistensen för dessa skadesvampar, och metoder för tidig testning finns även om de kontinuerligt behöver vidareutvecklas och förfinas. Ett inte omöjligt mål är att resistensförädlingen ska leda till en halverad skaderisk för det förökningsmaterial som används i kommande plantager.

En förutsättning för en mer operativ tidig testning av resistens är att det finns fysiska och ekonomiska resurser. I denna rapport föreslås att ett screeningcenter anläggs vid Skogforsks fältstation i Sävar. På stationen finns omfattande kunskap och lång erfarenhet av plantodling och testning, och dessutom arealer som kan iordningställas för både byggnader och odlingsbäddar.

Varför screeningcenter?

- I det korta perspektivet är ett screeningcenter en stor investering, men varje procent ökad resistens får stort genomslag på tillväxt och överlevnad i fält. Av de plantskoleproducerade tallarna i Sverige har 95 procent sin härkomst i svenska fröplantager, för gran är motsvarande siffra 74 procent (Skogsstyrelsen 2023).
- I det långa perspektivet är det lönsamt. Amerikanska beräkningar av resistensförädling för fusiform rust visar att varje dollar som spenderats har gett en vinst på 5–20 dollar (Sniezko m.fl. 2014).

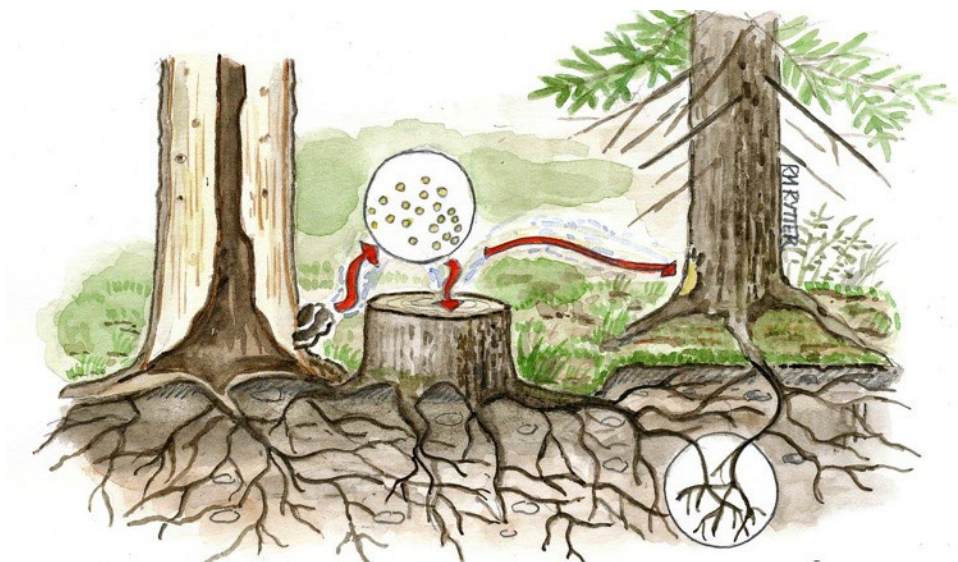
- Fältförsöken fångar bara upp slumpmässiga skador, dessutom innehåller de inte alltid det senast förädlade materialet. I ett screeningcenter säkerställs att alla nya sorter testas och utvärderas tidigt.
- Ett screeningcenter med sin tillhörande kompetensuppbyggnad kan betraktas som en försäkringspremie som möjliggör snabb testning och utvärdering av nya skadesvampar.
- Forskningen har redan idag hittat genetiska markörer för rotröta och törskate. En utvecklad screeningsverksamhet kommer att bidra med underlag för markörbaserat urval och genomisk selektion.
- Screeningen kan på ett naturligt sätt integreras med förädlingen om anläggningen placeras på en förädlingsstation. Den kan också användas för tester av kommersiella fröpartier.
- På sikt är det realistiskt med en halverad skadeförekomst, något som har uppnåtts i USA.
- Ett etablerat screeningcenter kan också användas för forskning om exempelvis resistensmekanismer.

Syfte

Syftet med rapporten är att beskriva omfattningen av skadorna och kunskapsläget om möjligheterna att förbättra resistensen mot törskate och rotröta. En översiktlig beräkning görs också av vilka tillväxtförluster och kostnader som skadorna medför, och hur de skulle påverkas av ett mer resistent plantmaterial. Dessutom beskrivs de metoder som kan komma att användas samt de kostnader som en anläggning är förknippad med – både vad gäller anläggning och långsiktig drift.

Rotröta

Rottickan (*Heterobasidion parviporum*, rottickans S-form) infekterar i första hand gran och orsakar rotröta. Rotrötan leder till nedklassning av virket, långsammare tillväxt och att träden blir mer stormkänsliga (Bendz-Hellgren & Stenlid 1995, Oliva m.fl. 2008). Ett rötangripet träd är sannolikt också mer utsatt för angrepp av granbarkborre och andra skadegörare. En vanlig inkörsport för rötsvampens sporer är genom stubbskäret. Numera rekommenderas behandling med rötsvampens antagonist pergamentsvamp *Phlebiopsis gigantea* eller bakterien *Pseudomonas* i alla granskogsgallringar som utförs i plusgrader. Stubbehandling i slutavverkning är också lönsamt i bördigare granskog (ståndortsindex G26 och högre). I södra Sverige angrips också tall av rottickans P-form (*Heterobasidion annosum*). Till skillnad mot gran, som angrips både av rottickans S-form och P-form, kan angreppen leda till att tallarna dör.



Figur 1. Färska stubbytor är den vanligaste inkörsporten för rottickans sporer, men även andra stamskador kan vara en inkörsport för infektion. Väl etablerad växer svampens mycel ned i stubben; under det första året kan rottickan växa upp till 50 cm. Efter etableringen i stubben växer svampen vidare in i friska trädrötter och sprider sig till levande träd där den bryter ned kärnveden. I genomsnitt når rötan ungefär 3–4,5 meter upp i stammen (olika resultat i olika studier). När rottickan är etablerad i det nya trädet bildas så småningom fruktkroppar som släpper ut nya sporer som kan infektera nya stubbar. Illustration: Rose-Marie Rytter.

Förekomst och skadeomfattning



Figur 2. Femton procent av alla granar i slutavverkningsskogen uppvisar rotröta i stubbskäret.

Foto: Mats Hannerz.

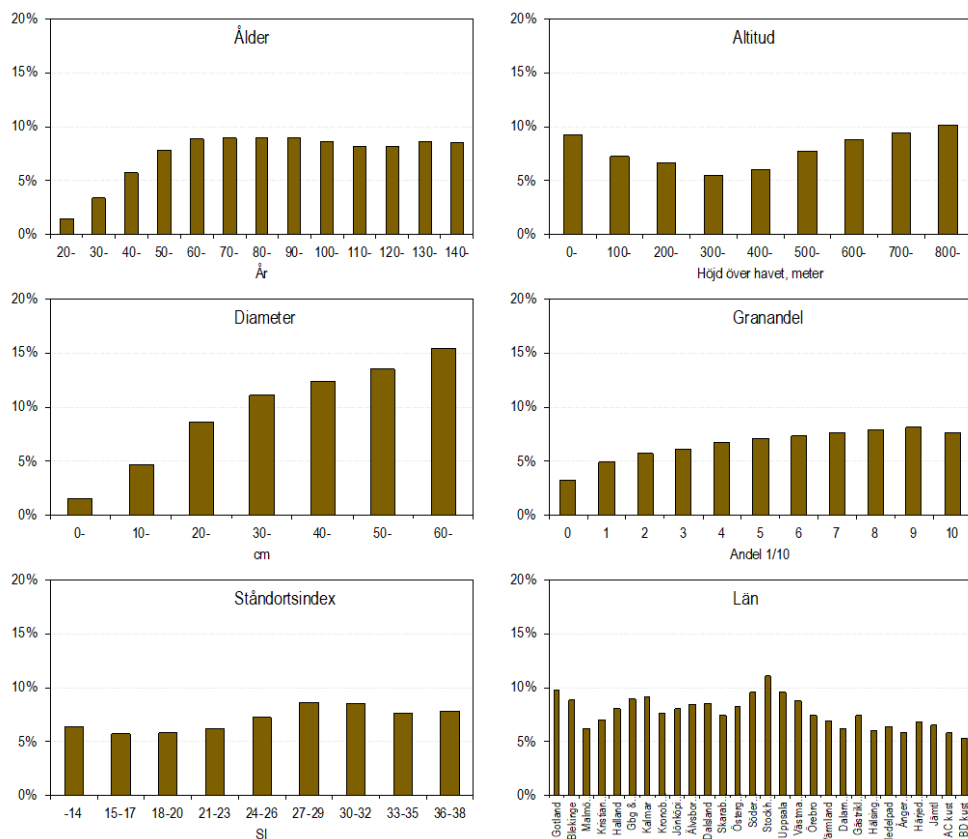
Rottickan förekommer i hela landet med undantag för fjälltrakterna. Den är vanligare i södra Sverige, men även i exempelvis Jämtland på kalkrika marker kan angreppen vara omfattande. Rottickan svarar för cirka 75 procent av alla rötangrepp i landet, och i genomsnitt är 15 procent av alla granar i slutavverkningsmogen ålder angripna i stubbhöjd. Rötspelaren i stammen når ofta upp till 3–4 meter, ibland ändå upp till 15 meter. I de flesta fallen påverkas bara bottenstocken, som i slutavverkning innebär en nedklassning från sågtimmer till barmmassa eller energived. Lokalt kan angreppen vara betydligt mer omfattande, det är inte ovanligt att 75 procent av granarna är angripna och att den angripna delen motsvarar ungefär 20 procent av beståndets virkesvolym (Berglund & Rönnberg 2017).

Rotröta har tidigare beräknats orsaka förluster på 0,5–1 miljard kronor för svenska skogsägare (Thor m.fl. 2004). Kostnaden tar bara hänsyn till virkesförsämring (att timmer och massaved blir nedklassat till vrak och bränsleved) och tillväxtnedsättning. Förluster i form av risk för andra skador, mortalitet och kolinbindning är inte inräknade. Idag är dessutom förlusten sannolikt högre eftersom rotrötan sprider sig norrut i takt med ett varmare klimat.

Riksskogstaxeringen bedömer rötvedsförekomst i insamlade borrprover i brösthöjd. Data från perioden 1983–2001 användes för att modellera rötrisen för granar i åldern 20–149 år (Thor m.fl. 2005). Rötfrekvensen i brösthöjd ökade med nästan 25 procent från den första till den andra halvan av den period som analyserades. I genomsnitt var 7 procent av granarna drabbade av röta i brösthöjd, vilket motsvarade den dubbla frekvensen i stubbhöjd. Det betyder att var sjunde gran i gallrings- och slutavverkningsskogen var angripen av rotröta. Sannolikheten för röta ökade med beståndsålder, diameter, ståndortsindex, temperatursumma och andel gran i beståndet. På fuktiga marker och över 100 meter över havet minskade sannolikheten. Modellen har implementerats i ett verktyg i kunskapssystemet Skogskunskap.se (www.skogskunskap.se).

Modellen visade att rotröta ökar kraftigt upp till cirka 60 års beståndsålder, att den är högre på både låga och höga altituder, och att den ökar med diameter, ståndortsindex och

granandel (Figur 3). Rotröten förekommer i hela landet utom i fjällkedjan men de observerade frekvenserna är betydligt lägre norr om breddgrad 70°N.



Figur 3. Modellerad förekomst av rottröta i brösthöjd i relation till beståndsålder, höjd över havet, brösthöjdsdiameter, granandel, ståndortsindex och län. I stubbhöjd är frekvenserna de dubbla. Omritat från Thor m.fl. 2005.

Rötresistens och arvbarhet

Experimentell inympning av rötsporor har gamla anor; redan 1923 beskrevs hur metoden används för att testa resistens (Lagerberg 1923). Sedan dess har många inokuleringsförsök utförts på både unga och gamla granar. Flera studier har noterat en variation i infektionsgrad och röttillväxtens hastighet (Stenlid & Swedjemark 1988 samt referenser i Swedjemark & Karlsson 2004 och Chen m.fl. 2020). Upp till 35 procent av variationen i rötspredning har kunnat förklaras av genetik (Swedjemark m.fl. 1997).

Från 1990-talet och framåt har ett flertal studier genomförts av röttålighet i etablerade fältförsök med kloner och avkommor, många i samarbete mellan Skogforsk och SLU (Swedjemark & Karlsson 2004a, 2004b, 2005, Karlsson & Swedjemark 2006, Arnerup m.fl. 2010). Liknande försök har också utförts i Norge (Skrøppa m.fl. 2015a, 2015b, Steffenrem m.fl. 2016) och Danmark (Wellendorf & Thomsen 2008). Försöksmaterialen har varierat från klontester till hel- och halvsyskonfamiljer och metoderna har innefattat både avläsning av naturligt infekterade granar och inokulering av mycel i stammar. Inokulering av stubbar för att undersöka spridning via rotsystemet har också använts som metod.

På motsvarande sätt har flera försök med inokulering utförts på unga plantor i plantskola och på laboratorium (Swedjemark & Stenlid 1996, Chen m.fl. 2018).

De olika studierna visar genomgående att det finns en genetisk variation i resistensnivå, och att denna är tillräckligt stor för att förädling ska vara möjlig. Variationskoefficienten (CV_a) för röttillväxt har skattats till 30 procent (Chen m.fl. 2018) och 17–22 procent (Steffenrem m.fl. 2016) i olika studier. Arvbarheten (heritabiliteten) är i många fältförsök i nivå med heritabiliteten för diameter och höjd. Fullständig resistens är sannolikt inte möjlig, utan variationen handlar om i vilken frekvens träd infekteras och hur snabbt rötan växer i veden. I tabell 1 visas resultat från olika studier. Den högsta heritabiliteten uppmättes i ett avkommeförsök med inokulerade 2-åriga plantor.

Effekterna av urval har också skattats i studier. Chen m.fl. (2018) beräknade att ett urval av 1 procent av de mest resistent avkommorna ger en genetisk vinst i röttillväxt på 52 procent. Karlsson & Swedjemark (2004) skattade att ett urval av de 10 procent bästa klonerna hade en infektionsgrad efter inokulering på 31,7 procent, vilket var 14,8 procentenheter lägre än genomsnittet för alla kloner i testen.

Tabell 1. Heritabilitet för rotröteresistens i granförsök i Sverige och Norge. FG=fungal growth, det avstånd från infektionsstället som konidiesporer av rötticka hittas på. LL=lesion length, längd på nekrotisk missfärgning av barken. D=stamdiameter, H=höjd. Heritabiliteten för klontester uttrycks i bred bemärkelse (H^2) och för avkommeprövningarna i smal bemärkelse (h^2).

Försökstyp och referens	Antal kloner/familjer	Ålder	h^2 / H^2			
			FG	LL	D	H
Plantskola, helsyskonfam. ¹	252	3–4	0,11	-	-	-
Plantskola, kloner ²	98	4	0,35	0,27		
Plantskola, halvsyskonfam ³	446	2	0,42	0,33		
Fält, kloner ⁴	34	17	0,18	0,08	0,2	0,25
Fält, kloner. Naturligt infekt. ⁵	50	20	0,18	-	0,32	0,37
Fält, fröplantage och avkommor ⁶		10–12	-	0,13	-	-
Fält, kloner ⁷	40	7–8 och plantor	-	0,21	-	-
Fält, fröplantage och avkommor ⁸	25/43		-	0,16	0,13	-

Referenser till studierna: ¹ Arnerup m.fl. (2010), ² Swedjemark m.fl. 1997, ³ Chen m.fl. 2018, ⁴ Swedjemark & Karlsson 2004a, ⁵ Karlsson & Swedjemark 2006, ⁶ Skråppa m.fl. 2015a, ⁷ Skråppa m.fl. 2015b, Steffenrem m.fl. 2016.

En viktig fråga vid urvalsförädling för rötresistens är om andra egenskaper påverkas, eftersom trädets försvar mot sjukdomar skulle kunna innebära att mindre energi kan avsättas till tillväxt. I ett av försöken (Swedjemark och Karlsson, 2004) hittades en positiv genetisk korrelation mellan trädhöjd och röttillväxt. I huvuddelen av övriga studier saknas dock detta samband, vilket har tolkats som att förädling för rötresistens inte behöver äventyra tillväxtegenskaperna (tabell 2). I en studie av Chen m.fl. (2018) undersöktes också om röttillväxten hos plantor är korrelerad med virkesegenskaper hos motsvarande familjer i fältförsök. Inte heller här återfanns några signifikanta korrelationer.

*The lack of a negative genotypic correlation will allow much more efficient breeding for the important goal traits combined with selection for resistance against *Heterobasidion* spp. The significant genotypic variation is encouraging from a breeder's point of view. (Karlsson & Swedjemark 2006).*

Tabell 2. Genotypisk och fenotypisk korrelation mellan rötresistens, diameter och höjd. FG=fungal growth (se tabell 1). LL=lesion length (se tabell 1). D=diameter. H=höjd. *=signifikansnivå, ns=ej signifikant.

Försökstyp och referens	Genotypisk/fenotypisk korrelation				
	FG*LL	FG*D	LL*D	FG*H	LL*H
Plantskola, helsyskon ¹	0,28**	0,20**	Ns		
Plantskola, kloner ²	0,23–0,36				
Plantskola, halvsyskon ³		0,12 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
Fält, kloner ⁴	0,38 ^{ns}	0,57*	0,61 ^{ns}	0,43*	0,64 ^{ns}
Fält, kloner, naturligt infekterade ⁵	0,09 ^{ns}	-0,01 ^{ns}			
Fält, fröplantage och avkomor ⁶					0,08 ^{ns}
Fält, kloner ⁷				-0,33 ^{ns}	

Referenser till studierna: 1 Arnerup m.fl. 2010, 2 Swedjemark m.fl. 1997, 3 Chen m.fl. 2018, 4 Swedjemark & Karlsson 2004a, 5 Karlsson & Swedjemark 2006, 6 Skrøppa m.fl. 2015a, 7 Skrøppa m.fl. 2015b.

Tidiga tester av rötresistens

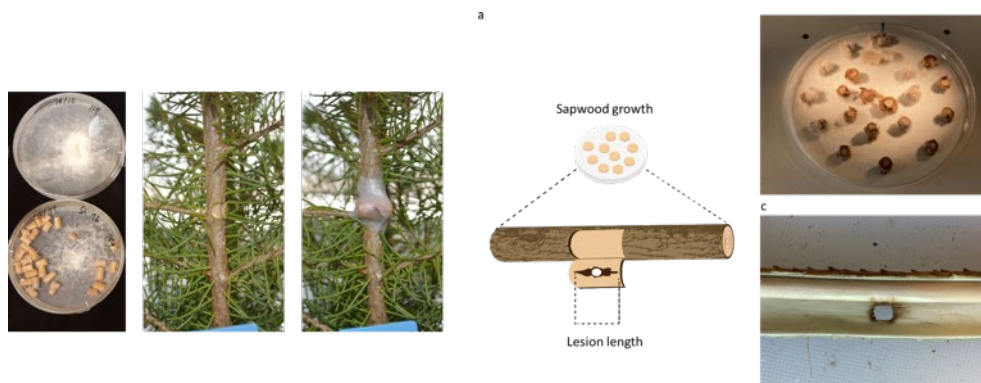
Den metod som används idag har utvecklats och modifierats stegvis sedan 1980-talet (Stenlid & Swedjemark 1988). Inokulering i unga plantor görs med en stam av rotticka insamlad i naturligt infekterad gran i södra Sverige, *Rb135* (Stenlid 1987).

Svampen odlas på ett Hagem-medium. Ungefär 5–6 mm tjocka trätrissor placeras på mediet och får ligga cirka 6 veckor för att bli koloniserade med svampen. Trissorna flyttas sedan över till granplantorna där de fixeras i ett hål i barken cirka 7–10 cm upp på stammen. De täcks med parafilm för att undvika annan smitta. Efter 3–6 veckor läses rötans spridning av.

De avläsningar som görs är

1. längden på nekrotisk missfärgning i barken (*lesion length*), dvs. synlig missfärgning som syns när den yttersta barken skalats bort, och
2. rötans tillväxt i veden (*fungus growth*). För att mäta rötans tillväxt kapas 5 mm tjocka trissor av granstammen vilka analyseras i mikroskop. Om konidiesporer av röttsvampen hittas har rötan nått så långt.

Testerna utförs alltså under relativt kort tid – inkubering av trissor samt rötkolonisering i plantan tar 8–12 veckor (varierar mellan olika studier). Hela processen är dock arbetsintensiv. En beräkning för test av 60 grankloner (300 rameter), från förberedelser till och med avläsning, kom fram till en tidsåtgång på 10,5 dagsverken. Vid inokulering på grenar i fröplantage (ett alternativ till tidig screening) är tidsåtgången 50 procent högre (Malin Elfstrand, pers. komm.).



Figur 4. Från vänster: Mycel i petriskål, den nedre med träpluggar för inokulering. Granplanta förberedd för fixering av träplugg samt planta med träplugg. Avläsning av röttillväxt och längd på missfärgning av barken. Till höger visas stamtrissorna som läses av för röttillväxt (överst) och avläsningen av missfärgning i barken (nederst). Bilder från Malin Elfstrand.

Genmarkörer och genomisk selektion

Som nämnts ovan är screening för rötresistens möjlig redan idag men metoden med manuell avläsning är arbetsintensiv. I en nära framtid kan urvalsprocessen både snabbas på och bli mer kostnadseffektiv med molekylärgenetiska metoder.

Genuppsättningen har kartlagts för två av granförädlingspopulationerna och där har man lyckats identifiera några av de DNA-sekvenser som är kopplade till försvaret mot rotröta. Totalt hittades 13 genmarkörer (QTL:s, quantitative trait loci) som undersöks vidare på granar från TreO-plantagerna (Lind m.fl. 2014, Skogforsk 2016). Med en eller flera molekylära markörer kan plantor med dålig motståndskraft sorteras ut tidigt.

Ett nästa steg är genomisk selektion, som bygger på information från tusentals genetiska markörer spridda över kromosomerna i hela genomet. När ett stort antal träd har kartlagts kan gensammansättningen matchas mot egenskaper uppmätta i fältförsök eller screeningtester. En genomisk selektionsmodell håller på att tas fram för förädlingspopulationen av gran (Malin Elfstrand, pers. komm.). Genomisk selektion används idag framgångsrikt i köttdjursavel och förädling av jordbruksväxter.

Törskatesvamp

Törskatesvampen är en av få svampar som orsakar skador på medelålders och äldre tallar. Svampen är allmän i hela landet och har länge varit en känd skadegörare. De senaste decennierna har skador i ungskog norra Sverige blivit mer uppmärksammade. Törskatesvampen (*Cronartium pini*) finns i två former som tidigare ofta benämnts som egna arter: *Cronartium flaccidum* som smittar via mellanvärdar (kovaller, pion, tulkört), och *Peridermium pini* som kan spridas direkt från tall till tall. Den värdväxlande *C. flaccidum* gör störst skada i unga och medelålders bestånd på näringsrika marker. I norra Sverige är skogskovall den viktigaste mellanvärdar och i södra Sverige tulkört. De svåra skadorna i Norrbotten under 2000-talet orsakas främst av *C. flaccidum* (Witzell m.fl. 2017). En opublicerad studie visade att 85 procent av sporproverna från Norrbotten tillhörde den värdväxlande formen (Henrik Svennerstam, pers. komm.). Båda formerna överlappar varandra, även om den värdväxlande är vanligare i norra och den icke värdväxlande i södra Sverige (Samils m.fl. 2021).

Sporerna från *C. flaccidum* sprids till tallskotten på sensommaren från sina mellanvärdar. Spridningen gynnas av fuktigt väder. Sporerna av *P. pini* sprids på försommaren. Infektionen och skadan syns inte förrän efter något eller flera år i form av barksprickor på stammen och så småningom stam- och grensår med orangea blåsor. Det är under denna fas, när *C. flaccidum* sprids tillbaka till sina mellanvärdar, som det är lättast att identifiera infektionen. När stamsåren omsluter hela stammen stryps närings- och vattentillförseln och toppen eller grenen dör. Om infektionen sker högt upp på stammen eller i en gren kan trädet överleva i decennier även om det kan innebära att stammen ovanför skadan dör. Sker infektionen lågt ner, särskilt på unga träd, leder den ofta till att trädet dör.



Figur 5. Den värdväxlande formen av törskate (*Cronartium flaccidum*) till vänster. Mellanvärdar i norra Sverige är ofta kovall och i södra Sverige tulkört. Svampen förökas sexuellt under sin utvecklingsfas på tallen. Den icke värdväxlande (*Peridermium pini*) till höger sprids från tall till tall. Den har endast asexuell (klonal) förökning. Bild: Berit Samils.

Förekomst och skadeomfattning

Törskate har sedan länge varit en känd skadegörare i äldre tallbestånd där den förknippas med de karakteristiska döda talltopparna, kallade tjärgaddar eller torrtoppar. Denna typ av skador förekommer i hela landet. Anders Wahlgren (1914) skriver att *”ehuru den ofta kan iakttagas redan inom de 10–20-åriga tallbestånden, gör den sig dock mest skadligt bemärkt i de 40–80-åriga bestånden särskilt vid tätare slutenhetsgrader. Ofta är det de vackraste och rakaste stammarna, som angripas och stäkas i sin utveckling.”*

Under de senaste decennierna är det dock skadorna i den yngre tallskogen och gallringsskogen i norra Norrland som rönt uppmärksamhet. Tillsammans med viltbetesskador kan törskate göra så stor skada att bestånd måste avvecklas i förtid och ibland ersättas av andra trädslag än tall. Att skador i unga bestånd inte blivit lika uppmärksammade som på äldre tallar kan bero på att unga träd dödas ganska snabbt och angreppet kan vara svårt att diagnosticera om inventeringen inte görs när träden sporulerar på försommaren (figur 6).



juni 2021

september 2021

juni 2022

Figur 6. Törskateangreppen identifieras lättast när de orangea sporerna syns på försommaren. Däremellan kan det vara lätt att missa dem. Foton: Henrik Svennerstam.

Skador i ungskog

Riksskogstaxeringen följer kontinuerligt upp de viktigaste skadorna i sina stickprovsinventeringar. Dessutom utförs särskilda inventeringsinsatser för enskilda skador eller områden, så kallad Nationell Riktad Skogskadeinventering (NRS) (Wulff m.fl. 2022). NRS genomfördes 2007, 2008 och 2012 på ett urval av lokaler som ingick i älgbetesinventeringen (ÄBIN). Den NRS som utfördes 2022 utnyttjade i stället ett urval av Riksskogstaxeringens fasta provytor i ungskog i de fyra nordligaste länen. Ytorna hade avverkats 1993–2013 (i Lappland) och 1998–2013 (i övriga områden).

Skogsbolagen i norra Sverige har utfört egna inventeringar i ungskog 2019–2020, och dessutom har Skogforsk genomfört en areellt mer omfattande inventering under 2021–2022 (Svennerstam 2023). I denna gjordes mätningar i 10–30 år gamla bestånd med en tallandel på 40 procent eller mer. Provytorna var spridda i sex större geografiska områden från Västernorrland och Jämtland i söder till Norrbotten i norr.

Resultaten från de olika inventeringarna varierar beroende bland annat på geografisk spridning av inventeringsobjekten, ålder på ungskogen och risken för feldiagnostisering

av törskate. Symptombilden för törskate förväxlas lätt med andra skadegörare, om det inte handlar om sporulerande angrepp (se figur 6 ovan).

Det finns mycket som talar för att de angreppsfrekvenser som redovisas av Skogforsk och NRS är i underkant. Inventeringarna är gjorda i unga bestånd och det är känt att angreppen ökar med beståndsåldern. Tiden från angrepp till synliga system varierar från 2–3 år till flera år och det är dessutom svårt för ett otränat öga att upptäcka symptomen.

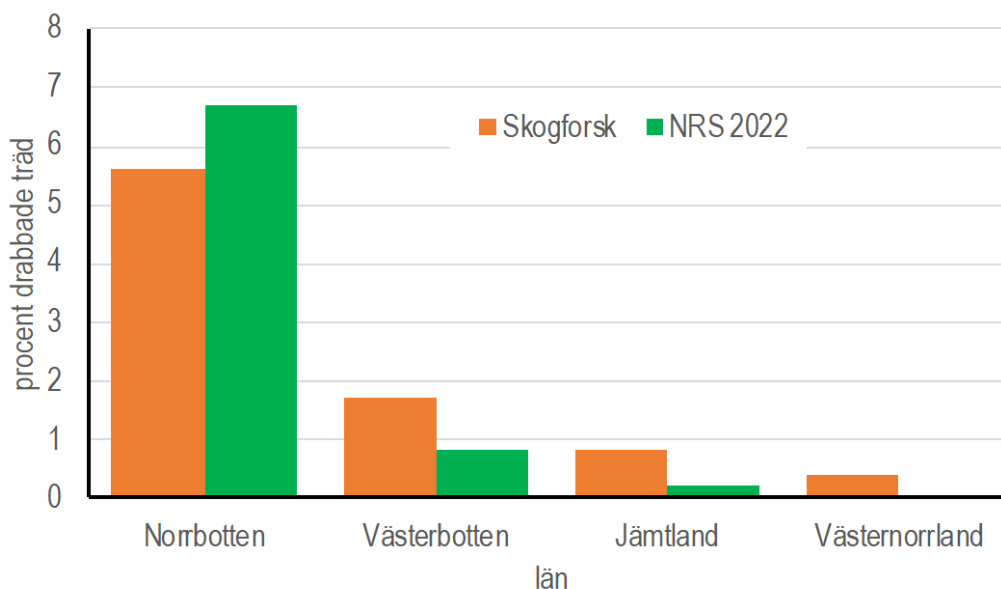
För att studera törskateangrepp efter ungskogsfasen kommer Skogforsk 2023–2024 att inventera medelålders till äldre skog i ett projekt finansierat av Skogsstyrelsen. Inventeringarna utförs i riskområden med målet att skapa ett dataunderlag med angreppsfrekvenser och skadesymptom. Studien innehåller även diameter- och höjdmätning av träd, vilket möjliggör simuleringar av beståndsutveckling och ekonomiska konsekvenser.

Mest skador i Norrbotten

Alla inventeringar, och även lokala iakttagelser, tyder på att skadorna är mest omfattande i Norrbotten. Tornedalen utgör ett epicentrum och där är törskate den allvarligaste svampskadegöraren. Det finns dock områden med höga skadenivåer även i Västerbotten (Norsjö) och i höjdlägen, bland annat i Jämtland och kring Lycksele (Carlén m.fl. 2023).

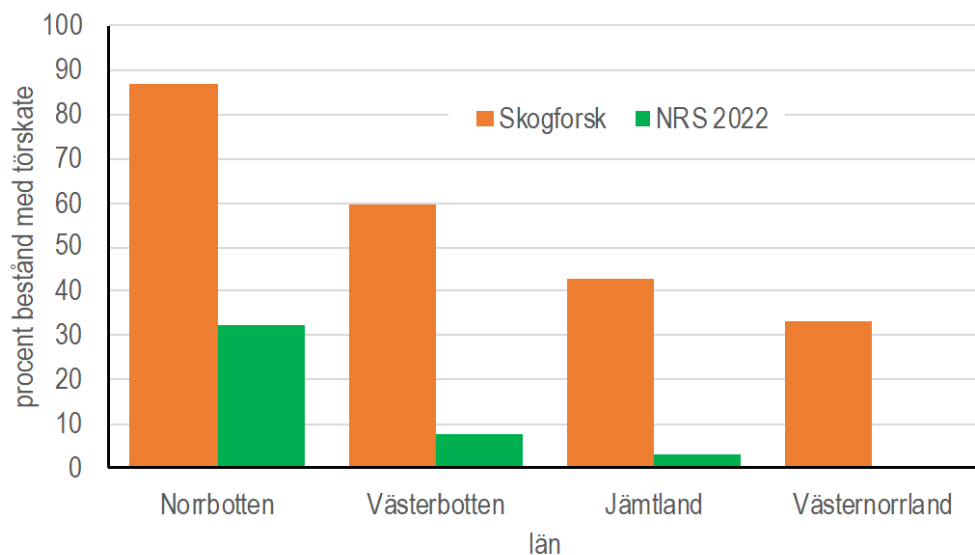
Törskateproblematiken är dock inte begränsad till de nordligaste länen. Under 2022 kom rapporter om tалldöd i ungskogar i norra Dalarna. Den drabbade skogen ligger på över 600 meters höjd på svag bonitet. Förklaringen kan vara törskate (Carlén m.fl. 2023).

Av figur 7 framgår att skadenivån är betydligt högre i Norrbotten än i de sydligare norrlandslänen. Data från Skogforsks inventering bygger på inventering av 421 lokaler med en totalt inventerad areal på 34 hektar. Även NRS 2022 har inventerat många lokaler, 592 provytor, men den inventerade arealen är lägre (7,6 hektar). Dessa båda inventeringar ger dock en samstämmig bild av skillnaden mellan län. I genomsnitt hittades törskateangrepp på cirka 6 procent av tallarna i ungskog i Norrbotten, cirka 1 procent i Västerbotten och ännu lägre i Jämtland och Västernorrland (figur 7).



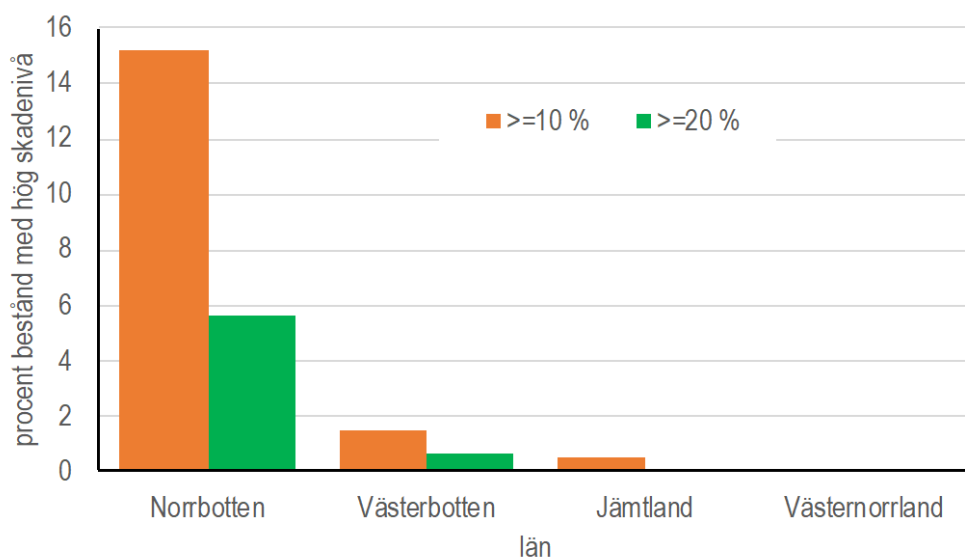
Figur 7. Andel unga tallar med observerade skador av törskatesvamp i Skogforsks inventering 2021–2022 och i Nationellt Riktad Skogsskadeinventering (NRS) 2022.

Andelen bestånd som uppvisar törskateskador varierar ännu mer mellan inventeringarna, beroende bland annat på vilken storlek på provytan som använts och hur omgivande bestånd har bedömts. I Skogforsks inventering hade 87 procent av bestånden i Norrbotten törskateskador och i NRS 2022 32 procent (figur 8). I tidigare NRS (2007–2012) var dock andelen högre i Norrbotten (42–62 procent).



Figur 8. Procent bestånd med tallungskog som har skador av törskate i Skogforsks inventering 2021–2022 och i Nationellt Riktad Skogsskadeinventering (NRS) 2022.

Enstaka tallar som skadas behöver inte betyda en stor förlust, däremot om skadorna är mer omfattande. I figur 9 visas andelen bestånd med skador som ett genomsnitt för Skogforsks inventering och de fyra genomförda NRS. I Skogforsks inventering hade 18,1 procent av bestånden i Norrbotten mer än 10 procent skadade träd och 3,6 procent mer än 20 procent.



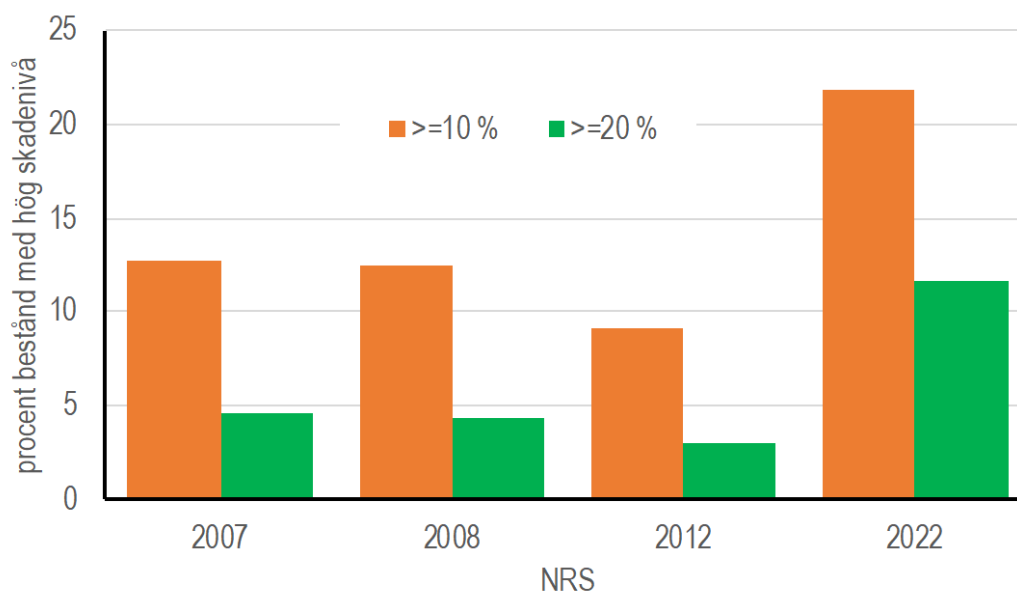
Figur 9. Procent bestånd med mer än 10 respektive 20 % av tallarna skadade av törskate. Medeltal från Skogforsks inventering 2021–2022 och NRS 2007–2022.

130 000 hektar drabbade – men det har troligen ökat

Såväl vittnesmål som inventeringarna genom NRS pekar på att angreppen av törskate i Norrbottens kustland har ökat den senaste 10-årsperioden. Figur 10 visar andelen bestånd med över 10 och 20 procent angripna träd i NRS olika inventeringar i Norrbottens län.

I NRS 2022 gjordes ingen areell skattning av skadornas omfattning, vilket däremot gjordes i den tidigare NRS 2008. Där skattades att 130 000 hektar talldominerad ungskog (1–4 meters höjd) hade törskateangrepp. Det motsvarar 34 procent av all ungskog i samma kategori i norra Sverige. På 33 000 hektar (9 % av arealen) var mer än 10 procent av tallarna skadade (Wulff m.fl. 2012). I Norrbotten var skadorna allra svårast – 67 procent av ungskogarna var drabbade, motsvarande 71 500 hektar. Eftersom skadorna sannolikt har förvärrats från NRS 2008 är det troligen en större andel av ungskogen som är drabbad idag. I NRS 2022 hade 22 procent av lokalerna minst 10 procent skador och 12 procent minst 20 procent.

Skadorna befaras således ha ökat under de senaste decennierna, något som kan ha många förklaringar. Ett ändrat klimat med högre temperatur och mer nederbörd under sommaren gynnar svampen. Dessutom har tall i högre grad planterats på mer bördiga marker som normalt är anpassade för gran. Dessa marker har högre förekomst av skogskovall (Samils & Stenlid 2022).



Figur 10. Andel bestånd med mer än 10 % respektive 20 % skadade tallar i ungskog i Norrbottens län. Från Nationellt Riktad Skogsskadeinventering 2007, 2008, 2012 och 2022.

Multiskadad skog

Multiskadad skog har växt fram som ett begrepp för ungskog som drabbats av flera skadefaktorer samtidigt. Multiskadorna har framför allt uppmärksammats i norra Sverige. I NRS 2022 framkom att nästan hälften av tallstammarna hade minst en skada och att 28 procent av huvudstammarna hade skada av betydande grad. Störst andel med betydande skador (alla skadetyper) uppmättes i Jämtland (34 %) och minst i Väster- och Norrbotten (22 resp. 25 %). Viltskador dominerade bland de kända skadeorsakerna, framför allt hos tall. Törskate var den näst viktigaste skadeorsaken. Spridningen av törskate var särskilt stor i Norrbotten (Carlén m.fl. 2023).

Av huvudstammarna av tall hade 2,9 procent törskateangrepp och 14,2 procent skador av älg (varav 8 % var färskas älgskador) (Wulff m.fl. 2022).

Förtida avverkning

Allvarligt skadade bestånd avverkas ibland i förtid med syfte att starta om med ny plantskog. Skogsstyrelsen, framför allt i Norrbotten, får årligen in dispensansökningar om förtida avverkning av svårt skadade gallringsbestånd. Även i södra Västerbotten har samtal kommit in om törskatedrabbade bestånd (Carlén m.fl. 2023).

Hur många bestånd och hur stora arealer som är i behov av omstart är svårt att fastställa. Kontakter med Sveaskog och Norra Skog visar att förtida avverkning förekommer men att det ännu inte finns någon sammanställning av den areella omfattningen. Sveaskog beräknade i sin ungskogsinventering 2019 att ungefär en fjärdedel av arealen har för få huvudstammar och att 100 000 hektar riskerar att inte nå upp till skogsvårdslagets krav (av totalt 372 000 hektar ungskog). Inventeringen täckte dåvarande marknadsområde Nord, dvs. Norrbotten, Västerbotten och delar av Jämtland och Västernorrland. Viltbete var den vanligaste skadegöraren (42 %), följt av törskate (35 %) (Gunnarsson & Mattsson 2019).

Lönsamheten med förtida avverkning har dock ifrågasatts. Trots stora avgångar kan det vara ekonomiskt mest lönsamt att låta beståndet växa vidare (se avsnitt Kostnader för skador av törskate på tall, sidan 40). En osäkerhet med att låta angripna bestånd växa vidare är om sporspridning från det angripna beståndet ökar risken för angrepp i näraliggande skog. Kunskapsläget om spridning mellan bestånd är dock begränsad och behöver utvecklas.

Mortalitet

Äldre träd som infekteras på grenarna kan leva länge, även om de får nedsatt tillväxt. Så småningom växer svampen i många fall in till stammen där den kan strangulera trädet med följd att stammen ovanför skadan dör. Det är det som syns i de gamla trädens tjärgaddar.

För unga träd är dödligheten högre. De riskerar att dö inom några år om svampen angriper runt hela stammen så att trädet stranguleras. Det är dock svårt att kvantifiera mortaliteten. En skotsk studie där ett försök följdes från 30 års ålder till 55 år fann att överlevnaden varierade mellan 5 och 13 år efter de första symptomen.

Minskad tillväxt

På samma sätt som för mortalitet är det svårt att skatta tillväxtförlusterna på grund av törskate. Svampen kan medföra att trädet dör, vilket omöjliggör tillväxtberäkning för det enskilda trädet. I SLU:s serie GG-försöken registreras törskateangrepp i tallförsök. Genom att jämföra likstora tallar med och utan angrepp, och mäta deras tillväxt under 5–10 år, kunde man skatta tillväxtförlusten till cirka 20 procent. En stor del av de angripna träden dog dock mellan mätningarna (Urban Nilsson, pers. komm.).

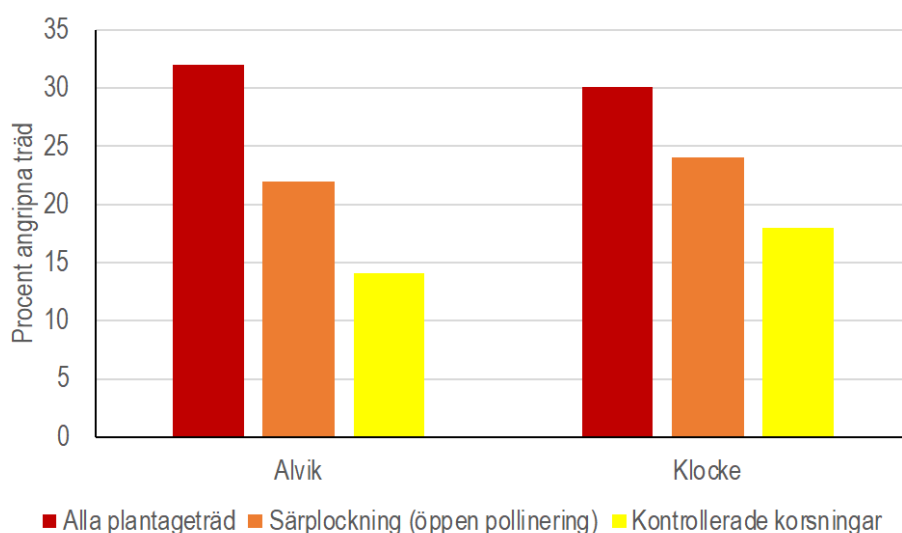
Törskateresistens och arvbarhet

De omfattande angreppen av törskatesvamp i tallungskogar i Norrbotten blev ett startskott för att undersöka genetiska skillnader i mottaglighet. Skogforsk hade tidigare konstaterat att det finns en genetisk variation hos tall i motståndskraft mot svampen *Gremmeniella abietina*. Omkring år 2001 hade gremmeniella ett utbrott i norra Sverige, och det restes frågor om plantmaterialets betydelse. I fem fältförsök och en fröplantage inventerades skadegraden. I fältförsöken syntes ingen skillnad mellan naturligt insädda och förädlade tallar. Heritabiliteten för angrepp var 0,22–0,42, och man kunde inte se

någon genetisk korrelation mellan svampskador och tillväxtegenskaper (Sonesson m.fl. 2007).

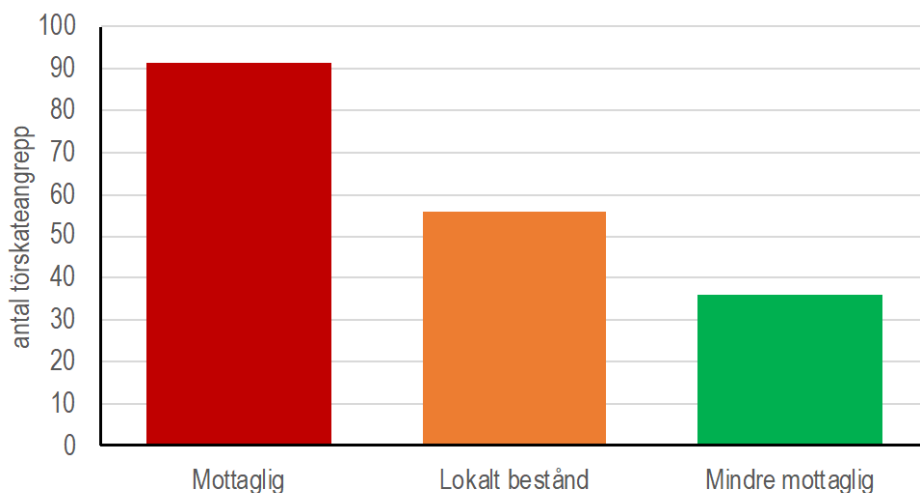
Under 2006 gjordes en inventering av 4000 plusträdsavkommor i fältförsöket F422 i Övertorneå, Norrbotten, där 33 procent av träden hade ett eller flera törskateangrepp. Försöket visade att det fanns tydliga skillnader mellan avkommor från olika plusträd. För sju procent av plusträden var avkommorna helt oskadade, medan de mest mottagliga plusträdsfamiljerna hade 75–100 procent skadade träd. Flera av plusträden finns representerade i fröplantagerna T1 Alvik och 123 Klocke. I genomsnitt var 32 respektive 30 procent av avkommorna från dessa plantageträder angripna av törskate (Persson m.fl. 2008).

Inventeringen i försöket F422 visade att heritabiliteten för törskateangrepp var 0,4, vilket är en förhållandevis hög arvbarhet. Beräkningar gjordes då av effekterna av särplockning och korsningar i de fröplantager där plusträden var representerade. Om de 10 mest resistenta plusträden i respektive plantage korsades med varandra skulle andelen angripna träd minska från 30 till 14 procent i T1 Alvik och från 32 till 18 procent i 123 Klocke. Med särplockning, det vill säga genom att plocka kottar från utvalda plusträdskloner, skulle andelen angripna träd minska till 22 procent (Alvik) och 24 procent (Klocke) (figur 11).



Figur 11. Förväntat andel angripna träd för fröpartier från fröplantagerna T1 Alvik och 123 Klocke. "Alla plantageträder" är skadenivå från en normal fröskörd från alla plantageträder. "Särplockning" är selektiv skörd från de 10 mest resistenta plantageplusträden. "Kontrollerade korsningar" är avkommor till plusträd där både fadern och modern har resistens mot törskate. Från Persson m.fl. 2008.

Ett sådant selektivt urval från plantagen T1 Alvik gjordes till en serie demonstrationsförsök hos Sveaskog. Försöket planterades 2015 och inventerades 2018–2021. Försöken visade att de beräknade resultaten också realiserades i verkligheten (figur 12).



Figur 12. Inventering efter 6 år i demonstrationsförsök i Tornedalen. Figuren visar antal törskateangrepp på dels 9 helsyskonfamiljer som valts ut för att de är resistenta (mindre mottagliga), dels i helsyskonfamiljer som är mottagliga för törskate. Som jämförelse användes lokalt beståndfrö från Tornedalen. Källa: Torgny Persson.

I en uppföljande analys till Persson (2008) gjordes avelsvärdesberäkningar för fyra avkommeförsök med tall i Norrbotten (Persson m.fl. manus). I två av försöken var andelen träd med törskate 25–42 procent i åldrarna 23–30 år. Vid 19–21 års ålder hade träden däremot inga törskateangrepp. Heritabiliteten för törskateangrepp varierade mellan 0,36–0,41, för vitalitet 0,12–0,17 och för höjd 0,12–0,25. Den additiva (ärflika) genetiska variansen för törskate skattades till cirka 40 procent. Motsvarande beräkning för vitalitet och höjd var 11 respektive 29 procent. Försöken kunde inte heller påvisa någon signifikant genetisk korrelation mellan törskateangrepp, höjdtillväxt och vitalitet.

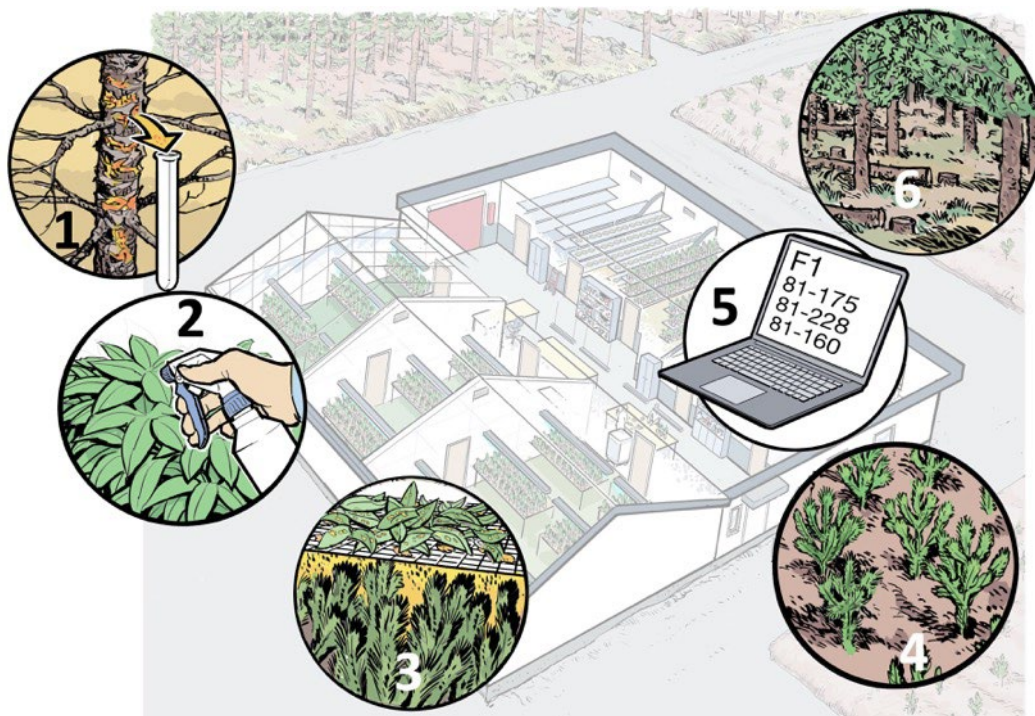
De sammanvägda resultaten från de redovisade studierna visar att det finns en stor genetisk variation och arvbarhet för mottaglighet mot törskateangrepp, och att ett genetiskt urval för resistens sannolikt inte behöver ske på bekostnad av tillväxt och vitalitet.

Genetisk gallring

Med ledning av olika resultat från Skogforsk har törskatemottagliga kloner gallrats bort i tre fröplantager: 401 Hortlax (endast en klon gallrades bort), T5 Pålberget och T1 Alvik. I T5 Pålberget var målsättningen att förbättra törskateresistensen utan att väsentligt försämra volymproduktionen, vilket innebar att det lämnades kvar två kloner med hög mottaglighet för törskate eftersom de hade höga avelsvärden för tillväxt. T5 Pålberget och T1 Alvik har efter gallring fått ett förnyat godkännande som frökällor.

Genetic resistance is considered one of the most feasible methods to manage tree rusts (Hamelin 2013).

Tidiga tester av törskateresistens



Figur 13. Ett tänkt system för genetisk screening av törskatesvamp. 1. Insamling av sporer i fält. 2. Inokulering av pion. 3. Sporspridning från pionblad till tallplantor. 4. Avläsning av skador efter odling på friland. 5. Avelsvärdering av resistens mot törskate. 6. Genetisk gallring och urval i förädlingen. Teckningar: Gösta Lindwall. Kollage: Mats Hannerz.

Eftersom den värdväxlande formen av törskate är dominerande i norra Sverige är det också främst mot den som ett system för screening håller på att utvecklas. För den ej värdväxlande formen kan sporer tas direkt från tall för testningen.

Sporer från ett brett genetiskt ursprung samlas in i fältförsök (1). Sporererna sprayas på pionblad som odlas i centret (2). När pionerna har utvecklat sporer läggs dessa på ett galler där sporererna får infektera tallplantor (3). Efter att ha utsatts för sporinfektion från pionbladen planteras tallplantorna på friland i anslutning till växthusen. Plantorna följs under 2–3 år tills skador börjar visa sig (4). Skadenivåerna läses av och används för att beräkna avelsvärden för törskateresistens (5). Resultaten används i det ordinarie förädlingsarbetet efter avvägning mot andra egenskaper, eller till genetisk gallring, alternativt särplockning, i fröplantager.

Resistensscreening i Nordamerika

Rostsvampen *fusiform rust* (*Cronartium quercuum* f. sp. *fusiforme*) orsakar svåra och ekonomiskt betydande skador på sydstatstillarna loblolly pine (*Pinus taeda*) och slash pine (*P. elliotii*). *Pinus taeda* är det kommersiellt viktigaste skogsträdet i sydöstra USA, med en utbredning från New Jersey i norr till Florida i söder, och från östkusten till östra Texas. Arten är dominerande trädslag på 12 miljoner hektar. *P. elliotii* har ett mindre utbredningsområde, från södra Georgia till mellersta Florida, men är också ett viktigt trädslag för skogsindustrin. För båda trädslagen är *fusiform rust* den viktigaste skadegöraren. Svampen värdväxlar med ekarter och orsakar stamskador, tillväxtnedsättningar och tr addedöd. Skadorna har med tiden blivit mer omfattande, vilket förklaras av plantering av infekterat plantmaterial, plantering på marker som inte är anpassade för trädslagen, mer ek som en följd av brandbekämpning, intensivt skogsbruk och gödsling (Cowling & Young 2013). På 5,6 miljoner hektar planterade med sydstatstill är minst 10 procent av träden infekterade, och på 0,5 miljoner hektar minst 50 procent. De ekonomiska förlusterna av *fusiform rust* har beräknats till mellan 24 och 135 miljoner dollar per år (Isik m.fl. 2008).



Figur 14. Screening av motståndskraft mot rostsvampar har pågått i över 50 år i både North Carolina och Oregon. Screeningen har bidragit till att det förädlade materialet har högre resistens mot *fusiform rust*. Till vänster odlas ekplantor (mellanvärd för *fusiform rust*), vilka inokuleras med rostsvampens sporer. Till höger visas ett transportband där tallplantor inokuleras genom besprutning med en sporsuspension. Foton: Torgny Persson.

Åtgärder som sätts in mot svampskadorna innefattar avverkning av ek, senarelagd gödsling i ungskogar, byte av trädslag och, inte minst, utveckling av mer resistent plantmaterial (Susaeta 2020). Det är känt sedan länge att mottagligheten för skador är nedärvd och därför ingår motståndskraft i förädlingsprogrammen för trädslagen.

Förädlingen i sydöstra USA sker genom kooperativ i samarbete med universiteten. Förädling av *P. elliotii* har pågått sedan 1950-talet, och trädslaget har idag gått igenom tre förädlingscykler. För varje cykel har motståndskraften ökat, och förekomsten av

angripna träd har minskat från 50 till 36 procent samtidigt som virkesproduktionen har ökat med 25–30 procent (Susaeta 2020).

Traditionellt har urvalet av resistenta tallfamiljer gjorts i fältförsök där svårt skadade familjer har sorterats bort, medan oskadade har gått vidare i förädlingscyklerna. Det finns dock svagheter med fälttestning. Infektionstrycket varierar ganska slumpmässigt mellan år och lokaler beroende på sportryck, väder och ståndortsfaktorer. Det är därför svårt att kontrollera den genetik som ligger bakom skillnader i infektionsgrad, särskilt för de familjer som är genomsnittligt mottagliga för svampen.

Screening för fusiform rust, Asheville, NC

Sedan 1970 har mottagligheten för fusiform rust testats i ett screening-center i Asheville, North Carolina. Centret, under ledning av USDA Forest Service, utnyttjas av förädlingsprogram hos både företag och universitet i södra USA, Mexiko och Mellanamerika. Fram till 2013 hade över 15 000 frökällor testats för genetisk resistans mot fusiform rust, men också andra viktiga skadegörare som pitch canker (som orsakas av *Fusarium circinatum*) (Cowling & Young 2013).

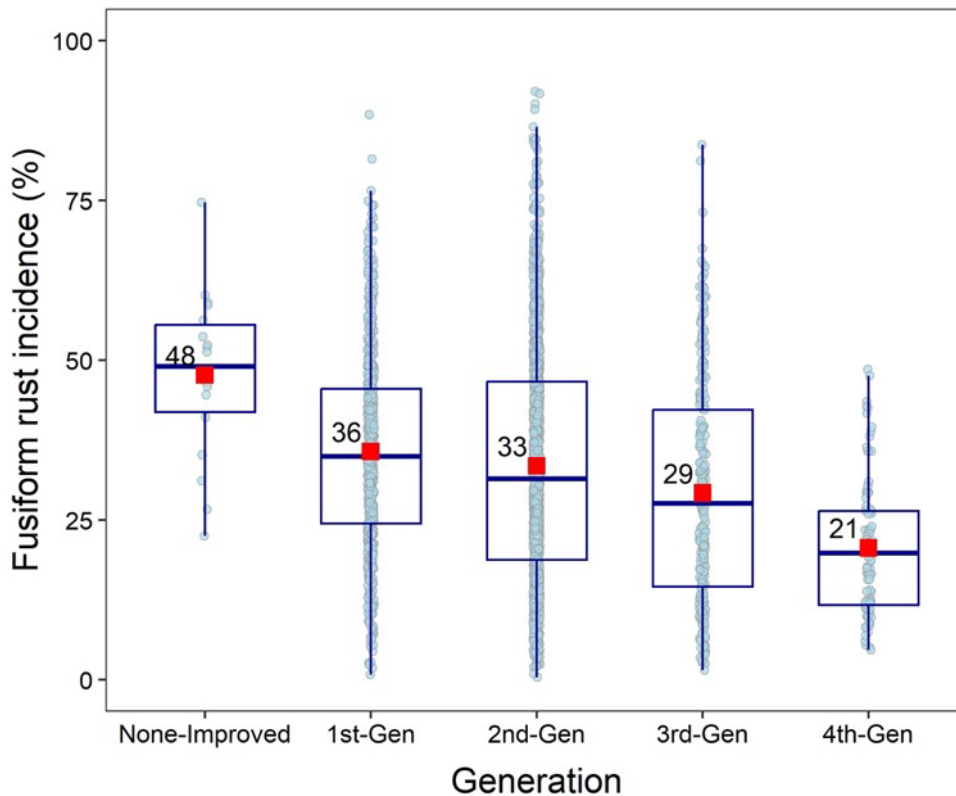
Screening går till så att uppodlade plantor sprayas med en sporsuspension i en kontrollerad miljö med en bestämd koncentration sporer från utvalda sporkällor, ofta insamlade i det område träden är avsedda för. Plantorna odlas därefter vidare och efter 6–9 månader kan eventuella infektioner läsas av.

De testade frökällorna kan sorteras i hög, medel eller låg resistens mot fusiform rust, och dessa resultat kan användas för att rikta frökällor mot områden med olika nivåer på infektionstryck, men också för urval i förädlingen eller för genetisk gallring i fröplantager. Anläggningen används också för utvecklings- och forskningsprojekt, till exempel för att förfinna testmetoder, undersöka de biokemiska och fysiologiska mekanismerna bakom infektionen och kartlägga de gener som styr infektionsrisken.

Förädlingen i sydöstra USA sker genom kooperativ i samarbete med universiteten. Förädling av *P. elliotii* har bedrivits av Cooperative Forest Genetics Research Program (under ledning av University of Florida) sedan 1950-talet, och trädslaget har idag gått igenom tre förädlingscykler. För varje cykel har motståndskraften ökat, och förekomsten av angripna träd har minskat från 50 till 36 procent samtidigt som virkesproduktionen har ökat med 25–30 procent (Suasetta 2020).

Förädling av *P. taeda* är inne i sin fjärde förädlingscykel i Cooperative Tree Improvement Program vid NC State University. Det genomsnittliga avelsvärdet (som ett index sammansatt av olika egenskaper) är då 63 procent högre än hos slumpmässigt utvalda kandidatträd (Isik & McKeand 2019). Andelen infekterade träd har minskat stegvis genom alla förädlingscykler, från 48 procent hos oförädlade träd till 21 procent i fjärde generationen (figur 15) (Fikret Isik, pers. komm.).

En beräkning visar att för varje dollar som spenderats på fusiform rust-resistens har gett en vinst på 5–20 dollar (Sniezko m.fl. 2014).



Figur 15. Andel avkommor av *Pinus taeda* med infektion av fusiform rust i olika förädlingscykler från NC State University Cooperative Tree Improvement Program (från Fikret Isik, pers. komm.).

Screening för white pine blister rust, Dorena, OR

White pine blister rust (filtrost) är en införd svampsjukdom med ursprung i Kina men som blivit etablerad i Nordamerika genom plantimport från Europa. Den skadegörande svampen *Cronartium ribicola* är invasiv och orsakar svåra skador på flera fembarriga tallarter i Nordamerika, däribland western white pine (*Pinus monticola*), sugar pine (*P. lambertiana*), eastern white pine (*P. strobus*), limber pine (*P. flexilis*) och whitebark pine (*P. albicaulis*). Svampsjukdomen i kombination med utbrott av mountain pine beetle har bidragit till att *P. albicaulis* är hotad som art. *C. ribicola* har *Ribes* (vinbär) som mellanvärd. Under de 100 år som svampen har funnits i Nordamerika har den dödat miljontals träd och förändrat ekosystemet på många platser (Sniezko m.fl. 2014).

Motståndskraft mot white pine blister rust screeningtestas rutinmässigt, men ofta görs urvalet också i kombination med resultat från fältförsök. Screeningtester av unga plantor görs på ett flertal ställen i USA och Kanada (King m.fl. 2010). Vanligast är att unga (2–4 månader gamla plantor) inokuleras och läses av efter 6–12 månader för att hitta familjer som har fullständig resistens. Äldre, 2-åriga plantor används för att läsa av ett bredare spektrum av skador (partiell resistens) som syns 3–5 år efter inokuleringen. Sporer som används vid inokuleringen kommer från vilda eller odlade *Ribes*-blad (Sniezko m.fl. 2014). Till skillnad mot fusiform rust, där infektionen inte behöver gå via barr, infekteras white pine genom klyvöppningar i barren.

Vid USDA Forest Service genetiska center i Dorena (Oregon) har dessa screeningtester pågått i över 50 år. Testmetodiken är effektiv och normalt får 95–100 procent av alla plantor infektioner på barren i de tester som görs för fullständig resistens. I testerna för partiell resistens syns stora skillnader i hur långt och snabbt skadorna utvecklas mellan

olika familjer. De partiellt resistenta familjerna har en mer långsam svamptillväxt och en högre överlevnad även om de har symptom på stamskador.

Fullständig resistens har hittats hos fyra arter av white pine och denna resistens styrs av en dominant gen i vardera av trädslagen (Sniezko m.fl. 2014). Totalt är det väldigt få familjer som uppvisar fullständig resistens (0–8 %). Partiell resistens är dock vanligare. Här är de bakomliggande mekanismerna mer komplexa eftersom resistensen är en kvantitativ egenskap. Även om de flesta familjerna får skador finns skillnader mellan familjer som utnyttjas i urvalet till förädling och fröplantager.

De fältförsök som utvärderar effekterna av resistensförädlingen är relativt unga men i de aktuella förädlingsprogrammen räknar man med att de bästa familjerna har mer än 40 procent högre överlevnad än icke-resistenta familjer (Sniezko m.fl. 2014).

Kostnader och ekonomiska vinster av mer resistent träd

Att skog skadas är ofrånkomligt och något som hör till i det naturliga samspelet mellan svampar, insekter, betande djur och träd. Om skadorna blir orimligt stora innebär det dock kostnader för skogsbruket, samhället och även ekosystemet. Träd kan skadas på olika sätt beroende på skadeorsak. Förlorad virkesproduktion, nedsatt virkeskvalitet och mortalitet är komponenter som går att beräkna ekonomiskt, i de fall de är kända. Mer komplicerat blir det om skadorna drabbar mer episodiskt och slumpmässigt, inte dödar träden men påverkar deras tillväxt och om avgångar innebär att ”fel” trädslag måste planteras för att motverka skador i nästa generation. Till det kommer också kostnader för samhället och skogssektorn i form av påverkan på virkesbalans och kolbindning, och dessutom kostnader för åtgärder som saneringsröjningar, viltstängsel, skydd mot snytbagge och stubbehandling mot rotröta. Det har gjorts olika ansatser att beräkna kostnader för skador. Tabell 3 visar de kostnader som redovisas i Skogsskötselserien.

Tabell 3. Uppskattade kostnader eller virkesförluster för några skogsskador (Skogsskötselserien nr 12, Skador på skog, del 1)

Skadeorsak	Uppskattad kostnad
Rotröta	0,5–1 miljard kr per år
Snytbagge	100-tals miljoner kr per år. 0,5–1 miljard kr per år (utan plantskydd) Permetrinstoppet: cirka 550 miljoner kr per år
Gremmeniella	1–1,5 miljarder kronor (epidemi 2001–2003)
Beteskadorna av älg	19 % produktionsförluster i tallskogarna. 980 miljoner kr per år i Götaland med skadenivåer 2015 och 2016 enligt älgbetesinventeringen
Almsjuka	Till exempel bekämpning i Malmö 1984–1995: 6,7 miljoner kr
Stormen Gudrun	15 miljarder kronor (samhällsekonomiska kostnader för skogsbruket)

En beräkning av viltbetesskador på tallmark i hela landet kom fram till att viltbetet innebär en produktionsförlust på 6,9 miljoner m³fub/år, och den ekonomiska förlusten utöver den tolerabla nivån beräknades till 1,4 miljarder kr i förlorat skogsnetto. I genomsnitt var förlusten på produktionsmark 71 kr per hektar och år. En samhällsekonomisk beräkning kom fram till att betesskadorna leder till ett minskat förädlingsvärde på 11,9 miljarder kr per år, utöver maximala tolerabla förluster om betesskadorna fortsätter på nuvarande nivå. Dessutom leder den minskade tillväxten till att koldioxidupptaget minskar med nära 12 miljoner ton per år (Örlander & Frisk 2020).

En motsvarande beräkning utförd av Skogsstyrelsen kom fram till siffror i samma storleksordning. Viltskador på tallungskog beräknades kosta 1,15 miljarder kr per år i tillväxtförlust. Med åtgärder som viltstängsel (för 100 miljoner kr/år) blir kostnaden för skogsbruket ca 1,25 miljarder per år (Bergquist m.fl. 2019).

Bland skadesvamparna är rotticka den ekonomiskt mest besvärliga skadegöraren på gran. På tall finns flera svampar som sätter ner tillväxt och kvalitet, och de senaste decennierna har törskate vuxit fram som ett hot mot tallskog i norra Sverige. Resistens mot skadesvampar är nästan alltid en komplex kombination av trädets vitalitet, förmåga att försvara sig och svampens virulens. Fullständig resistens är därför ovanligt. Åtgärder mot skadorna kan innefatta skogsskötselåtgärder som val av trädslag, saneringshuggningar och stubbehandling (mot rotröta). En annan åtgärd är att öka resistensen hos det planterade materialet med urvalsförädling. En resistenshöjning på några få procent får sannolikt stora ekonomiska effekter.

Kostnader för skador av rotröta på gran

Tidigare beräkningar av rotröteskador har angett förluster på €790 miljoner per år i Europa för förlorad virkeskvalitet och sänkt tillväxt (Woodward m.fl. 1998). I Sverige har kostnaden beräknats till 475 miljoner kr per år (Bendz-Hellgren m.fl. 1998). Beräkningen tog bara hänsyn till kvalitets- och tillväxtnedsättningar, däremot inte den ökade risken för mortalitet, vindfällning och att rötan kan spridas vidare till nästa generation. För skogsbruket innebär också stubbehandling en stor kostnad.

Kostnadsberäkningar från 1990-talet får användas försiktigt idag. Dels har det allmänna kostnadsläget, virkespriserna och skogsbrukskostnaderna ökat, dels har rotrötan sannolikt ökat som en effekt av ett varmare klimat. En mer fullständig kalkyl av rotrötans kostnader skulle också behöva innefatta kolbindningseffekter på grund av sänkt tillväxt, ekologiska effekter av att ”fel” trädslag används på rötinfekterade marker och inte minst att rötskadorna innebär förluster för skogsindustrin, med konsekvenser både på ekonomi och arbetstillfällen.

Minskad tillväxt

Träd som inte dör eller faller för vind får nedsatt tillväxt av rotrötan, vilket delvis kan förklaras av att ett skadat rotsystem får svårare att ta upp vatten och näring. Dessutom innebär försvaret mot rötsvampen att mindre resurser finns tillgängligt i veden för tillväxt (Bendz-Hellgren & Stenlid 1995).

Bendz-Hellgren och Stenlid (1995) undersökte träd som var infekterade respektive friska på 1950-talet med data från Riksskogstaxeringen. I slutet av en 25-årsperiod hade de rotröteinfekterade träden en nedsatt grundytetillväxt på i genomsnitt 9,6 procent. Andra studier har kommit fram till 14–37 procent minskad diametertillväxt; i dessa ingår även kraftigt rötskadade träd som inte kan användas i mer långsiktiga tidsserier i Riksskogstaxeringen. I en annan studie av Bendz-Hellgren och Stenlid undersöktes effekten även på volym- och höjdtillväxt (Bendz-Hellgren & Stenlid 1997). Efter cirka 20 år var volymtillväxten på rötskadade träd 23 procent lägre och höjdtillväxten 25 procent lägre. I genomsnitt skattar författarna att diametertillväxten på grund av röta är 9 procent, och att detta innebär en tillväxtförlust på 620 000 m³ per år på nationell nivå.

Mortalitet och stormfällningsrisk

På lång sikt kan rotröta leda till att träd dör, och det händer också att de dör redan inom fem år efter infektion även om det är ovanligt. Normalt så hinner granar i den brukade skogen bli avverkad innan de har dött. Däremot dör vanligtvis unga plantor som infekteras redan innan de har hunnit utveckla röta (Bendz-Hellgren m.fl. 1998).

Rotrötan försämrar trädens stabilitet och stormfasthet. En undersökning av stormskador i gallringsbestånd visade att 61 procent av de stormfällda träden hade rotröta (Eriksson 1981).

Kvalitetsnedsättning

Den största ekonomiska effekten av rotröta är kvalitetsnedsättningen. Eftersom rotrötepelaren normalt når upp till 3–5 meter påverkas den mest värdefulla bottenstocken som kan bli nedklassad från sågtimmer till vrak eller energived. En viss andel röta accepteras i granmassaved, 2 procent av en traves ändyta. Är andelen upp till 25 procent kan massaveden accepteras som sekunda barmmassaved med lägre betalning (Biometria 2023).

Värdet av denna sortimentsvandring beror på vilka alternativa användningsområden som finns för virke med och utan rötskador. Ibland vrakas rötskadat virke utan ersättning och ibland kan det betalas som energived, där värdet varierar med efterfrågan.

I ett vidare perspektiv får kvalitetsnedsättningen påverkan på industri och virkesbalanserna. Förlusten av grantimmer innebär också mindre råvara till byggnation, vilket också påverkar kolinbindningen. Sådan påverkan är dock svår att värdera ekonomiskt.

Tidigare beräkningar av rotrötans ekonomiska kostnader

I Danmark beräknades på 1980-talet kostnaden av rotröta till 50 miljoner Dkr per år, motsvarande värdet av 125 000 m³ grantimmer. Beräkningen utgick bara från förlust av sågtimmer och inte påverkan på massaved, och var därför sannolikt en underskattning (Woodward m.fl. 1998).

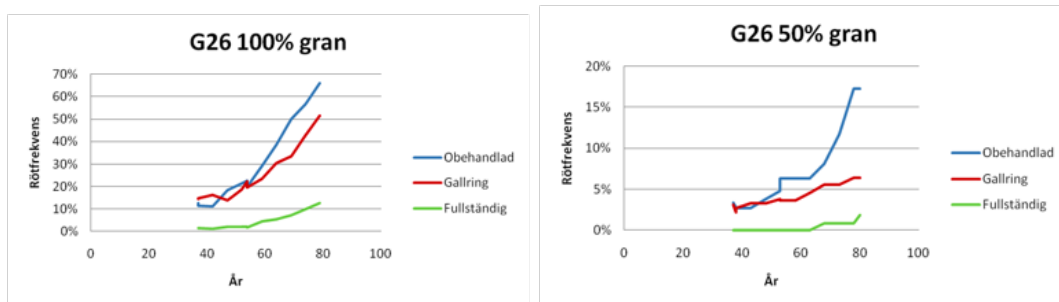
I Sverige gjordes en beräkning från början av 1990-talet att kvalitetsförlusterna på grund av rotröta kostade 275 miljoner kr per år. Om även tillväxtreduktionen räknas in var kostnaden 475 miljoner kr, vilket motsvarade värdet av 1 miljon m³ grantimmer (Bendz-Hellgren & Stenlid 1995).

Stubbehandlings ekonomi

En åtgärd för att minska rotrötans spridning i gran är stubbehandling. Beräkningar av åtgärdens lönsamhet ger en bild av kostnaderna för rotröteskadorna. Thor m.fl. räknade på behandlingseffekter i fyra typbestånd (Thor m.fl. 2005, 2006). I ett granbestånd på skogsmark (SI=G26) var slutvärdet (med 3 % ränta) 127 000 kr per hektar efter stubbehandling i både gallringar och slutavverkning. Utan stubbehandling var slutvärdet 104 000 kr. Andelen träd med röta i stubbhöjd var vid slutavverkningen 70 procent utan behandling och ca 15 procent med stubbehandling. I ett annat typbestånd, första generationens granbestånd på åker (SI=G32), var slutvärdet med stubbehandling i gallring 180 000 kr per hektar och utan stubbehandling 155 000 kr. Det betyder att en skogsägare kan tjäna i storleksordningen 20 000 – 30 000 kr per hektar på behandling. I två blandbestånd (tall och gran, SI=T24/G24) i två län var stubbehandling lönsam i Östergötland men inte i Hälsingland.

Thor står också bakom en beräkning av stubbehandlingens ekonomi hos markägaren Sveaskog (Thor 2011). Rötutvecklingen simulerades för tre typbestånd med olika behandlingsalternativ, och sedan beräknades virkesvärdet med prislistor från fem delar av Sverige. Kostnaden för stubbehandling var 4 kr/m³fub i slutavverkning, 12 kr/m³fub i förstagallring och 10 kr/m³fub i andragallring. Utan behandling var rötfrekvensen i bördiga bestånd (G26 och G32) 60 procent vid slutavverkningen, och med fullständig stubbehandling 5–10 procent (figur 16). Rötan innebar också att 5 procent av volymtillväxten förlorades. I ett rent granbestånd var nuvärdet av fullständig behandling (både gallring och slutavverkning) 12 procent högre än utan behandling.

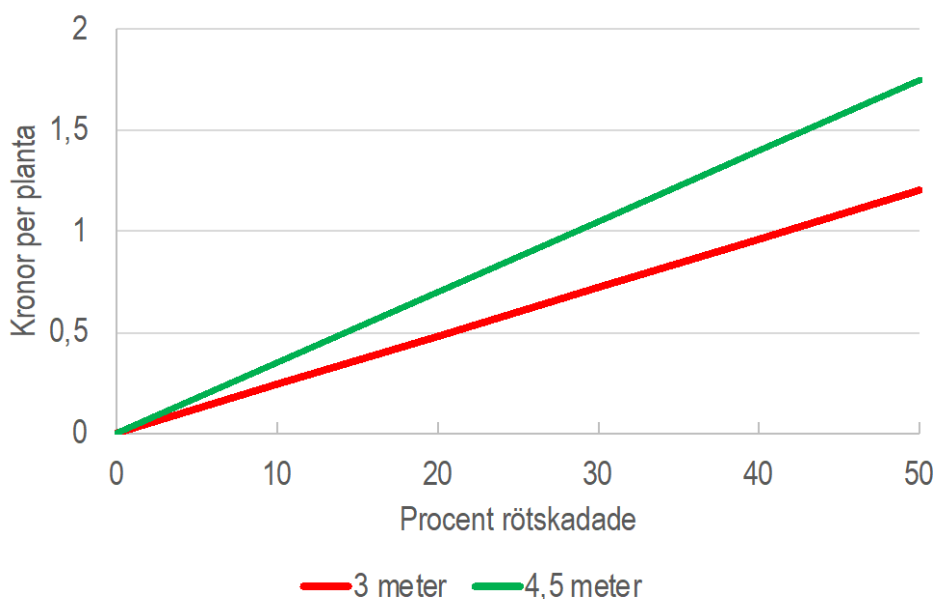
Den sammanlagda tillväxtförlusten på Sveaskogs brukade marker (som då var 2,35 miljoner hektar) av att inte behandla stubbar var ca 140 000 m³sk/år, jämfört med om stubbehandling utförs i både slutavverkning och gallring. Nettonuvärdet av stubbehandling i både gallring och slutavverkning på hela arealen var 20 miljoner kronor per år. Kostnaden beräknades till 12 miljoner kronor per år (Sonesson & Rosvall 2011).



Figur 16. Simulerad rötutveckling i granbestånd med 100 % och 50 % gran. Blå linje=obehandlat, röd=stubbehandling i gallring, grön=stubbehandling i både gallring och slutavverkning. Från Thor (2011).

Lönsamhet med förädling för resistens

Karlsson & Swedjemark (2006) gjorde en beräkning av betalningsförmågan för mer rötresistenta plantor som en effekt av urvalsförädling. I ett tänkt fall där 50 procent av träden är rötskadade vid slutavverkning och rötpelaren är 3 meter, minskade beståndets värde med 20 000 kr/ha. Om rötpelaren är 4,5 meter ökade förlusten till 30 000 kr/ha. Om plantor med 10 procent-enheter lägre rötfrekvens var tillgängliga, kunde dessa betalas med 24–35 öre extra (figur 17).



Figur 17. Betalningsförmåga i extra kostnad per planta för att erhålla ett rotrottefritt bestånd givet olika nivåer på rötfrekvens vid slutavverkning. Linjerna illustrerar två scenarier för rötpelarens längd. Om resistensförädling kan minska andelen rötskadade träd med 10 %-enheter betyder det cirka 24–35 öre betalningsförmåga. Från Karlsson & Swedjemark (2006).

En motsvarande beräkning av värdet av mer rötresistenta granar har gjorts för granfröplantagen Bredinge. Under sin livslängd på 30 år har plantagen genererat ungefär 380 miljoner granplantor. Det betyder att Bredingeplantagens avkommor växer på ungefär 8 procent av den produktiva granmarken i Götaland. Om plantorna hade haft 5 procent mindre rötfrekvens skulle detta öka virkesproduktionen med 76 000 m³ per år, motsvarande 38 miljoner kr (Andreas Helmersson och Malin Elfstrand, pers. komm.).

Överslagsberäkning av rotrötans kostnader på nationell nivå

Denna nya beräkning är gjord för att få en aktuell storleksordning på rotrötans ekonomiska effekter. Beräkningen tar bara hänsyn till kvalitetsförluster vid slutavverkning i gran (där sågtimmerstockar blir nedklassade) och tillväxtförluster p.g.a. röta. Till det kommer andra kostnader som rötskador i gallringsvirke, stormfällningsrisk och påverkan på virkesförsörjning och kolbalans. Kostnaden för stubbehandling är inte heller medräknad eftersom den leder till en motsvarande, men svårberäknad, vinst i form av lägre rötfrekvens.

Kostnaden idag kan ställas mot den potentiella vinst som kan erhållas genom ett mer rotröteresistent plantmaterial. Här måste man vara observant på att det tar tid från urvalsförädlingen tills att plantor nått ut på bred front i skogen.

Förutsättningar

Beräkningen utgår från slutavverkad granvolym i Götaland, Svealand och södra Norrland. I norra Norrland förekommer också rotröta i kustnära områden men i mindre grad. Aktuella data för tillväxt, avverkning och sortimentsfördelning är hämtade från Skogsdata 2023 och Skogsstyrelsens statistikdatabas (tabell 4–6) (SLU 2023, Skogsstyrelsens statistikdatabas).

Tabell 4. Avverkad volym, miljoner m³sk 2019 (Skogsstyrelsens statistikdatabas) samt årlig tillväxt för gran, miljoner m³sk (Skogsdata 2023).

	Avverkad volym, milj. m ³ sk				Årlig tillväxt
	Gran	Tall	Löv	Totalt	Gran
Norra Norrland	4,1	8,2	1,4	13,7	6,03
Södra Norrland	7,4	7,9	2	17,4	12,64
Svealand	19,5	9,9	2,7	32	13,34
Götaland	24,1	5,6	4,1	33,8	18,64
Hela Sverige	55,1	31,6	10,2	96,9	50,66

Tabell 5. Fördelning på avverkningsformer, volym i miljoner m³sk, samt genomsnittlig ålder vid slutavverkning (Skogsdata 2023).

	Volym, miljoner m ³ sk				Slutavv m ³ sk/ha	Ålder slutavv år	
	slutavv	gallring	röjning	övrigt			
Norra Norrland	10,4	2,4	0,2	0,5	13,5	160	105
Södra Norrland	11,4	4,7	0,4	0,6	17,1	215	119
Svealand	22,7	6,6	0,3	2,2	31,7	291	95
Götaland	20,7	7,3	0,6	4,2	32,7	370	85
hela Sverige	65,1	21,0	1,4	7,5	95	259	100

Tabell 6. Nettoavverkning 2019, miljoner m³fub (Skogsstyrelsens statistikdatabas).

Sortiment	miljoner m ³ fub	%
sågtimmer barr	39,1	50,5%
sågtimmer löv	0,2	0,3%
massaved barr/löv	31,8	41,1%
brännved av stamvirke	5,9	7,6%
övrigt virke	0,3	0,4%
Summa nettoavv m³fub	77,4	100%

Tillsammans med kvarlämnade träd motsvarar avverkningen knappt 96 miljoner m³sk (jfr tabell 4 ovan)

Använda värden och antaganden:

- Årligen avverkad granvolym i hela landet utom norra Norrland 51,0 miljoner m³sk
- Slutavverkning står för 69 procent av den avverkade nettovolymen (antaget lika för alla träslag).
- Årligen slutavverkas då 35,2 miljoner m³sk gran.
- Rötskadade granar har en rötpelare på 3 meter. Röta innebär nedklassning från sågtimmer till bränsleved.
- Sågtimmerpris 670 kr/m³fub, granmassaved 460 kr/m³fub, barrmassaved 460 kr/m³fub, bränsleved 200 kr/m³fub.

Virkesvärdesförsämring, beståndsskattningar

Tre typbestånd för vardera regionen beräknades med hjälp av verktyget Beståndsval (tabell 7). I Beståndsval görs en utbytesberäkning med Ollas utbytesfunktioner där det går att ställa in andel röta i beståndet. Röta i rotstocken innebär i programmet att sågtimmer klassas som barrmassaved. I beräkningen nedan översattes barrmassavolymen till bränsleved.

Tabell 7. Typbestånd i Beståndsval (grunddata för virkespris justerades enligt ovan).

	Kronoberg	Västmanland	Västernorrland
Andel gran	100	100	100
SI	G26	G24	G22
Ålder	85	95	110
Volym, m ³ sk	370	290	220
Diameter, cm	30	28	25

Beräkningar gjordes för 0, 15 och 30 procent röta i beståndet. Virkesvärdets försämring p.g.a. röta kunde då skattas (tabell 8). Rotnettoberäkningen, som också genereras av programmet, ger samma storleksmässiga effekt på försämringen.

Tabell 8. Virkesvärde beräknade för valda typbestånd i Kronoberg, Västmanland och Västernorrland med Beståndsval med olika inställningar för rötfrekvens, kr/hektar.

	Kronoberg	Västmanland	Västernorrland
Virkesvärde, kr/ha:			
0 % röta	168 305	127 104	89 530
15 % röta	163 499	123 378	87 045
30 % röta	158 692	119 651	84 651
Volym, m³fub per hektar	319	249	186
Volym, m³sk per hektar	370	290	220
Minskat virkesvärde p.g.a. röta, kr/m³sk:			
15 %	13,0 kr	12,8 kr	11,3 kr
30 %	25,3 kr	25,7 kr	22,6 kr

Kostnad på nationell nivå, virkesvärdesförlust

Virkesvärdesförlust i slutavverkning vid 15 procent röta, antaget en minskning på 13 kr/m³sk:

35,2 miljoner m³sk*13 = 458 miljoner kronor per år

Virkesvärdesförlust i slutavverkning vid 30 % röta, antaget en minskning på 25 kr/m³sk:

35,2 miljoner m³sk*25 = 880 miljoner kronor per år

Varje procent lägre rottrötefrekvens ger då en årlig ökning i virkesvärde på 29–31 miljoner kronor.

Till detta kommer förluster av virkesvärde vid gallring.

Kostnad på nationell nivå, tillväxtförluster

Tillväxtreduktion p.g.a. rottröta: 10 %. Med 15 % röta reduceras beståndstillväxten med 1,5 %, med 30 % röta reduceras den med 3,0 %.

Granens tillväxt utom norra Norrland: 44,6 miljoner m³sk (tabell 9). Minskad tillväxt p.g.a. 15 % röta: 669 000 m³sk, 30 % röta 1 338 000 m³sk.

Tabell 9. Årlig tillväxt av gran i Sverige, miljoner m³sk (Skogsdata 2023).

	Årlig tillväxt av gran, milj. m ³ sk
Norra Norrland	6,03
Södra Norrland	12,64
Svealand	13,34
Götaland	18,64
Hela Sverige	50,66

Värdet av den förlorade tillväxten beror på rotnettovärdet. Med en försiktig skattning på 450 kr/m³sk (fördelning på både gallring och slutavverkning) blir det totala årliga förlusten av minskad tillväxt ca 301 miljoner kronor vid 15 procent rottröta i gran. Vid 30 procent röta blir tillväxtförlustens värde 602 miljoner kronor per år.

Summering: kostnad på nationell nivå, kvalitet och tillväxt

Den sammanlagda kostnaden av en rötnivå på 15 % är då **458 + 301 = 759 miljoner kronor per år.**

Varje procentenhets minskning av rötfrekvensen kan då värderas till (minst) 51 miljoner kronor per år.

Den sammanlagda kostnaden om rötnivån är 30 % blir **880 + 602 = 1 482 miljoner kronor per år.**

Om resistensförädling leder till en halverad rötfrekvens, från 15 till 7,5 %, är vinsten (minst) **380 miljoner kronor per år.**

Det finns faktorer som talar för både högre och lägre kostnader:

- Rötspelarens längd, dvs. den sågtimmerlängd som påverkas, är normalt beräknad som 3 meter. Om den rötpåverkade rotstocken är längre blir förlusterna p.g.a. röta större.
- 15 procent rötskadade träd är genomsnitt för all gran, men rötfrekvensen är ofta högre i slutavverkningsskog.
- I praktiken görs avverkning på vintern i norra Sverige, vilket medför lägre spridning. Stubbehandling bidrar också till reduktion av skadorna i enskilda bestånd (stubbehandling innebär dock en kostnad i storleksordningen tiotal miljoner kr per år).
- Lätt rötskadat virke kan klassas ned till sekunda massaved i stället för bränsleved. Å andra sidan har industrin ibland vrakat bränsleved utan betalning. I exemplet ovan har 200 kr per m³sk använts, vilket är ett relativt högt bränslepris.

Kostnaden för samhället och industrin är inte inräknade. Här tillkommer kostnader för virkesbalans, behov av importvirke, minskad kolinbindning etcetera.

Kostnader för skador av törskate på tall

Det finns inte tillräckligt med underlag för att beräkna de nationella kostnaderna för törskatesvampens skador. De inventeringar som har gjorts i ungskog visar att skadorna är omfattande, framför allt i Norrbotten, där över 80 procent av bestånden kan vara drabbade och 10–15 procent av bestånden har törskateangrepp på mer än var tionde tall. Det saknas dock underlag för att skatta fortsatta angrepp, mortalitet och tillväxtreduktioner. De två simuleringsstudier som presenteras nedan baseras på antaganden om nyrekrytering av skador och dödlighet, men fortfarande saknas empiriska data som stödjer dessa antaganden. Vissa svar på hur skadorna utvecklas från unga till äldre bestånd kan komma med Skogforsks nya inventering i äldre skog. Det är dock angeläget att vidga undersökningarna till fler bestånd, i olika åldrar och trädslagsblandningar, och på olika bördigheter.

Några exempel på kunskapsluckor och svagheter i tidigare inventeringar:

- Inventeringar i ungskog utförda av Riksskogstaxeringen, skogsbolag, Norra Skog och Skogforsk visar en stor variation i angreppsfrekvens. Det finns flera förklaringar till skillnaderna: inventeringens omfattning, inventerad geografi, beståndsålder, trädslagsammansättning och hur inventeringen är utförd. Det kan heller inte uteslutas att skadorna har över- eller underdiagnostiserats. Det finns starka skäl att utöka inventeringarna till att omfatta objekt på olika ståndorter, större geografisk spridning, olika åldrar och med en väl genomgången kalibrering av inventeringsmetodik.
- Angreppens utveckling över tid är dåligt kartlagd. Exempelvis fann Skogforsk i två inventerade försök att andelen träd med törskate 25–42 procent i åldrarna 23–30 år. Vid 19–21 års ålder hade träden däremot inga törskateangrepp (Persson m.fl. manus). Det saknas till stor del kunskap om skadeutvecklingen högre upp i åldrarna.
- Skadornas påverkan på de enskilda trädens tillväxt och mortalitet är svårskattad. Skador långt ner på stammen kan leda till trädod medan skador högre upp eller bara på grenar kan leda till tillväxtförluster utan att träden dör.
- Skadornas påverkan på beståndens tillväxt är lika svår att skatta. Utrymmet för enstaka träd som dör kan fyllas av naturligt förnygrade plantor.
- Påverkan av sanerande gallring är oklart. Den värdväxlande formen av törskate måste passera via skogskovall innan den kan smitta nya tallar medan den icke värdväxlande kan sprida svampen direkt till andra tallar.
- Gallring som innebär att beståndet öppnas gynnar markfloran och därmed skogskovall. Gallringen kan i så fall gynna vidare spridning av svampen.
- I vilken grad tall planterats på bördiga marker, och hur angreppen skiljer sig mot svagare marker, måste undersökas vidare. Svennerstam (2023) rapporterar att tall planterad på granmark har en markant högre angreppsfrekvens.
- Skadade träd får också kvalitetsnedsättningar som kan innebära nedklassning från sågtimmer till massaved eller vrak, men i vilken grad är dåligt känt. Törskateangripen ved har visat sig svår att identifiera okulärt, och det finns risk att skadorna underskattas i sågtimmerinmätningen (Hyll m.fl. 2022).
- Förtida avveckling av bestånd måste ibland göras om skadorna är omfattande. Omfattningen och hur stora arealer det handlar om är dock inte sammanställt. Det är också oklart i vilka fall förtida avveckling och nyplantering är lönsamt (se studierna

nedan). Om avveckling innebär en minskad risk för spridning av svampen till angränsande bestånd kan det dock vara nödvändigt.

- Det finns ingen systematisk sammanställning om hur ofta törskateproblemen leder till inoptimala trädslagsval, exempelvis om gran planteras på tallmark för att undvika skador. Observationer pekar dock i den riktningen (Svennerstam opubl.)
- Skadorna tenderar att ha ökat, och kan förväntas öka mer med ett förändrat klimat (Svennerstam opubl.). Detta behöver undersökas mer.

Om en avveckling är lönsam eller inte beror på beräkningssätt. Två olika studier har genomförts för att belysa frågan.

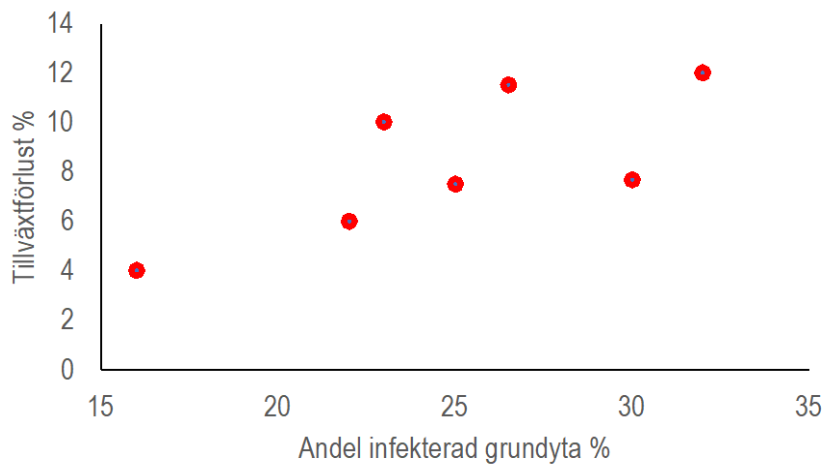
Studie av produktionsnedsättning

En studie från Skogforsk utgick från sju hårt angripna talldominerade gallringsbestånd i Norrbotten och Västerbotten i åldrarna 28–62 år (Fredriksson m.fl. 2023). I genomsnitt var 30 procent av de levande huvudstammarna angripna av törskate, om även döda stammar räknades med var 43 procent angripna. Majoriteten av stammarna med törskate var svårt skadade, vilket innebär att stammen hade minst ett större stamsår och att kronan var synligt påverkad. Huvuddelen av skadorna hade troligen skett när bestånden var unga, och spridningsförloppet verkade vara avstannande.

Överlevnaden var låg i dessa bestånd, vilket inte är ovanligt i kärva klimatlägen; antalet huvudstammar av tall varierade från 400–1367 stammar per hektar. En frågeställning var i vilka lägen det lönar sig att avveckla ett hårt angripet bestånd och starta ett nytt. Utgångspunkten var en detaljerad inventering av nuläget. Därefter simulerades beståndens utveckling med Heureka under olika antaganden kring hur snabbt infekterade träd dör, hur beståndet sköts med gallringar och om det törskateinfekterade virket klassas ned till vrak, massaved eller inte alls.

Tillväxtförlusten fram till slutavverkning, beräknat från att törskateangripna träd dör efter vitalitetsklass jämfört med att alla angripna träd överlever, varierade mellan 4–12 procent beroende på infektionsgraden i utgångsbeståndet (figur 18). Beståndens nuvärdesminskning varierade mycket beroende på scenario, 11–24 procent. Störst ekonomisk effekt hade scenarier där skadat virke blev nedklassat till vrak.

Den ekonomiska effekten av höga angreppsnivåer var mindre än vad forskarna förväntat, och det var troligen inte ekonomiskt försvarbart att avverka dessa bestånd i förtid.



Figur 18. Förlust i total volymtillväxt i förhållande till törskateinfekterad grundyta hos levande huvudstammar vid inventeringstillfället. Tillväxtförlusten anges som procent lägre tillväxt i ett scenario där inga angripna träd dör jämfört med om träd dör i förhållande till vitalitetsklass.

Avverka eller inte avverka

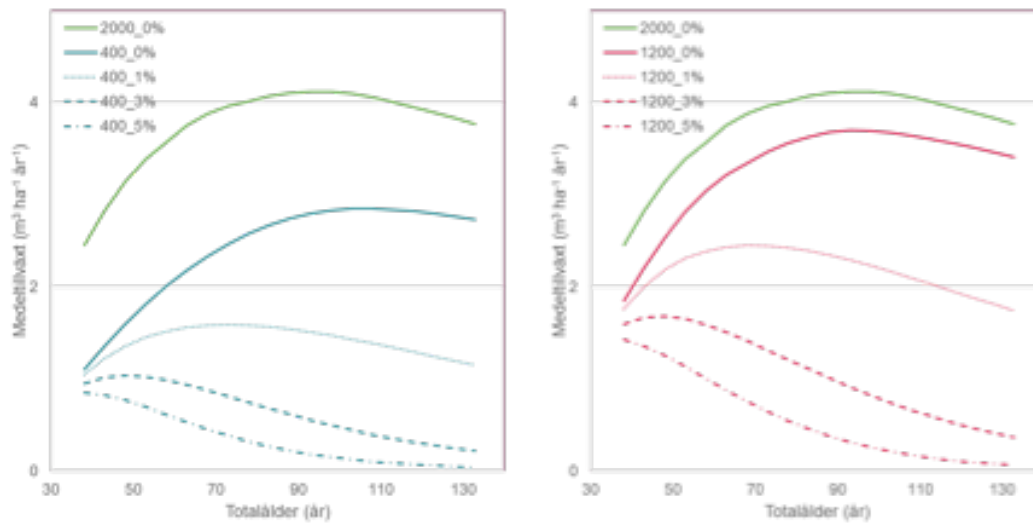
En färsk studie från SLU (Agestam & Nilsson 2023) har utgått från en liknande frågeställning som i Skogforsks rapport ovan. Startläget var två gallringsförsök i SLU:s serie GG-försöken (Gallring och Gödslingsförsök). Ett försök i Norrbotten representerade tall på relativt mager mark (T22). Ett annat låg i Medelpad och representerade tall på relativt bördig mark (T30). Från försöksdata konstruerades ett referensbestånd med 2000 stammar vid 10 meters övre höjd och åldern 38 år (Norrbotten) och 22 år (Medelpad).

Med Heureka beräknades sedan hur beståndet utvecklas vid olika skadenivåer redan från ungdomen. Stamantalet efter röjning antogs vara 400 och 1200 stammar per hektar, utöver det oskadade alternativet med 2000 stammar per hektar. Flera olika alternativ på skadeutvecklingen användes i simuleringen: antingen inga fortsatta skador eller fortsatt avgång med 1, 3 och 5 procent per år.

Med 1200 stammar i utgångsläget var medeltillväxtens minskning vid kulmination 10 respektive 9 procent för Norrbotten respektive Medelpad. Med 400 stammar var motsvarande tillväxtförlust 32 respektive 24 procent. Dessa siffror förutsätter att inga nya skador inträffar efter att träden nått 10 meters övre höjd. Exempel från Norrbottenytan (T22) i figur 19.

Om skadorna och avgångarna fortsätter påverkas tillväxten mycket kraftigt. I exemplet med 400 stammar per hektar och 1 procent fortsatt avgång per år minskar medeltillväxten med 61 (Norrbotten) respektive 49 procent (Medelpad) jämfört med ett oskadat referensalternativ.

De ekonomiska beräkningarna visade att ett reducerat stamantal tjänar på en förkortad omloppstid. Med 400 stammar per hektar förkortas den med 15 respektive 10 år (för Norrbotten respektive Medelpad). Det krävs däremot väldigt stora skador innan det är ekonomiskt försvarbart att slutavverka växande ungskog. Detta stämmer överens med liknande kalkyler som gjordes för gran efter stormen Gudrun 2005. Om de fortsatta avgångarna skulle vara så stora som 5 procent per år rekommenderas dock omedelbar avverkning.



Figur 19. Medeltillväxt vid fortsatt utglesning i beståndet efter 10 meters övre höjd i försöket i Norrbotten, T22. Till väster 400 stammar och till höger 1200 stammar vid 10 meters övre höjd, och fortsatt utglesning om 0, 1, 3 och 5 %. Den gröna kurvan är en jämförelse om utgångsläget var 2000 stammar per hektar och ingen fortsatt utglesning förekommer. Från Agestam och Nilsson (2023).

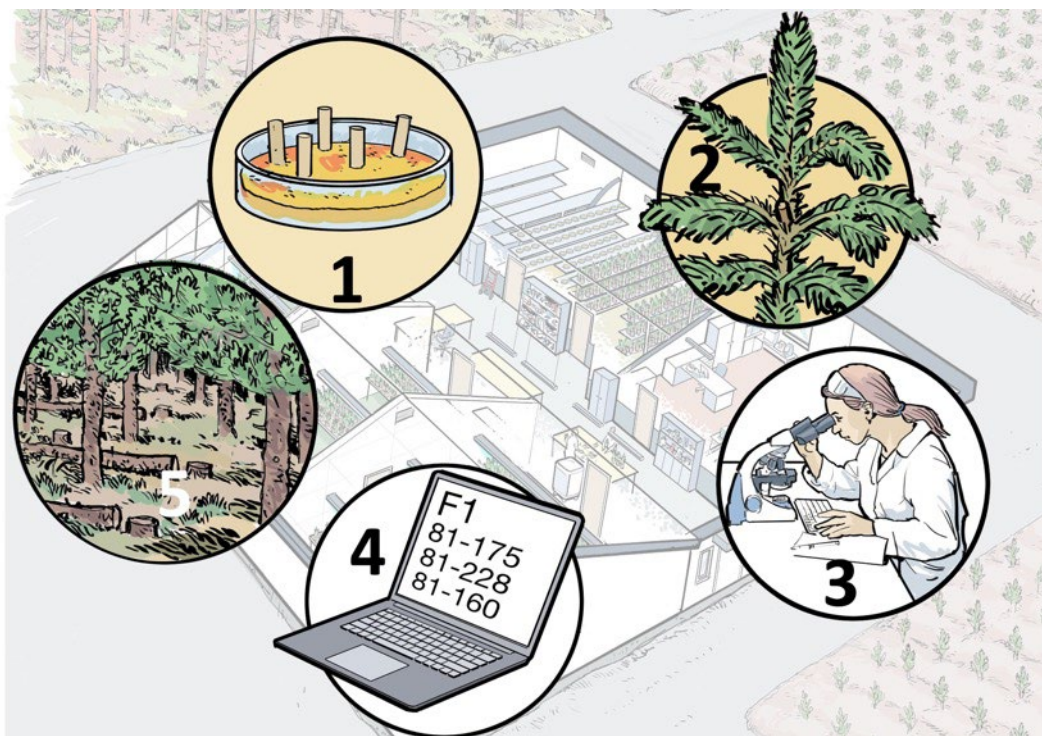
Ett svenskt screeningcenter

Här föreslås att ett screeningcenter för rottröta och törskate etableras vid Skogforsks fältstation i Sävar. Skogforsk har i interna dokument gjort detaljerade beräkningar av testmaterialens omfattning, potentiella genetiska vinster och kostnader för etablering, drift och underhåll.

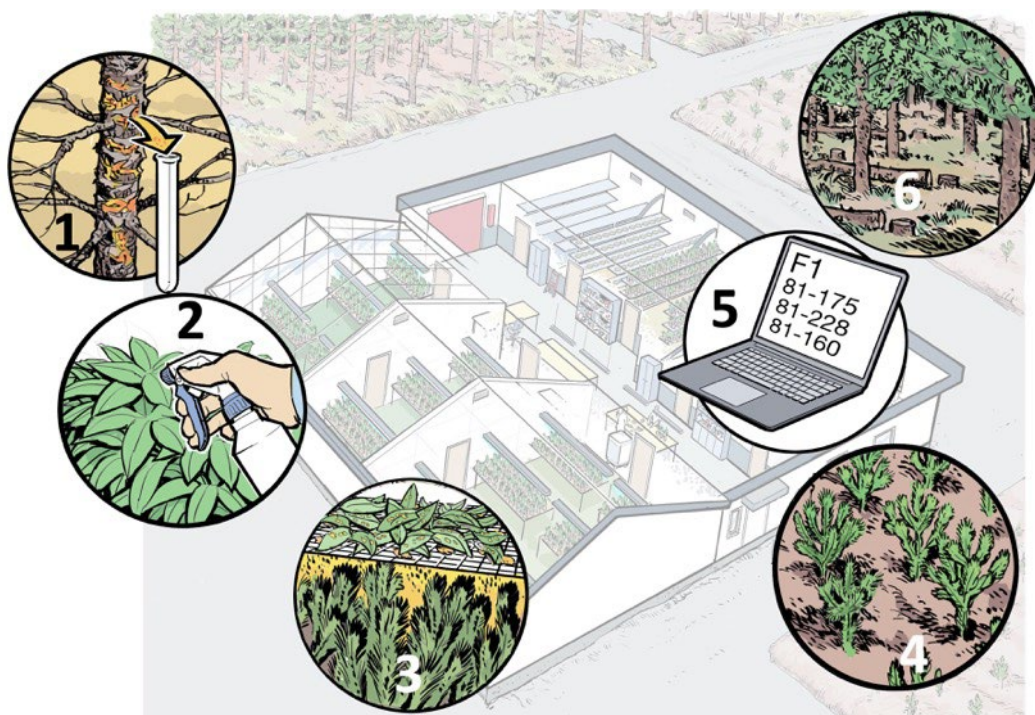
Fördelarna med en placering på Skogforsk i Sävar är bland annat:

- På stationen finns redan en uppbyggd infrastruktur med kunnig odlingspersonal, ledig mark samt rutin/erfarenhet av att samla in, hantera, analysera och långsiktigt lagra stora datamängder.
- Närheten till förädlingsverksamheten gör att screeningen kommer att fungera som en integrerad del av avkommeprövningen och urvalsförädlingen.
- Med screeningdata och den stora mängden insamlade fenotypdata från fältförsök finns underlag för att utveckla molekylärbaserade metoder för tidig testning (genomisk selektion eller markörbaserat urval).
- Screeningcentret kan utnyttjas för fortsatt forskning och metodutveckling tillsammans med forskare på bland annat Skogsskadecentrum och Umeå Plant Science Center.

Metoderna, som i mera detalj beskrivs i avsnitten om rottröta och törskate ovan kan illustreras som på bilderna nedan (figur 20–21).



Figur 20. Ett tänkt system för genetisk screening av rottröta. 1. Inokulering av rottröta på träpluggar. 2. Inokulering på granplantor. 3. Avläsning av rötans spridning i stammen. 4. Avelsvärdering av rötresistens. 5. Genetisk gallring och urval i förädlingen. Teckningar: Gösta Lindwall. Kollage: Mats Hannerz.



Figur 21. Ett tänkt system för genetisk screening av törskatesvamp. 1. Insamling av sporer i fält. 2. Inokulering av pion. 3. Sporspridning från pionblad till tallplantor. 4. Avläsning av skador efter odling på friland. 5. Avelsvärdering av resistens mot törskate. 6. Genetisk gallring och urval i förädlingen. Teckningar: Gösta Lindwall. Kollage: Mats Hannerz.

Möjliga genetiska vinster

Med ledning av de studier som har gjorts i fältförsök beräknades den genetiska vinsten i minskad röttillväxt till 20–42 procent, där den högre siffran står för urval bakåt av första generationens föräldräräd. För törskate beräknas vinsten till 13–28 procentenheter vid en genomsnittlig törskatefrihet på 50 procent. Även här är den högre nivån vid urval bakåt av första generationens föräldräräd.

Kostnader

Kostnaderna kommer att variera över tiden, med den största kostnaden initialt när det fysiska centret anläggs. Innan centret byggs behöver mark iordningställas och metoderna för screening av törskate utvecklas. Dessutom tillkommer uppodling av testplantor (fröplantor för tall och sticklingar för gran). Byggkostnaden uppskattas preliminärt till cirka 30 miljoner kronor och den årliga driftskostnaden till cirka 5 miljoner kronor. Detta ska ställas i relation till de potentiella vinster som följer av ett mer motståndskraftigt skogsodlingsmaterial.

Slutsatser

I Nordamerika har screening för resistens mot rostsvampar pågått i över 50 år, och det har resulterat i att mottagligheten för *fusiform rust* har kunnat halveras i det förädlade tallmaterialet. Någon motsvarande operativ screening förekommer inte i Sverige, trots att förädlingsverksamhet har pågått i cirka 80 år och att 95 respektive 74 procent av alla planterade tall- respektive granplantor har sitt ursprung i fröodlingar.

Det är väl belagt att mottagligheten för såväl rotröta som törskateangrepp står under genetisk kontroll och att nivån på variationen och arvbarheten möjliggör urvalsförädling för ökad resistens mot skadesvamparna. Resistensförädlingen äventyrar inte heller egenskaper som tillväxt och virkeskvalitet. Beräkningar av möjliga genetiska vinster vid urvalsförädling visar att det är fullt rimligt att halvera mottagligheten hos det förädlade materialet.

Det är svårt att skatta de sammanlagda kostnaderna för rotröta och törskate. En försiktig beräkning av kvalitets- och tillväxtförluster p.g.a. rotröta kom fram till att kostnaderna uppgår till minst 759 miljoner kronor per år, förutsatt en genomsnittlig rötfrekvens på 15 procent i gallrings- och slutavverkningsskog. Varje procentenhets minskning av mottagligheten betyder då en besparing på 51 miljoner kronor per år. En halvering (till 7,5 % rötfrekvens) betyder en besparing på 380 miljoner kronor per år.

För törskate finns inte tillräckligt mycket underlag för att beräkna kostnaderna på nationell nivå. Det finns stora kunskapsluckor om hur angreppen påverkar tillväxt och mortalitet och hur skadorna är fördelade mellan bestånd.

Utöver de mer direkta kostnaderna för reducerad tillväxt och kvalitet tillkommer kostnader för ej optimal ståndortsanpassning, minskad kolinbindning och påverkan på virkesförsörjningen för svensk skogsindustri. De ekologiska konsekvenserna av att tall respektive gran väljs bort på i övrigt lämpliga marker kan också bli stora.

Ett screeningcenter i Sverige är en förutsättning för att förbättra resistensen hos det förädlade materialet. I fältförsök identifieras skador när de uppkommer, men skadorna varierar stort mellan lokaler och år och kan bara marginellt nyttjas i urvalsförädlingen. Med ett screeningcenter finns också förutsättningar att ta sig an nya skadegörare som kan dyka upp i takt med ett förändrat klimat och global handel. Screeningcentret, tillsammans med den stora mängden fenotypdata som Skogforsk samlar in, skapar också förutsättningar för nya molekylärgenetiska urvalsmetoder vilka kan snabba på förädlingen ytterligare.

Kostnaden för att bygga och inreda screeningcentret uppskattas till cirka 30 miljoner kronor. Utöver detta kommer initiala kostnader för att iordningställa mark och utveckla testmetodiken. Den årliga driften beräknas kosta cirka 5 miljoner kronor i form av personal, uppodling av plantor och underhåll av anläggningen.

Även om Sverige ligger 50 år efter Nordamerika är det inte för sent att starta upp ett nationellt screeningcenter. Representanter från skogsnäringen, SLU och Skogforsk har också nyligen i en gemensam skrivning uttryckt vikten av att Sveriges beredskap förstärks med en infrastruktur för resistenstestning av genetiskt material från våra inhemska skogsträd. Den fortsatta planeringsprocessen är nu upp till dem som har nytta av resultaten: samhället, skogsnäringen och forskningen.

Referenser

- Agestam, E. & Nilsson, U. 2023. Avverka eller inte avverka av törskate utglesad tallskog. Inst. för sydsvensk skogsvetenskap, SLU. Preliminär version.
- Arnerup, J., Swedjemark, G., Elfstrand, M., Karlsson, B. & Stenlid, J. 2010. Variation in growth of *Heterobasidion parviporum* in a full-sib family. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25, 106–110.
- Bendz-Hellgren, M., Lipponen, K., Solheim, H. & Thomsen, I.M. 1998. The Nordic countries. In: Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R., Hüttermann, A. (red.). *Heterobasidion annosum*. Biology, ecology, impact and control. CAB International, 333–345.
- Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 1995. Long-term reduction in diameter growth of butt rot affected Norway spruce, *Picea abies*. *Forest Ecology and Management* 74, 239–243.
- Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 1997. Decreased volume growth of *Picea abies* in response to *Heterobasidion annosum* infection. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 1519–1524.
- Berglund, M. & Rönnberg, J. 2017. Rotröta. I: Witzell, J. m.fl. (red.). Skogsskötselserien nr 12, Skador på Skog, del 1. Skogsstyrelsen, Skogsskötselserien.
- Bergquist, J., Kalén, C. & Karlsson, S. 2019. Skogsbrukets kostnader för viltskador. Återrapportering till regeringen. Skogsstyrelsen, Rapport 2019/16.
- Biometria, 2023. Kvalitetsbestämning av massaved. Nationella bestämmelser för virkesmätning 2023-01-01.
- Carlén, M., Rolander, M., Gramner, T. & Svensson, L. 2023. Skogsskador i Sverige 2022. Skogsstyrelsen, Rapport 2023/04.
- Chen, Z-Q., Lundén, K., Karlsson, B., Vos, I., Olson, Å., Lundqvist, S-O., Stenlid, J., Wu, H.X., Garcia Gil, M.R. & Elfstrand, M. 2018. Early selection for resistance to *Heterobasidion parviporum* in Norway spruce is not likely to adversely affect growth and wood quality traits in late-age performance. *European Journal of Forest Research* 137, 517–525.
- Cowling, E. & Young, C. 2013. Narrative history of the resistance screening center: It's origins, leadership and partial list of public benefits and scientific contributions. *Forests* 4, 666–692.
- El-Baky, N.A. & Al Fattah Amara, A.A. 2021. Recent approaches towards control of fungal diseases in plants: an updated review. *Journal of Fungi* 7(11): 900.
- Eriksson, L. 1981. Stickvägar och körskador i gallringsbestånd. Rapport/Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik, 137.
- Fredriksson, E., Fahlvik, N., Öhlund, J. & Svennerstam, H. 2023. Produktionsnedsättning i törskateangripen gallringsskog. En ekonomisk analys i Heureka. Skogforsk, Arbetsrapport 1163–2023.
- Gunnarsson, F. & Mattsson, S. 2019. Sveaskogs ungskogsinventering, MO Nord 2019. Powerpointpresentation.
- Hyll, K., Joevenller, S., Svennerstam, H., Nordström, M., Broman, O., Oja, J. & Sandberg, D. 2022. CT-skanning som verktyg för detektering av törskateangrepp på tall. Skogforsk, Arbetsrapport 1126–2022.

- Högberg, K-A. & Uggla, C. 2021. Framtida fröplantager av tall och gran. Skogforsk, Arbetsrapport 1082–2021.
- Isik, F., Amerson, H.V., Whetten, R.W., Garcia, S.A., Li, B. & McKeand, S.E. 2008. Resistance of *Pinus taeda* families under artificial inoculations with diverse fusiform rust pathogen populations and comparison with field trials. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 2687-2696.
- Isik, F. & McKeand, S.E. 2019. Fourth cycle breeding and testing strategy for *Pinus taeda* in the NC State University Cooperative Tree Improvement Program. *Tree Genetics & Genomes* 15, 70.
- Karlsson, B. & Swedjemark, G. 2006. Genotypic variation in natural infection frequency of *Heterobasidion* spp. in a *Picea abies* clone trial in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21, 108-114.
- King, J.N., David, A., Nowhad, D. & Smith, J. 2010. A review of genetic approaches to the management of blister rust in white pines. *Forest Pathology* 40, 292-313.
- Lagerberg, T. 1923. Rötornas betydelse för granen och dess avkastning. *Skogsvårdsföreningens tidskrift* 21, 313–345.
- Lind, M., Källman, T., Chen, J., Ma, X-F., Bousquet, J., Morgante, M., Zaina, G., Karlsson, B., Elfstrand, M., Lascoux, M. & Stenlid, J. 2014. A *Picea abies* linkage map based on SNP markers identifies QTLs for four aspects of resistance to *Heterobasidion parviporum* infection. *Plos One*, 9(7), e101049
- Oliva, J., Samils, N. Johansson, U., Bendz-Hellgren, M. & Stenlid, J. 2008 Urea treatment reduces *Heterobasidion annosum* s. l. root rot in *Picea abies* after 15 years. *Forest Ecology and Management* 255, 2876–2882.
- Persson, T., Barklund, P. & Andersson, B. 2008. Förädling kan ge ökad resistens mot angrepp av törskatesvamp. Resultat från Skogforsk nr 5, 2008.
- Persson, T., Barklund, P., Samils, B., Andersson Gull, B. manus. The inheritance of resistance to Scots pine blister rust in *Pinus sylvestris*.
- Rosvall, O., Jansson, G., Andersson, B., Ericsson, T., Karlsson, B., Sonesson, J. & Stener, L-G. 2001. Genetiska vinster i nuvarande och framtida fröplantager och klonblandningar. Skogforsk, Redogörelse nr 1, 2001.
- Samils, B., Kaitera, J., Persson, T., Stenlid, J. & Barklund, P. 2021. Relationship and genetic structure among autoecious and heteroecious populations of *Cronartium pini* in northern Fennoscandia. *Fungal Ecology* 50, 101032.
- Samils, B. & Stenlid, J. 2022. A review of biology, epidemiology and management of *Cronartium pini* with emphasis on Northern Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research* 37, 153–171.
- Skogforsk, 2016. Drömmen om den röttåliga granen. Vision nr 3, 2016, sid 16.
- Skogskunskap, Skogforsk. <https://www.skogskunskap.se/rakna-med-verktyg/skogsvard/rotrota/>
- Skogsstyrelsen, Statistikdatabas.
- Skroppa, T., Solheim, H. & Steffenrem, A. 2015a. Genetic variation, inheritance patterns and parent-offspring relationships after artificial inoculations with *Heterobasidion parviporum* and *Ceratocystis polonica* in Norway spruce seed orchards and progeny tests. *Silva Fennica* 49(1), article id 1191.

- Skrøppa, T., Solheim, H. & Hietala, A. 2015b. Variation in phloem resistance of Norway spruce clones and families to *Heterobasidion parviporum* and *Cerotycystis polonica* and its relationship to phenology and growth traits. *Scandinavian Journal of Forest Research* 30, 103–111.
- SLU, 2023. Skogsdata 2023. Tema: Gammal skog enligt miljömålsdefinitionen. SLU Riksskogstaxeringen.
- Snieszko, R.A., Smith, J., Liu, J-J. & Hamelin, R.C. 2014. Genetic resistance to fusiform rust in southern pines and white pine blister rust in white pines – a contrasting tale of two rust pathosystems – Current status and future prospects. *Forests* 5, 2050–2083.
- Sonesson, J. & Rosvall, O. 2011. Lönsamma åtgärder för ökad tillväxt på Sveaskogs marker. Skogforsk.
- Sonesson, J., Swedjemark, G., Almqvist, C., Jansson, G., Hannrup, B., Rosvall, O. & Kroon, J. 2007. Genetic variation in responses of *Pinus sylvestris* trees to natural infection by *Gremmeniella abietina*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 22, 290–298.
- Steffenrem, A., Solheim, H. & Skrøppa, T. 2016. Genetic parameters for wood quality traits and resistance to the pathogens *Heterobasidion parviporum* and *Endoconidiophora polonica* in a Norway spruce breeding population. *European Journal of Forest Research* 135, 815–825.
- Stenlid, J. 1987. Controlling and predicting the spread of *Heterobasidion annosum* from infected stumps and trees of *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2, 187–198.
- Stenlid, J. & Swedjemark, G. 1988. Differential growth of S- and P-isolates of *Heterobasidion annosum* in *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. *Trans. Br. mycol. Soc.* 90, 209–213.
- Susaeta, A. 2020. Implications of future risk of fusiform rust on optimal forest management of even-aged slash pine plantations. *Forest Policy and Economics* 116, 102183.
- Svennerstam, H. 2023. Törskateinventering i ungskog – identifierade riskfaktorer och skötselråd. Skogforsk, Arbetsrapport 1178–2023.
- Swedjemark G, Stenlid J & Karlsson B (1997) Genetic variation among clones of *Picea abies* in resistance to growth of *Heterobasidion annosum*. *Silvae Genetica* 46, 369–374.
- Swedjemark, G. & Karlsson, B. 2004a. Genotypic variation in susceptibility following artificial *Heterobasidion annosum* inoculation of *Picea abies* clones in a 17-year-old field test. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, 103–111.
- Swedjemark, G. & Karlsson, B. 2004b. Variation in incidence and genetic impact on natural infection of *Heterobasidion annosum* in *Picea abies* (L.) Karst. in genetic trials in south Sweden. *Forest Ecology and Management* 203, 135–145.
- Swedjemark, G. & Karlsson, B. 2005. Röttålig gran, dröm som kan bli sann – på sikt. *PLANTaktuellt* nr 4, 2005.
- Swedjemark, G., Stenlid, J. 1996. Variation in spread of *Heterobasidion annosum* in clones of *Picea abies* grown at different vegetation phases under greenhouse conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11, 137–144.
- Swedjemark, G., Stenlid, J. & Karlsson, B. 1997. Genetic variation among clones of *Picea abies* in resistance to growth of *Heterobasidion annosum*. *Silvae Genetica* 46, 369–374.

- Thor, M. 2011. Stubbehandling mot rotröta – beräkning av ekonomiskt utfall på Sveaskog. Resultat från Skogforsk nr 19, 2011.
- Thor, M. 2011. Vedförluster av rotröta samt lönsamma skyddsåtgärder. Bilaga 2 till utredningen Lönsamma åtgärder för ökad tillväxt på Sveaskogs marker. Skogforsk.
- Thor, M., Arlinger, J. & Stenlid, J. 2005. Stubbehandling mot rotröta lönsam – också i slutavverkning. Skogforsk, Resultat nr 9, 2005.
- Thor, M., Arlinger, J. & Stenlid, J. 2006. *Heterobasidion annosum* root rot in *Picea abies*: Modelling economic outcomes of stump treatment in Scandinavian coniferous forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21, 414–423.
- Thor, M., Ståhl, G. & Stenlid, J. 2004. Räkna med rotröta – nytt hjälpmedel för skoglig planering. Resultat från Skogforsk nr 13.
- Thor, M., Ståhl, G. & Stenlid, J. 2005. Modelling root rot incidence in Sweden using tree, site and stand variables. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20, 165-176.
- Wahlgren, A. 2014. Skogsskötsel.Handledning vid uppdragande, vård och förnygring av skog. Norstedt & Söners förlag, Stockholm.
- Wellendorf, H. & Thomsen, I.M. 2008. Genetic variation in resistance against *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref. in *Picea abies* (L.) Karst. expressed after inoculation of neighboring stumps. *Silvae Genetica* 57, 312-324.
- Witzell, J. m.fl. 2017. Skogsskötselserien nr 23. Skador på skog, del 1. Skogsstyrelsen.
- Witzell, J. m.fl. 2017. Skogsskötselserien nr 12, Skador på Skog, del 2. Skogsstyrelsen.
- Woodward, S., Stenlid, J., Karjalainen, R. & Hüttermann, A. (red.). 1998. *Heterobasidion annosum*: Biology, ecology, impact and control. CAB International. 589 s.
- Wulff, S., Lindelöw, Å., Lundin, L., Hansson, P., Axelsson, A-L., Barklund, P., Wijk, S. & Ståhl, G. 2012. Adapting forest health assessments to changing perspectives on threats—a case example from Sweden. *Environmental Monitoring & Assessment* 184, 2453-2464.
- Wulff, S., Walheim, M. & Roberge, C. 2022. Nationell Riktad Skadeinventering (NRS). Inventering av skador i ungskog 2022 i Norrbotten, Västerbotten, Västernorrland och Jämtlands län. SLU, Inst. för skoglig resurshushållning, 2022-12-13.
- Örlander, G. & Frisk, J. 2020. Viltbetesskador i Sverige. Konsekvenser för virkesproduktion, ekonomi och klimat. Södra.