

Skogsträdsförädling för ökad resistens mot skadegörare



© Skogsstyrelsen 2023

Rapport 2023/19

Projektledare

Claes Ugglå

Författare

Claes Ugglå

Sanna Black Samuelsson

Tommy Mörling

Jan Stenlid, SLU

Omslag

Åke Sjöström

Skogsstyrelsens rapporter publiceras som pdf-filer på vår webbplats: www.skogsstyrelsen.se.
Här kan även tidigare publicerade rapporter, liksom böcker och övriga trycksaker laddas ner eller beställas.

Innehåll

Förord	6
Sammanfattning	7
Summary	9
1 Om rapporten	11
1.1 Bakgrund	11
1.2 Målgrupp	12
1.3 Syfte	12
1.4 Upplägg	13
1.5 Avgränsningar	13
2 Trädens skadegörare och försvar	14
2.1 Biotiska skadegörare på skogsträd	14
2.2 Trädens försvar	15
2.2.1 Försvarsstrategier	15
2.2.2 Olika typer av resistens	15
2.2.3 Epigenetiska mekanismer och plasticitet	17
2.2.4 Endofyter	18
3 Skogsträdsförädling och resistensförädling i Sverige	19
3.1 Inledning	19
3.2 Resistensförädling	19
3.2.1 Generell metodik	19
3.2.2 Genomisk selektion och andra markör-baserade tekniker	21
3.2.3 Screening	21
3.2.4 Breeding without breeding	22
3.3 Skogsträdsförädling för ökad arealproduktion	22
3.3.1 Organisation och mål	22
3.3.2 Fältförsök och urval	23
3.3.3 Tallens hårdighet	24
3.3.4 Skador och skadegörare i urvalsprocessen	25
3.3.5 Observationsförsök för uppföljning	25
3.3.6 Förädlad skogsodlingsmaterial	26
3.4 Hantering av skador i förädlingsprogram för gran och tall	27
3.4.1 Mer kunskap och ökande skador	27
3.4.2 Aktuella skadegörare	27
3.4.3 Utmaningar	29

3.5	Samband mellan resistens och andra egenskaper _____	30
4	Skadegörare och skador i svensk kontext _____	32
4.1	Askskottsjuka _____	32
4.1.1	Biologi och spridning _____	32
4.1.2	Motståndskraft _____	32
4.1.3	Åtgärder _____	33
4.1.4	Resistensforskning och resistensförädling _____	33
4.2	Almsjuka _____	33
4.2.1	Biologi och spridning _____	33
4.2.2	Åtgärder _____	34
4.2.3	Resistensforskning och resistensförädling _____	34
4.3	Törskatesvamp på tall _____	35
4.3.1	Biologi och spridning _____	35
4.3.2	Åtgärder _____	35
4.3.3	Resistensförädling _____	36
4.4	Rotticka på gran _____	36
4.4.1	Biologi och spridning _____	36
4.4.2	Åtgärder _____	36
4.4.3	Resistensförädling _____	36
4.5	Fytofager: insekter och klövvilt _____	37
4.6	Torkstress _____	38
5	Internationella erfarenheter av resistensprogram _____	40
5.1	Erfarenheter från några resistensprogram _____	40
5.1.1	Biologiska förutsättningar hos värdräd och skadegörare _____	40
5.1.2	Resistens och vitalitet över tid _____	41
5.1.3	Genetisk variation _____	42
5.1.4	Operativ långsiktig hantering _____	42
5.1.5	Finansiering _____	43
5.1.6	Samordning och samverkan _____	44
5.1.7	Uppföljningar och utvärderingar _____	44
5.2	Forskning _____	45
6	Utgångspunkter för resistensprogram i Sverige _____	47
6.1	Regler om skogsodlingsmaterialets genetiska egenskaper _____	47
6.2	Regler om växtmaterial och skadegörare _____	47
6.3	Klimatförändringarnas effekter på skogen _____	49
6.4	Skogsskötsel för klimatanpassning och mot skadegörare _____	49
6.5	Resistensförädlingens plats i skogsbruket _____	50
7	Slutsatser och rekommendationer _____	52
7.1	Informationsdelning _____	52

7.1.1	Information om skadegörare	52
7.1.2	Information om skogsodlingsmaterial	52
7.2	Skogsträdsförädling	53
7.2.1	Verktyg för resistensförädling	53
7.2.2	Motståndskraft och tillväxt	54
7.2.3	Förädling för olika skogsbruksmetoder	54
7.2.4	Förädling för ökad variation	55
7.2.5	Begreppet vitalitet	55
7.3	Frö- och plantproduktion	55
7.4	Användning av skogsodlingsmaterial	56
7.4.1	Val av skogsodlingsmaterial	56
7.4.2	Ståndortsanpassning	56
7.4.3	Beredskap och riskhantering	56
7.4.4	Hyggesfria metoder	57
7.5	Uppföljning	57
7.6	Reglering	57
7.7	Övergripande inriktning	58
Bilaga 1		59
	Vägledning för resistensprogram	59

Förord

Skogsstyrelsen har tagit fram denna rapport inom ramen för samverkansprojektet Multiskadad ungskog i norra Sverige. Arbetet har skett i nära samverkan med Jan Stenlid, professor emeritus i skogsträdens patologi vid SLU. Malin Elfstrand, professor i skogsträdens patologi vid SLU, har vetenskapligt granskat rapporten.

Syftet är att beskriva förutsättningarna för resistensförädling av skogsträd i Sverige och ge rekommendationer om hur skogsskador kan begränsas. Detta görs mot bakgrund av klimatförändringar och ökande risker för allvarliga skogsskadegörare på skog.

Det är Skogsstyrelsens förhoppning att rapporten kommer till nytta i fortsatta analyser, diskussioner och aktiviteter inom såväl forskning, skogsträdsförädling och praktiskt skogsbruk som i Skogsstyrelsens egen verksamhet.

Vi riktar ett varmt tack till alla som varit inblandade i arbetet med rapporten för era arbetsinsatser och värdefulla bidrag.

Umeå 2023-11-30

Staffan Norin
Regionchef, Skogsstyrelsen

Claes Uggla
Specialist skogsodlingsmaterial, Skogsstyrelsen

Sammanfattning

Stora ekonomiska och andra värden hotas när skogar angrips av skadegörare. Risken för omfattande angrepp av olika skogsskadegörare ökar med klimatförändringarna då många skadegörare gynnas samtidigt som träden stressas och blir mer känsliga. Den globala handeln med växtmaterial är en viktig inkörsport för nya skadegörare. Det finns redan exempel på skadegörare som förts in i Europa och sedan slagit ut stora delar av populationen av vissa trädslag. Skogsbrukets metoder kan gynna vissa skadegörare men kan också göra skogen mer motståndskraftig genom valet av skogsodlingsmaterial och genom aktiva åtgärder.

För att minska risken för omfattande skador brukar ett variationsrikt skogsbruk med ståndortsanpassning rekommenderas. Det kan kompletteras med användning av förädlat skogsodlingsmaterial som är mer anpassat till det förändrade klimatet.

Resistensförädlat skogsodlingsmaterial är ytterligare ett verktyg i arbetet mot ökande skogsskador. Törskate på tall, rotticka (rotröta) på gran och askskottsjuka är exempel på skadegörare vars angrepp förhoppningsvis kan minskas i framtiden genom användning av mer resistent skogsodlingsmaterial. Andra sjukdomar och skador på träd diskuteras också.

Sverige har långsiktiga förädlingsprogram för de viktigaste produktionsträdslagen, där det primära målet är ökad produktion av virke med önskade kvalitetsegenskaper. Resistensförädling kan bli en integrerad del av dessa program men det förutsätter att system och metoder för rationell testning av resistensegenskaper kan användas. Sådana metoder som bygger på molekylärbiologisk och skogspatologisk forskning utvecklas i Sverige. Inspiration från program för resistensförädling i andra länder har också påverkat utvecklingen.

Det går inte att maximera förädlingen mot alla önskade mål samtidigt. Även om den generella målsättningen är ett förbättrat skogstillstånd och ökad tillväxt måste skogsträdsförädlingen i praktiken väga olika mål mot varandra, exempelvis ökad tillväxt och ökad resistens. Möjligheterna att ta in fler trädslag i förädlingen och att öka skogarnas klimatanpassning bör också beaktas. Utifrån idén att ett varierat skogsbruk minskar risken för skador kan alla dessa mål bidra till såväl ökad produktion som begränsning av skogsskadorna.

Alla berörda i skogssektorn behöver på olika sätt ta höjd för ett ökat tryck från skogsskadegörare:

- Kunskap om skogsskador och tydliga informationsvägar i samband med skador är avgörande för hur effektiva de efterföljande åtgärderna blir.
- Mer varierade skogsbruksmetoder kan tillsammans med en bredare palett av olika trädslag med varierande förädlingsmål och härkomst bidra till bättre ståndortsanpassning och ökad riskspridning.

- Produktionen av skogsodlingsmaterial kan diversifieras mer för att öka skogsägarnas möjligheter att välja trädslag, förädlingsmål och härkomst.
- Uppföljande inventering av skogsodling i praktiken kan öka kunskapen om skogsskador och ge återkoppling till skogsträdsförädling och plantproduktion.
- Tillväxten i den svenska skogen har gått ner under senare år och skadegörare är troligen en av anledningarna. Resistensförädling är ett av flera verktyg för att bromsa utvecklingen och på sikt minska riskerna för ytterligare tillväxtminskningar.

Summary

Swedish forests are under threat from various pests and diseases that have the potential to destroy invaluable forests and forestry resources. Climate change makes widespread infestation more likely as many of the pests benefit from the changing climate while trees get stressed and more vulnerable. Global trade of plant material is likely to introduce new pests from other continents. This has already happened which led to severe damage of the populations of certain tree species in Europe. Forest management may favor certain pests, but it can also make forests more resilient by the choice of appropriate management strategies and by choosing forest reproductive material (FRM) from a risk-based perspective.

In general terms, forest management should include a great extent of variation and proper site adaptation to obtain a reduced risk of extensive outbreaks of pests and diseases. As a complement, improved FRM that has a better climate adaptation profile can be used.

Resistance breeding to achieve FRM that is genetically less susceptible to certain pests is another tool that can be used to reduce forest pest damage. *Cronartium pini* on Scots pine, *Heterobasidion spp.* on Norway spruce and ash dieback are pests that can hopefully be better controlled in the future by the use of more resistant FRM. Other kinds of diseases and forest damages are also discussed.

Breeding programs in conifers for increased timber production have a long tradition in Sweden. Resistance breeding can be integrated in these programs, provided that systems and methods for high throughput testing of resistance can be applied. Such screening methods are under way in Sweden, based on molecular markers and forest pathology research, and by inspiration from long-lasting resistance programs abroad.

Breeding cannot simultaneously meet all desired goals on a maximum level. Even if the general objective is a more healthy and productive forest, different objectives, such as increased growth and increased resistance, must be balanced. The objective to include more tree species in breeding programs, and the possibility to put more focus on climate change adaptation should also be considered. Based on the idea of a varied forestry reducing the risk of damage, all these objectives will contribute to production as well as a better forest health.

The forest sector can prepare itself to meet the increased pressure from pests and diseases affecting the forests:

- Sound knowledge about forest pests and diseases and well-established pathways of information will improve the progress of actions in connection with pest outbreaks and newly found diseases.
- More diversity in forest management practices in connection with a wider palette of tree species of choice, including trees with different breeding objectives and of various provenances, can open up for more qualified site adaptation and risk management.

- FRM production can be more diversified to widen up the choice of tree species, breeding objectives and different provenances.
- Inventories to follow up the FRM performance in practice can give better knowledge about forest damage and provide feedback to forest tree breeding and seedling production.
- Swedish forest growth has slowed down in recent years and forest damages are probably one of the reasons. Resistance breeding can be one of several tools to reverse this trend.

1 Om rapporten

1.1 Bakgrund

Skogen är en värdefull resurs som är avgörande för Sveriges klimatomställning och för utvecklingen mot ett hållbart samhälle. Skogen bidrar med förnyelsebara råvaror och energi, men är även en förutsättning för tillgång till många viktiga värden såsom rent dricksvatten, natur för friluftsliv, traditionellt nyttjande och andra ekosystemtjänster. Skogen utgör ca 68 procent av Sveriges landyta och hyser därmed en stor del av den biologiska mångfald som är grunden alla dessa nyttor. Det är därför viktigt att skogen bevaras och utvecklas på ett sådant sätt att alla dessa värden bibehålls.

Skogens värden hotas på olika sätt. Ett sådant hot är skogsskador som orsakas av insekter och svampar.¹ Risken för sådana skador ökar med klimatförändringarna eftersom de kan gynna skadegörarna samtidigt som träden stressas och har mindre motståndskraft. Risken ökar även med den ökande globala handeln med växtmaterial eftersom nya arter kan introduceras oavsiktligt. Skogsbrukets metoder kan även leda till att vissa insekter och svampar får ökade möjligheter till spridning och angrepp på skog.

Biotiska (biologiska) och abiotiska (fysiska) faktorer driver naturliga processer som efter hand leder till anpassning av skogen. Det kan ske genom naturligt urval för exempelvis ökad resistens, eller genom migration, där trädpopulationer exempelvis förflyttar sig med klimatförändringen.² Träd har även en naturligt inneboende plasticitet som gör att de under sin livstid kan anpassa sig till förändrade miljöbetingelser.^{3,4} Skogsbruket påverkar den naturliga anpassningen genom valet av trädslag och skogsodlingsmaterial, men också genom skogens skötsel och de skogsbruksmetoder som används. Skogsbruket kan aktivt ersätta eller komplettera naturliga processer i syfte att göra skogen mer motståndskraftig mot sådant som hotar skogar och skogsbruk.

Skogsskador kan inte undvikas helt men för att minska risken för omfattande skador brukar ett variationsrikt skogsbruk med ståndortsanpassning och medveten riskhantering rekommenderas. Det skapar förutsättningar för skogar med stor variation i struktur och trädslagsblandning samt hög biodiversitet. En viktig strategi är även att komplettera eller snabba på den naturliga anpassningen av trädpopulationer genom att använda förädlad skogsodlingsmaterial. Syftet är då att träden ska vara mer anpassade till det förändrade klimatet och ha ökad resistens, det vill säga motståndskraft, mot skadegörare. Skogsstyrelsen har i sin senaste rapportering till FAO om skogsgenetiska resurser pekat på behovet av

¹ Stenlid, J. & Oliva J. (2016). Phenotypic interactions between tree hosts and invasive forest pathogens in the light of globalization and climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371: 20150455. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0455>.

² Aitken, SN., Yeaman, S., Holliday, JA., Wang, T. & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, 1: 95–111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>.

³ Eriksson, G. (1998). Evolutionary forces influencing variation among populations of *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica*, 32(2): 173–184. <https://doi.org/10.14214/sf.694>.

⁴ Amaral, J., Ribeyre, Z., Vigneaud, J., Sow, MD., Fichot, R., Messier, C., Pinto, G., Nolet, P. & Maury, S. (2020). Advances and Promises of Epigenetics for Forest Trees. *Forests*, 11, 976. <https://doi.org/10.3390/fl11090976>.

klimateanpassning och skogsträdsförädling för fler trädslag, ökad variation i skogsbruket, samt bättre uppföljning av åtgärdernas effekter i skogen.⁵

Resistensforskning och resistensförädling pågår på olika håll i världen och det finns gott om publicerad vetenskaplig litteratur som beskriver och utvärderar program för resistensförädling. Forskning om skogsskadegörare och resistens pågår också i Sverige. Medvetenheten om problemen med skogsskadegörare och den potential som resistensförädlingen har ökar för närvarande. Men kunskapen om vilka möjligheter som finns, och vilka begränsningar vi måste leva med behöver breddas hos beslutsfattare på olika nivåer i skogsbruket.

Skogligen rådgivare rekommenderar i stor utsträckning förädlat skogsodlingsmaterial och skogsägarna använder framför allt förädlade plantor. I ljuset av de risker och utmaningar som följer av pågående klimatförändringar och av den globala handeln med växtmaterial är det angeläget att kunskapen om resistensförädling och skogsträdsförädling generellt sett ökar. Hur ser möjligheterna till resistensförädling ut och var finns begränsningarna? Vilken plats har resistensförädlat skogsodlingsmaterial i verktyglådan för att minska riskerna för allvarliga skogsskador? Detta är frågor som behöver följas med hela beslutskedjan från skogsträdsförädling och plantproduktion till den enskilda skogsägaren.

1.2 Målgrupp

Utifrån denna bakgrund ser Skogsstyrelsen ett behov av att på ett övergripande sätt sammanställa och kommunicera information om resistens och resistensprogram, och hur användning av resistent skogsodlingsmaterial kan komplettera andra åtgärder mot skogsskador. Målgruppen för rapporten är i första hand beslutsfattare inom offentliga och privata organisationer, forskare vid universitet och forskningsinstitut samt skogsträdsförädling. Rapporten bör även kunna fungera som faktaunderlag för personer som jobbar med kommunikation och information. Även intresserade yrkesverksamma och privata skogsägare kan nyttja rapporten som kunskapskälla.

1.3 Syfte

Rapportens främsta syfte är att bidra till att:

- i. Ge en översikt över resistens och resistensprogram för ett urval patogener och skadeinsekter.
- ii. Ge en beskrivning av hur svensk skogsträdsförädling arbetar med resistens, och behandla frågor som är strategiskt viktiga i denna verksamhet.
- iii. Föreslå åtgärder för att öka kunskapen om resistensförädlingens plats i arbetet mot skogsskador.

⁵ The second report on the state of the world's forest genetic resources. Sweden. Rapport 2020/3. Skogsstyrelsen.

- iv. Föreslå åtgärder för att minska risken för allvarliga angrepp av skadegörare på skogsträd i framtiden.
- v. Öka insikten hos skogsbruk och skogsägare om betydelsen av att välja ett lämpligt skogsodlingsmaterial.

Rapporten kan även ge stöd till Skogsstyrelsens rådgivning och kommunikation, främst om återbeskogning.

1.4 Upplägg

Rapporten består av följande delar:

- Orientering om trädens skadegörare och försvar (Kapitel 2).
- Redogörelse för hur skogsträdsförädlingen i Sverige arbetar med skadegörare och resistens (Kapitel 3).
- Beskrivning av några skadegörare och orsaker till skador där förädling skulle kunna minska risken för skogsskador (Kapitel 4).
- Internationell utblick om resistensprogram (Kapitel 5).
- Beskrivning av några utgångspunkter att förhålla sig till vid uppbyggnad av resistensprogram i Sverige (Kapitel 6)
- Redogörelse för slutsatser och rekommendationer (Kapitel 7).

1.5 Avgränsningar

- Rapporten fokuserar på träden och deras motståndskraft mot skadegörare medan skadegörarnas biologi endast berörs översiktligt.
- Rapporten behandlar ett begränsat antal skador och skadegörare som kan ge stora skador på vitala träd, och där resistensförädling bedöms ha potential att minska skadornas omfattning.
- Rapporten begränsas till skador på tall (*Pinus sylvestris*), gran (*Picea abies*), ask (*Fraxinus excelsior*) och alm (*Ulmus spp.*).
- Rapportens mål är inte att ge en komplett översikt av internationell litteratur om resistens hos skogsträd utan att göra ett antal nedslag i några publikationer som rapportförfattarna ser som särskilt relevanta.

2 Trädens skadegörare och försvar

Detta kapitel redogör övergripande för biotiska skadegörare på skogsträd och trädens olika försvarsmekanismer. Det kan läsas som en introduktion till kapitel 3 som beskriver hur olika resistensmekanismer utnyttjas för resistensförädling.

2.1 Biotiska skadegörare på skogsträd

Skogen hyser mängder av arter som är knutna till träden på olika sätt, från mutualister till antagonister⁶. Många arter utnyttjar trädens resurser och kan därmed påverka träden genom att orsaka skador eller begränsa trädens tillväxt. Alla dessa arter är inte att betrakta som skogsskadegörare, snarare är de viktiga delar av skogsekosystemet.⁷

Träd och trädlevande arter utvecklas tillsammans. Detta innebär att de ömsesidigt påverkar varandras evolution genom naturligt urval. Vissa arter lever som parasiter⁸ på träd och i samevolutionen dem emellan utvecklar värdträden motstånd mot parasiten. Den naturliga selektionen gynnar värdträd med utökat motstånd. Parasiten anpassar sig då för att överleva genom att utveckla sätt att övervinna värdträdens försvarsmekanismer. Detta innebär att det sker en evolution hos både värdträd och parasit (se även avsnitt 3.1).

Om förutsättningarna är gynnsamma för en parasit kan det leda till allvarligare skador på värdträdet. Generellt kan en skada beskrivas som något som påverkar trädets centrala funktioner negativt och som begränsar trädets tillväxt och överlevnad på kort sikt eller i ett längre evolutionärt perspektiv. Skador kan definieras i ekonomiska termer som förlorad produktion hos ett skogsbestånd. Vidare finns ekologiska, sociala och kulturella aspekter på skogsskador.

Olika skadegörarens effekter på skogen beror i stort av skadornas svårighetsgrad, hur sannolikt det är att skadegöraren etableras och utvecklas, dess virulens, det vill säga sjukdomsframkallande förmåga samt vilken resistens eller motståndskraft träden har mot skadegöraren.⁹ Effekten kan variera från ingen skada alls (trädet har fullständig motståndskraft eller resistens), till ett mycket skadligt angrepp som kulminerar i att trädet eller skogen dör.

Svampar och andra mikroorganismer som orsakar skador på skog benämns ofta patogener, medan insekter som skadar skog kallas skadeinsekter.¹⁰ Är de introducerade av människan till en ny miljö där de snabbt sprider sig och orsakar allvarlig skada och stora kostnader för samhället eller den enskilde betraktas de som invasiva skogsskadegörare.¹¹

⁶ Mutualism är en form av symbios som innebär att två olika arter gynnar varandra. Ett exempel på mutualism är sambandet mellan träd och svampar som bildar mykorrhiza. Antagonism innebär att en art motverkar en annan art.

⁷ van der Kamp, B.J. (1991). Pathogens as agents of diversity in forested landscapes. *The Forestry Chronicle*, 67(4): 353-354. <https://doi.org/10.5558/tfc67353-4>.

⁸ Parasitism: en art gynnas och den andra missgynnas

⁹ Ennos, R. (2014). Resilience of forests to pathogens: an evolutionary ecology perspective. *Forestry*, 88:41–52.

¹⁰ Skador på skog. *Skogsskötselserien*, kapitel 12. Tillgänglig på: www.skogsstyrelsen.se/skogsskotselserien.

¹¹ Klapwijk, M.J., Ammunét, T., Boberg, J. & Oliva, J. (2013). Invasiva arter i en föränderlig värld. Svampar och insekter. *Future Forests Rapportserie* 2013:5.

2.2 Trädens försvar

2.2.1 Försvarsstrategier

Träd växer i en hårt konkurrensutsatt miljö och utsätts dessutom för många olika insektsskadegörare och patogener. De måste därför ha strategier för att optimera tillgången till ljus, vatten och näring och sedan fördela de tillgängliga resurserna mellan tillväxt, reproduktion och försvar.¹²

Träden utvecklade en rad olika försvarsegenskaper.¹³ Dessa kan vara av mekanisk art, exempelvis tjock bark. Egenskaperna kan också vara strukturella som kemiskt impregnerade cellväggar eller lågmolekylära kemiska substanser. Sådana **konstitutiva** egenskaper är ofta av generell natur. De fungerar i ett brett spektrum av situationer för att skydda levande vävnader i trädet mot olika former av angrepp och mot abiotisk stress som vind eller UV. Detta är ett konstitutivt permanent försvar mot skadeinsekter eller patogener.

För att spara på resurserna då skadetrycket är lågt har växter även utvecklade ett **inducerade** försvar. Det innebär att försvaret aktiveras först vid angrepp eller infektion av skadeinsekten eller patogenen. Träden har möjlighet att känna av en skadegörare genom förändringar i sin kemiska och molekylära sammansättning. Trädet kan då aktivera försvars- och reparationsprocesser.

Vanliga inducerade reaktioner är aktivering av två huvudgrupper av försvarsmetaboliter: fenoliska ämnen eller kådämnen (terpener). De här försvarsämnen bildas antingen från redan befintliga celler eller från särskilda typer av nybildade celler som utvecklas som ett svar på angrepp eller skada i ett träd.

De följande avsnitten avser att belysa och ge exempel på att trädens försvar utgörs av ett komplicerat samspel mellan olika mekanismer. Detta är viktigt att ha grundläggande insikt om när frågor om skogsträdsförädling för ökad resistens diskuteras.

2.2.2 Olika typer av resistens

Resistens innebär att träden mer eller mindre framgångsrikt begränsar skadegörarens tillväxt och reproduktion. Resistens kan betyda olika saker beroende på hur den regleras och hur effektiv den är.¹⁴

Kvalitativ resistens innebär att träden är relativt binära och kan klassas som resistenta eller icke-resistenta. Sådan resistens beror ofta på effekten av enstaka gener och leder i allmänhet till att de resistenta träden klarar att övervinna angrepp av den aktuella skadegöraren. Men då resistensen bygger på enstaka gener med en mindre komplex försvarsstrategi ökar sannolikheten att skadegöraren över tid utvecklar sätt att kringgå trädens försvar. Kvalitativ resistens kan därför vara

¹² Herms, DA. & Mattson, WJ. (1992). The Dilemma of Plants: To Grow or Defend. *The Quarterly Review of Biology*, 67: 283–335. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/2830650>.

¹³ Budde, KB., Nielsen, LR., Ravn, HP. & Dahl Kjær, E. (2016) The Natural Evolutionary Potential of Tree Populations to Cope with Newly Introduced Pests and Pathogens—Lessons Learned From Forest Health Catastrophes in Recent Decades. *Curr Forestry Rep*, 2, 18–29. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0029-9>.

¹⁴ Telford, A., Cavers, S., Ennos, RA. & Cottrell, JE. (2014). Can we protect forests by harnessing variation in resistance to pests and pathogens? *Forestry*, 88:3-12.

sårbart, varför resistensförädling inte i första hand bör bygga på denna typ av mekanism.

Kvantitativ resistens är resultatet av många geners verkan. Det innebär en mer komplex försvarsstrategi hos träden vilket gör det mindre sannolikt att skadegöraren utvecklar sätt att övervinna resistensen. Man bör därför i förädlingen arbeta med kvantitativ resistens.

Tolerans innebär att träd som blir angripna eller infekterade och visar symptom ändå visar en bättre prestation än träd utan tolerans.

Av Tabell 1 framgår fördelar och begränsningar med olika koncept som rör skogsträdens försvarsstrategier och resistens mot skadeinsekter och patogener.

Tabell 1. Olika koncept för skogsträdens försvarsstrategier och resistens mot skadegörare, samt deras fördelar och begränsningar.¹⁵

Begrepp	Beskrivning	Fördelar	Begränsningar
Resistens (allmän definition)	Träden begränsar mer eller mindre framgångsrikt skadegörarens tillväxt och reproduktion	Relevanta (önskade) egenskaper bibehålls i stor utsträckning efter en störning	Resistens mot ett hot innebär inte nödvändigtvis resistens mot andra hot (exempelvis torkstress) Indikerar inte heller nödvändigtvis förmågan att återhämta sig om en skadegörare bryter resistensen
Kvalitativ resistens	Träd i en population antingen är fullständigt resistent mot en skadegörare eller mycket mottagligt	Resistensen kontrolleras av en enskilda gen vilket underlättar att identifiera denna och förädla för resistensen. Effekterna på ett resistent träd av specifika skadeinsekter eller patogener är minimala	Resistensen kan skapa ett starkt selektionstryck för skadegöraren att bryta resistensen och därmed göra den relativt kortvarig
Kvantitativ resistens	Träd i en population uppvisar varierande nivåer av resistens från i princip helt resistent till fullt mottagligt, och alla grader där emellan.	Resistensen kontrolleras av flera gener vilket försvårar för skadegöraren att kringgå och bryta den	Dels förekommer negativa konsekvenser av skadegöraren på individer med intermediär resistens, dels är det mer komplicerat för förädlare att identifiera och utveckla ett resistent material eftersom flera gener är involverade
Tolerans	Trädet är infekterat eller drabbat men påverkas i mindre utsträckning	Skadegöraren påverkas inte negativt, vilket innebär att det inte finns ett urvalstryck för skadegöraren att övervinna tolerans	Vissa negativa effekter kan förekomma på toleranta träd. De kan också bli reservoarer för skadegörare som kan leda till skadliga effekter på närstående träd som inte har tolerans.
Konstitutivt försvar	Det försvar som anläggs som en del av trädets normala tillväxt och utveckling	Effektivt för att begränsa skador från störningar som är konstanta eller frekventa	Det är kostsamt för trädet ur energisynpunkt att kontinuerligt anlägga och upprätthålla det konstitutiva försvaret
Inducerat försvar	Försvar mot en skadegörare aktiveras endast vid angrepp eller infektion	Eftersom försvaret endast aktiveras vid angrepp eller infektion är det mindre kostsamt energimässigt för trädet än ett konstitutivt försvar	Försvaret kan vara mindre effektivt för att svara på multipla och frekventa effekter av olika skadegörare

¹⁵ Woodcock, P., Cottrell, J., Buggs, R. & Quine, C. (2018). Mitigating pest and pathogen impacts using resistant trees: A framework and overview to inform development and deployment in Europe and North America. *Forestry*. 91. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx031> .

2.2.3 Epigenetiska mekanismer och plasticitet

Trädens egenskaper, tillväxt och förmågor att anpassa sig till miljön avgörs primärt av arvsmassan (generna, DNA). Gener uttrycks genom att bilda genprodukter (RNA, proteiner) vilket i sin tur påverkar trädets fortsatta utveckling. Epigenetik är läran om förändringar i genaktivitet som inte beror av en förändring i DNA-sekvensen men som ändå kan överföras vid celledning.¹⁶ Kunskapen om hur mycket epigenetiken styr trädens utveckling är fortfarande begränsad men det finns forskning som pekar på betydande effekter. Trots att epigenetiskt styrda fenotypiska förändringar inte involverar förändringar av DNA-sekvensen kan de enligt denna forskning bevaras över tid i trädet och även i vissa fall ärvas vidare till avkomman. Träd som utsätts för biotiska eller abiotiska faktorer kan därmed minnas sina reaktionsmönster vilket leder till en snabbare eller förbättrad fortsatt anpassning genom fenotypisk plasticitet.¹⁷ Detta anses särskilt viktigt för långlivade växter som träd, eftersom en individ måste klara miljöbetingelser som varierar över tid, och plasticiteten kan göra den mindre beroende av genetiskt betingad anpassning.¹⁸

Den mest utforskade epigenetiska effekten hos träd är knoppsprickning hos gran som kan anpassas utifrån temperaturen när fröna som gav upphov till träden utvecklades.¹⁹ I Norge nyttjas denna kunskap när man väljer i vilken klimatzon olika årgångar frö från norska fröplantager passar bäst utifrån temperaturklimatet det år som fröna utvecklades.²⁰

Forskningen om epigenetik hos växter har främst varit riktad mot hur abiotiska faktorer styr epigenetiken, men vissa resultat pekar även på att epigenetiken kan påverka resistens. Ett exempel är så kallad försvarspriming, vilket författarna till en forskningsrapport²¹ tolkar som ett epigenetiskt minne och en kostnadseffektiv form av inducerbar resistens; när trädet exponerats för abiotisk eller biotisk stress (priming stimuli) kan det försättas i ett ”exalterat läge” vilket möjliggör snabbare och starkare svar vid senare attacker av stressfaktorn i fråga. Denna sensibilisering gör det möjligt för trädet att under en viss period behålla försvaret på en basal eller svagt inducerad nivå för att sedan snabbt kunna aktivera det vid en attack av stimuli.

Dessa exempel visar att träd tycks kunna anpassa sig till olika miljöfaktorer relativt snabbt eftersom anpassningen av fenologiska egenskaper inte nödvändigtvis kräver en ärftligt betingad genetisk förändring.

¹⁶ Bird, A. (2007). Perceptions of epigenetics. *Nature*, 447, 396–398. <https://doi.org/10.1038/nature05913>.

¹⁷ Amaral, J., Ribeyre, Z., Vigneaud, J., Sow, MD., Fichot, R., Messier, C., Pinto, G., Nolet, P. & Maury, S. (2020). Advances and Promises of Epigenetics for Forest Trees. *Forests*, 11, 976. <https://doi.org/10.3390/f11090976>.

¹⁸ Eriksson, G. (1998). Evolutionary forces influencing variation among populations of *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica*, 32(2): 173–184. <https://doi.org/10.14214/sf.694>.

¹⁹ Kvaalen, H. & Johnsen, Ø. (2008). Timing of bud set in *Picea abies* is regulated by a memory of temperature during zygotic and somatic embryogenesis. *New Phytologist* 177: 49–59. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02222.x>.

²⁰ Stiftelsen det norske Skogfrøverk. Brukerveiledning: Proveniensvelgeren.

https://www.skogfroverket.no/wp-content/uploads/2023/03/Proveniensvelgeren_Brukerveiledning_011122.pdf.

²¹ Mageroy, MH., Christiansen, E., Långström, B. *et al.* (2019). Priming of inducible defenses protects Norway spruce against tree-killing bark beetles. *Plant Cell & Environment*, 43:420- 430. <https://doi.org/10.1111/pce.13661>.

2.2.4 Endofyter

Träd är i allmänhet värdar för olika endofyter, det vill säga bakterier och svampar som lever inne i trädens olika vävnader utan att orsaka symptom. Vissa endofyter kan övergå från ett latent stadium till att bli patogena, exempelvis *Diplodia sapinea*, medan andra är mer mutualistiska. Forskning har visat att endofyter kan öka trädens motståndskraft mot patogener och skadeinsekter.²² Mekanismerna bakom dessa interaktioner är inte kända, men studierna visar att närvaron av vissa endofyter har möjlighet att öka trädens resistens eller tolerans mot patogener.

²² Hardoim, PR., van Overbeek, LS., Berg, G., Pirttilä, AM., Company, S., Campisano, A. *et al.* (2015). The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiol Mol Biol Rev* 79:293–320. <https://doi.org/10.1128/membr.00050-14>.

3 Skogsträdsförädling och resistensförädling i Sverige

Inledningsvis beskrivs i detta kapitel den generella metodik som används vid resistensförädling. Därefter följer en överblick över svensk skogsträdsförädling och hanteringen av skador och skadegörare inom förädlingsprogrammen. Avslutningsvis diskuteras samband mellan resistens och andra egenskaper. Avsnitt 3.3 och 3.4 baseras till stor del på underlag som kommit fram i dialog med Skogforsk.

3.1 Inledning

Skogsträd i naturliga ekosystem genomgår en succesiv evolution genom det naturliga urvalet efter mutationer och sexuell omkombination av DNA. Det leder till allt bättre anpassning till olika faktorer i omgivningen och till förändringar av dessa förhållanden. Det omfattar både abiotiska faktorer som klimat och biotiska faktorer som konkurrens och angrepp av patogener.

Ett specialfall av evolution är när värdträd och patogener samexisterar i naturliga skogsekosystem. Då sker en samevolution som leder till att såväl patogenens virulens som trädets försvar förändras och anpassar sig till varandra över tid. Om inga katastrofer inträffar leder denna samevolution till att populationerna långsiktigt överlever genom tillväxt och reproduktion (se även avsnitt 2.1).

När skogsträd domesticeras genom förädling och massförökning av förädlad skogsodlingsmaterial utnyttjas samma typ av mekanismer, men utvecklingen styrs i en riktning mot önskade egenskaper och går betydligt fortare. Det kan avse ökad volymtillväxt och högre grad av resistens än vad den naturliga evolutionen skulle kunna leda till under samma tid.

3.2 Resistensförädling

3.2.1 Generell metodik

Här ges en allmän beskrivning av hur resistensförädling går till. Mycket av informationen är hämtad av Pike *et al.* (2021).²³

Det finns ett par grundläggande förutsättningar som måste vara uppfyllda för en framgångsrik resistensförädling. Det måste finnas en variation för resistens i populationen och den måste vara orsakad av additiv genetisk variation som kan överföras till avkomman. Överföringen måste ske på ett tillförlitligt och kvantifierbart sätt. Detta innebär bland annat att den variation som beror av miljöfaktorer inte får vara för stor i förhållande till den additiva genetiska variationen. Dessa faktorer påverkar resistensförädlingens effektivitet.

Enkelt uttryckt påverkar antalet gener som är involverade i resistensen hur effektiv och hållbar den är (se även avsnitt 2.2.2). Om endast en gen är involverad i resistensen är det mindre komplicerat att förädla för den egenskapen. Nackdelen

²³ Pike C., Koch J & Nelson CD. 2021. Breeding for resistance to tree pests: successes, challenges, and a guide to the future. *Journal of Forestry*, 19: 96–105. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa049>.

kan vara att resistensen inte går att öka särskilt mycket och att den eventuellt inte är hållbar över tid. Om flera gener med stora additiva effekter är involverade kan förädlingen leda till en ökad resistens som också är långsiktigt hållbar.

Förädlingen för trädslag som inte har ett förädlingsprogram initieras ofta genom eftersökningar av träd i natur- eller kulturskogar som efter exponering av en skadeinsekt eller patogen inte är allvarligt drabbade av sjukdom eller skada. Sökandet efter resistent träd behöver göras vid en optimal tidpunkt, när sjukdomen spridit sig så pass mycket att många träd har exponerats, men innan ett större antal träd är skadade eller döda. När en skadegörare sprider sig är oftast det första som händer att de mest mottagliga genotyperna dör. Kvarvarande träd kan ha olika grad av resistens mot skadegöraren.

Om det redan finns ett pågående förädlingsprogram behöver man först och främst fokusera på materialet i det programmet.²⁴ Samma gäller för resistensförädlingen av törskate i Sverige (se avsnitt 4.3).

När kandidatträd testas kan de uppvisa olika nivåer av resistens. En låg resistens kan bero på att de testade träden av någon orsak länge undgått att insjukna, vilket motiverar att man följer upp resistensen. Finns högre nivåer av resistens motiverar det ytterligare utvärdering genom testning av materialet efter vegetativ förökning eller testning av fröförökade avkommor.

När den första generationens föräldrar har valts ut kan man påbörja förädlingen. Det är en iterativ process där syftet är att öka resistensen i efterföljande generationer. Ett långsiktigt mål om man arbetar med kvantitativ resistens är att samla flera genvarianter (alleler) för resistens i samma genotyper. Detta tar relativt många generationer att uppnå, vilket är komplicerat hos skogsträd med lång generationstid.

Generellt bör man sätta realistiska mål för vilken nivå av resistens man vill uppnå i skogsodlingsmaterialet. Fullständig resistens kan vara svårt att nå och är kanske inte heller nödvändigt. Nivån på resistensen behöver också ställas mot målet med resistensprogrammet och mot eventuella övriga förädlingsmål. Det är ofta angeläget att få fram ett mer resistent skogsodlingsmaterial så fort som möjligt. Redan den första generationens föräldraträd kan användas för att exempelvis bygga upp en fröplantage parallellt med att samma träd utgör grunden för fortsatt resistensförädling.

Liksom i all förädling måste den genetiska variationen bevaras i samband med resistensförädling. Detta krävs för att bibehålla en tillräcklig variation för att kunna fortsätta med nya korsningar och urval, men också för att undvika att den genetiska diversiteten minskar på landskaps- eller beståndsnivå. Detta kan bland annat kan ha betydelse för förmågan hos träden att motstå andra skadegörare och stressorer.

²⁴ Ivković M, Baltunis B, Gapare W, Sasse J, Dutkowski G, Elms S & Wu H. 2010. Breeding against dothistroma needle blight of radiata pine in Australia. *Canadian Journal of Forest Research* 40 (8). <https://doi.org/10.1139/X10-097>.

3.2.2 Genomisk selektion och andra markör-baserade tekniker

Den genetiska variationen som kontrollerar resistens mot en skadegörare kan identifieras genom analys av molekyllära markörer som fångar upp variationer i arvsmassan. Detta kan exempelvis användas för att identifiera kandidatgener, det vill säga gener som antas vara involverade i målegenskapen (resistens). Sådana gener kan identifieras genom att analysera stora mängder genetiskt material och identifiera områden på kromosomer som kan vara involverade i resistensen. Nästa steg är att identifiera specifika gener inom dessa områden som kan vara kandidatgener. När en kandidatgen är identifierad kan dess variation, funktion och effekt på resistensen utvärderas.

Genomisk selektion baseras på att man undersöker korrelationer mellan ett stort antal positioner i arvsmassan och fenotypiska egenskaper, som resistens, i förädlingspopulationen.²⁵ I ett släktskapsschema kan man följa hur resistensen nedärvs i förhållande till markörerna i arvsmassan. Resistensnivån kan sedan förutsägas utifrån de mönster som finns i arvsmassan. Därmed kan ett tidigt urval baserat på genetiska markörer göras i förädlingsarbetet. Man behöver inte invänta att den fenotyp man förädlar för uppträder i fältförsök. Detta är en stor fördel när det gäller resistens mot sjukdomar som uppträder hos vuxna träd. Beroende av vilken sjukdom som är aktuell skulle man annars få vänta i upp till flera årtionden för att direkt avläsa resistensegenskaper.

Genomisk selektion baseras på att man kostnadseffektivt kan avläsa tusentals markörer. Teknikutvecklingen har gjort detta möjligt även för arter med mycket stora arvsmassor (genom), som exempelvis gran och tall.

3.2.3 Screening

Screening är ett begrepp som innefattar metoder för att testa växtmaterial under mycket kontrollerade förhållanden.²⁶ I samband med resistensförädling av träd är syftet med screening att skatta graden av resistens och i vilken utsträckning resistensen beror på genetiska faktorer. Genom att materialet som ska testas utsätts för smitta av en viss skadegörare i en väl kontrollerad miljö minimerar man miljövariationer som annars försvårar analysen. Metoden går ut på att inokulera en lämplig dos av en patogen i ett större parti av plantmaterial. Syftet är att framkalla ett mätbart resultat, där inte alla individer blir lika angripna utan där man kan identifiera resistenta genotyper. Denna typ av massscreening gör det möjligt att identifiera hundratals eller tusentals resistenta kandidatträd och deras avkommor som kan vara lämpliga för ett resistensförädlingsprogram. Det finns stora förhoppningar om att screening ska kunna användas för att selektera för resistens mot rotticka hos gran och mot törskate hos tall i svenska förädlingsprogram

Screening betraktas som en förutsättning för användningen av genomisk selektion och andra markörbaserade tekniker i resistensförädlingsprogram (avsnitt 3.2.2). Det beror på att dessa markörbaserade tekniker kräver stora mängder

²⁵ Nantongo, JS., Potts, BM., Klápště, J., Graham, NJ., Dungey, HS., Fitzgerald, H. & O'Reilly-Wapstra, JM., (2022). Genomic selection for resistance to mammalian bark stripping and associated chemical compounds in radiata pine. *G3 Genes|Genomes|Genetics*, 12: 11, <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkac245>.

²⁶ Sniezko, RA. & Koch, J. (2017). Breeding trees resistant to insects and diseases: putting theory into application. *Biol Invasions*, 19:3377–3400. DOI <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1482-5>.

högkvalitativa data över trädens fenotyper för att träna, testa och förfina modellerna på.

Vissa förädlingsprogram har utvecklat screeninganalyser för att identifiera hela spektrumet av resistent fenotyper, från måttlig till hög resistens.²⁷ Detta kan vara av stor vikt eftersom kvantitativa egenskaper annars kan dölja sig bakom starka kvalitativa resistensgener som kan vara mindre robusta mot resistensbrytare i en population av patogener. Sådana screeningförsök kan dessutom ge ledtrådar om vilka olika typer av resistens som finns i en population och deras möjlighet till nedärvning. Utvecklingen av relevant screeningmetodik och det stora antalet kandidatträd att föröka och screena innebär en utmaning i resistensförädlingen.

3.2.4 Breeding without breeding

Breeding without breeding är ett samlingsnamn för olika metoder att fastställa trädindividens släktskap med varandra (föräldrar-avkomma, halvsyskon, helsyskon etc.). Med hjälp av information om individernas DNA-fingeravtryck kan man bestämma deras genetiska värde med avseende på önskade egenskaper, till exempel resistens.^{28,29} En fördel med dessa metoder är att man kan ta reda på trädindividens avelsvärde utan att behöva bygga upp stamtavlor över släktskap i förväg. Man behöver inte heller anlägga fältförsök för klontestning eller avkommeprövning. I stället kan man till exempel välja ut äldre bestånd där fenotypisk variation med avseende på målegenskaper är synlig (såsom resistens mot en skadegörare som uppträder i äldre bestånd), ta DNA-fingeravtryck från träden och rekonstruera deras släktskap. Om träden kommer från en känd fröplantage kan man dessutom fastställa vilka plantage-träd som är föräldrar till träden i beståndet. Med denna information kan såväl föräldraträd i plantagen som träd i det valda beståndet med önskade egenskaper selekteras eller träd utan de önskade egenskaperna väljas bort.

3.3 Skogsträdsförädling för ökad arealproduktion

Detta avsnitt bygger till stor del på information om skogsträdsförädling som rapportförfattarna fått i dialog med Skogforsks förädlingsorganisation.

3.3.1 Organisation och mål

Den operativa skogsträdsförädlingen i Sverige bedrivs av Skogforsk på uppdrag av skogsbruket och staten som vardera står för 50 procent av kostnaderna för den långsiktiga verksamheten. Huvudfokus har sedan skogsträdsförädlingen tog fart varit gran och tall där det anslås i storleksordningen åtta miljoner kronor årligen för förädling av respektive trädslag. Vidare läggs i storleksordningen en miljon kronor per år och trädslag för förädling av lärk, björk och contortatall. I mindre utsträckning och beroende av externa anslag läggs resurser även på andra trädslag.

²⁷ Sniezko, RA., Smith, J., Liu, J-J. & Hamelin, RC. (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(9):2050–2083. <https://doi.org/10.3390/f5092050>.

²⁸ El-Kassaby, Y., & Lstibůrek, M. (2009). Breeding without breeding. *Genetics Research*, 91(2), 111-120. DOI: <https://doi.org/10.1017/S001667230900007X>.

²⁹ El-Kassaby, YA., Klápště, J. & Guy, RD. (2012). Breeding without breeding: selection using the genomic best linear unbiased predictor method (GBLUP). *New Forests*, 43, 631–637. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9338-4>.

Skogsträdsförädlingens primära och övergripande mål är enligt Skogforsk att öka värdeproduktionen. Det innebär att över tid erbjuda skogsbruket utvalda trädindivider (genotyper eller kloner) med allt högre tillväxt och med bibehållna eller förbättrade kvalitetsegenskaper på virket. Ytterligare övergripande mål är anpassning till klimatförändringar med avseende på olika temperaturparametrar och att bevara den genetiska diversiteten, eftersom det ger förutsättningar för långsiktig förädling och är avgörande för livskraftiga skogar i framtiden.

Förädlingsprogrammen för gran och tall har en likartad uppbyggnad och storlek, med ett antal separata och från varandra genetiskt isolerade förädlingspopulationer (24 av tall respektive 22 av gran). Varje förädlingspopulation består av omkring 50–70 plusträd med önskade egenskaper som valts ut i skogen utifrån tillväxt- och kvalitetskriterier (så kallade founders), samt syskonfamiljer från kontrollerade korsningar mellan dessa, och syskonfamiljernas avkommor. För de olika förädlingspopulationerna har man hittills hunnit korsa fram två eller tre generationer.³⁰

Varje förädlingspopulation förädlas med inriktning mot att växa allt bättre i ett visst intervall av ljus- och temperaturklimat i Sverige, som relaterar till ett intervall för breddgrad och altitud. Den primära målegenskapen är volymbaserad arealproduktion per hektar över en omloppstid. Den beräknas utifrån mätningar av höjd och diameter vid vissa åldrar på träden i utlagda fältförsök. Eftersom överlevnad är en begränsande egenskap för tall i norra Sveriges kärvare klimatlägen läggs särskild vikt på överlevnad och hårdighet i plant- och ungskogsstadiet i förädlingspopulationerna för tall i dessa områden (se avsnitt 3.3.3).

Andra egenskaper som förädlingen lägger olika grad av vikt på är att bibehålla eller förbättra trädens stamraket, grenvinkel, grengrovlek och förekomst av sprötkvist. Veddensitet har fått ett ökat intresse och det pågår utveckling av metoder för att effektivare mäta densiteten för att denna parameter ska kunna ingå regelmässigt i framtidens urvalsprocess. Klimatanpassning sker genom att träden testas för användning på platser där de förväntas ha hög överlevnad i dagens klimat och samtidigt ha god virkesproduktion i det klimat som beräknas råda senare under skogens omloppstid. Överlevnaden i plant- och ungskogsstadiet är särskilt avgörande för tall som under naturliga betingelser har hög mortalitet i yngre år. En viktig osäkerhetsfaktor är att ingen vet exakt hur klimatet kommer att förändras. Vidare finns osäkerheter inom och variationer mellan de scenarier som olika klimatmodeller genererar, vilket skogsträdsförädlingen har att förhålla sig till.

3.3.2 Fältförsök och urval

Träden testas i fyra till fem fältförsök per förädlingscykel i och runt om det avsedda geografiska användningsområdet.

De ursprungliga plusträden utvärderades genom att testa avkommor i fältförsök. Resultaten användes för att identifiera de bästa plusträden som sedan gick vidare i förädlingen genom att de korsades med varandra. Avkommorna till dessa

³⁰ Kraft, T. (2021). Skogsträdsförädlingen 2017–2020. Arbetsrapport 1088–2021. Skogforsk.

korsningar testades i nya fältförsök och där väljs de bästa avkommorna för fortsatt förädling och urval till fröplantager. Avkommorna kan testas som fröplantor där varje planta är en unik individ, eller som klonplantor där man genom sticklingsförökning producerat flera plantor av varje individ. Det senare är mer resurskrävande men ger en betydligt bättre utvärdering av varje individ eftersom den kan testas på flera ställen. Ofta testas både fröplantor och klonplantor i samma försök. Med detta upplägg är det möjligt att göra urvalet av individer bland de testade individerna (urval framåt) vilket sparar tid jämfört med när urvalet som tidigare gjordes bland föräldrarna till de testade individerna (urval bakåt).

Fältförsöken mäts i normalfallet två gånger, vid cirka 7–10 respektive 15–20 års ålder, och resultaten extrapoleras till full omloppstid.

Urvalet baseras inte bara på data från den utvalda individen, utan på data från många av dess släktingar vilket sammantaget ger säkrare skattningar. Ett viktigt verktyg i förädlingsarbete och urval av kandidatträdd till att bli föräldrar till framtidens skogsodlingsmaterial är sedan något tiotal år tillbaka programpaketet TREEPLAN®³¹ som är utvecklat i Australien och även används i exempelvis Stora Ensos eukalyptusförädling i Kina³² och i franska INRA:s förädlingsprogram för medelhavstall (*Pinus pinaster*)³³. Detta verktyg förenklar arbetet med att jämföra data från flera generationer och från angränsande förädlingspopulationer, vilket sammantaget förbättrar precisionen i urvalsarbetet. Det underlättar förädling och urval, och möjliggör att fler parametrar och mer komplexa datamängder kan påverka urvalet av individer för fortsatt förädling eller för användning i produktionen av skogsodlingsmaterial.

3.3.3 Tallens härdighet

För tall som ska användas i kärvare klimatlägen i norra Sverige behöver härdigheten testas eftersom det påverkar överlevnaden i plantstadiet. Härdigheten testas i fält eller genom frystest. Det innebär att man i en klimatkammare där ljus och temperatur ställs in för att motsvara förhållanden under hösten mäter hur snabbt olika plantmaterial invintrar, det vill säga hur snabbt de reagerar på kortare dagslängd och lägre temperatur. Frystestet kompletterar fältförsöken i urvalet så att träd med sämre härdighet sällas bort. Trots urval baserat på denna typ av tester är den förväntade överlevnaden hos planterad tall mindre än 50 procent på de kärvaste lokalerna i Norrlands inland.³⁴

Frystestning görs inte bara för urval till fortsatt förädling eller till fröplantager. Man frystestar även fröpartier som skördats enskilda år från nordliga tallplantager och som är avsedda för kärva klimatlägen. Anledningen är att härdigheten kan variera från ett år till ett annat beroende på hur pollinering och väderbetingelser

³¹ Tree Breeding Australia. <http://www.treebreeding.com/technology/treeplan>

McRae TA, Dutkowski GW, Pilbeam DJ, Powell MB, Tier B (2004) Genetic evaluation using the TREEPLAN® system. Paper presented at the IUFRO Joint Conference of Division 2 “Forest Genetics and Tree Breeding in the Age of Genomics: Progress and Future” Charleston, SC, USA, 1–5 November 2004

³² Cheng, Y. *et al.* (2022) Innovative applied breeding of superior eucalypt hybrid clones in China. *Abstract presented at the 2022 Australasian Plant Breeding Conference 9-11 May 2022 Gold Coast.*

³³ Bartholomé J, Van Heerwaarden J, Isik F. *et al.* 2016. Performance of genomic prediction within and across generations in maritime pine. *BMC Genomics* 17, 604. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-2879-8>.

³⁴ Webverktyget Plantval (Skogforsk). <https://www.skogskunskap.se/rakna-med-verktyg/foryngring/plantval/>.

varierat. Testresultatet kan då indikera ett optimalt geografiskt användningsområde utifrån fröpartiets hårdighet.

3.3.4 Skador och skadegörare i urvalsprocessen

I samband med mätning av trädhöjd och diameter i fältförsöken registreras även trädens vitalitet och eventuella skador och skadegörare. Detta görs för att kunna skatta generell sundhet och mottaglighet för sjukdomar. Vitaliteten klassas till någon av kategorierna ”frisk”, ”lätt skadad”, ”svårt skadad men fortfarande vid liv”, och ”död (eller saknad)”³⁵. Begreppet vitalitet används således som ett strikt mått på graden av skadefrihet, och ska inte förväxlas med tillväxt, frodighet eller om trädet exempelvis är stressat av torka. Skogforsk anser att vitalitet är kopplat till resistens eftersom vitalitet är ett mått på generell skadefrihet, och studier har påvisat vitalitetens heritabilitet.³⁶ Men det är svårt att avgöra vilka sjukdomar eller andra skador som är inblandade när vitaliteten är nedsatt.

Vid sidan av vitaliteten registreras skador och skadegörare på orsaks- eller artnivå om de förekommer i tillräckligt hög frekvens i ett försök för att resultaten ska kunna bearbetas statistiskt. Oberoende av angreppsfrekvens slås i allmänhet olika typer av skador samman och ingår i klassningen av vitalitet.

Data kan analyseras för att undersöka om skadorna är i en sådan omfattning att det går att statistiskt skatta genetiska samband som kan utnyttjas i förädlingen. Hittills har detta endast gjorts för individer av tall som är mottagliga för törskate. Dessa har uteslutits från urval för fortsatt förädling eller från att ingå i fröplantager.

3.3.5 Observationsförsök för uppföljning

Efter avslutande inmätning av fältförsök vid en försöksålder av ungefär 12–20 år behålls i stort sett alla försök som observationsförsök. Deras primära syfte är att möjliggöra uppföljande mätningar av hur ingående kloner eller familjer presterar. På så sätt kan man kontrollera om de tidiga prediktionerna om produktion håller över en längre tid.

Ansvar för gallring och annan skötsel av fältförsöken flyttar i allmänhet tillbaka till markägaren som lånat ut marken till Skogforsk under försökets ordinarie löptid. Möjligheterna till uppföljning blir betydligt bättre om den gallring som görs sker systematiskt under överinseende av Skogforsk. Detta i stället för fri gallring (normal skötsel) vilket kan leda till genetisk selektion, det vill säga att vissa kloner eller familjer gallras bort och andra blir överrepresenterade. På grund av höga kostnader för detta testar Skogforsk nu en variant med systematisk röjningsgallring av försöken kort efter den slutliga inmätningen. Det innebär att man tar bort exakt vartannat träd och i många fall kan undvika ytterligare kostnadskrävande gallring under en relativt lång tid framåt.

Hur observationsförsöken sköts och finansieringen av detta har stor betydelse för hur väl försöken kan fungera som datakälla i framtiden. Eftersom observationsförsöken möjliggör en genetisk utvärdering vid nya och svåra

³⁵ Calleja-Rodriguez, A., Andersson Gull, B., Wu, H.X. *et al.* (2019) Genotype-by-environment interactions and the dynamic relationship between tree vitality and height in northern *Pinus sylvestris*. *Tree Genetics & Genomes* 15, 36. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1343-8> .

³⁶ Persson, T., Andersson, B. & Ericsson, T. (2010). Relationship between autumn cold hardiness and field performance in northern *Pinus sylvestris*, *Silva Fenn.*, 44(2): 255-266. <https://doi.org/10.14214/sf.152> .

biotiska eller abiotiska skador på skog i olika åldrar är de en värdefull resurs. Ett exempel är den inventering av törskate som har gjorts i ett sådant försök, vilken ligger till grund för att gallra bort individer som är särskilt känsliga för törskateangrepp i äldre fröplantager.

3.3.6 Förädlad skogsodlingsmaterial

De trädindivider som väljs ut till att ingå i fröplantager mångfaldigas genom att man ympar eller förökar dem med sticklingar så att ett stort antal kopior (rameter) erhålls. Dessa kan planteras i fröplantager (fröodlingar) för produktion av förädlad frö. Skogforsk väljer ut klonerna utifrån önskemål från de skogsföretag som anlägger och driver fröplantager (fröodlingar).

Fröplantager anläggs företrädesvis i odlingsmässigt och lokalklimatiskt gynnsamma lägen i eller nära det avsedda geografiska användningsområde där det skördade fröet ska användas. De kloner som väljs till en fröplantage kan komma från en eller flera av de förädlingspopulationer som testats i och runt det avsedda användningsområdet.

En modern fröplantage innehåller 20–30 trädindivider och uppåt och ett stort antal kopior av varje individ. En fröplantage kan vara flera hektar stor och innehålla flera tusen träd fördelade på de 20–30 klonerna. Syftet med fröplantager är att en stor mängd träd (rameter) av ett mindre antal utvalda individer (kloner) ska korsa sig med varandra och producera mycket frö med de förädlade trädens egenskaper. Körbara stråk för traktor och skylift mellan trädraderna samt beskärning av träden till lämplig höjd effektiviserar kottplockningen, vilket är ett annat viktigt syfte med fröplantagerna. Enligt Rosvall *et al.*³⁷ kan det vara lämpligt att anlägga ett flertal olika fröplantager inom stora plantagezoner snarare än att förlita sig på att en stor plantage ska förse hela området med frö. Med fler plantager kan förädlingsmålen varieras mellan dem och även om de har samma mål kan plantagerna göras genetiskt olika för att sprida risker. Plantagerna skulle exempelvis kunna anpassas till olika klimatscenarior där osäkerheten om framtida klimat kan påverka utfallet, eller ha olika resistensprofil.

Tallfröplantager producerar i allmänhet frö av bra kvalitet och i tillräcklig mängd. Granfröplantager drabbas däremot ofta av skadegörare som angriper kottarna, vilket leder till lägre skördar och sämre frökvalitet.

Material från förädlingsprogrammen för tall och gran har använts för att anlägga olika omgångar (O) av fröplantager som brukar betecknas EttO, TvåO och TreO. För varje omgång har träden som använts varit bättre testade och därmed har de genetiska vinstnivåerna ökat. De TreO-fröplantager som etablerades först är nu på väg in i en fullt produktiv fas. Planering pågår för nästa omgång fröplantager, FyrO, som ska stå för framtida fröproduktion med en allt högre genetisk vinst.

Sedan Skogsstyrelsens (Skogsvårdsorganisationens) uppdrag att tillhandahålla skogsodlingsmaterial upphörde på 1990-talet ansvarar skogsbruket för att tillräckligt mycket skogsodlingsmaterial produceras. Skogsstyrelsens uppdrag är att godkänna och registerföra fröplantager och andra frökällor och har ansvar för

³⁷ Rosvall, O., Wennström, U., Almqvist, C., Andersson, B., Karlsson, B. & Sonesson, J. (2003) Underlag för operativ planering av tredje omgången fröplantager (TreO) i Sverige. Arbetsrapport 550. Skogforsk.

de officiella system som ska säkerställa skogsodlingsmaterialets spårbarhet från frökälla till slutkund. För att kunna använda resultaten från förädlingsprogrammen för produktion och försäljning av förädlad och testad skogsodlingsmaterial måste således Skogsstyrelsens föreskrifter³⁸ följas. Det innebär grundläggande krav på testernas utförande och dokumentation, samt krav på spårbarhet. Alla trädindivider (kloner) och frö från fröplantagerna ska kunna identifieras och spåras genom hela produktionskedjan ända till dess plantan levereras till slutkund.

3.4 Hantering av skador i förädlingsprogram för gran och tall

Detta avsnitt bygger delvis på information om skogsträdsförädling som rapportförfattarna fått i dialog med Skogforsks förädlingsorganisation.

3.4.1 Mer kunskap och ökande skador

Angrepp av skadegörare har stor potential att sänka trädens tillväxt och därmed äventyra skogsträdsförädlingens mål om ökad värdetillväxt. Klimatförändringarna befaras öka dessa risker ytterligare. Genom tillämpad skoglig forskning har kunskapen om genetiskt betingad resistens och försvarsmekanismer mot vissa skadegörare ökat. I några fall där kunskap och incitament har varit tillräckliga har det inletts projekt för resistensförädling. Andra fall avser observationer eller indikationer som skulle kunna ligga till grund för framtida förädlingsinsatser eller anpassningar av skogsodlingen förutsatt att resultaten verifieras och att incitamenten är tillräckligt starka.

Vi kommer troligen se fler exempel på samband mellan trädens genetik och motståndskraft mot skadegörare i framtiden. Sådana resultat behöver värderas för att man ska kunna ta ställning till eventuella ytterligare resistensförädlingsinsatser.

3.4.2 Aktuella skadegörare

Resistensförädling som en integrerad del av de stora svenska förädlingsprogrammen för gran och tall har inletts i begränsad skala. Vid urval till förädling och nya fröplantager av gran används data på resistens mot rotticka, men eftersom data saknas för flertalet individer blir selektionen mycket trubbig.

För törskate på tall i norra Sverige har man kommit lite längre: Inventeringar av genetisk variation i känslighet för törskate hos tall har undersökts systematiskt i flera omgångar med start år 2006 i några av Skogforsks avkommeförsök.³⁹ Resultaten har gjort det möjligt att kartlägga graden av törskateresistens hos kloner i några fröplantager som ger frö till områden som är drabbade av törskate. Fröplantagerna ”T1 Alvik” och ”T5 Pålberget” har därmed gallrats genetiskt genom att ta bort eller minska antalet av de kloner som är mest mottagliga för törskate. Gallringen styrdes genom att beräkna ett index för frihet från törskate, där flertalet kloner med ett index under en viss nivå togs bort.

För ett antal nyanlagda fröplantager (TreO-plantagerna ”T1 Bredåker”, ”T3 Unbyn” och ”T6 Unbyn”) har graden av resistens mot törskate ingått som urvalskriterium vid valet av kloner. Detta har gjorts genom att exkludera alla kloner med en ”törskatefrihet” under tröskelvärde 40 procent. Denna

³⁸ Skogsstyrelsens föreskrifter (SKSFS 2002:2) om produktion för saluföring, saluföring samt införsel för saluföring av skogsodlingsmaterial.

³⁹ Föreningen skogsträdsförädling. <https://skogstradsforadling.se/beviljade-projekt/>

urvalsprincip skiljer sig från övriga parametrar, där urvalet i stället bygger på ett index där olika parametrar ingår efter att ha viktats beroende på hur stor tyngd fröplantageägaren vill att respektive egenskap ska ha (se avsnitt 3.4.3). På så sätt minskar förhoppningsvis risken för allvarliga angrepp i skogar uppkomna från frö från dessa fröplantager.

Det finns flera andra svampsjukdomar på framför allt tall som orsakar betydande skador och som i vissa fall har potential att öka i omfattning i framtiden. Snöskytte kan vid gynnsamma förhållanden orsaka svåra skador i tallföryngringar i snörika områden av norra Sverige. Ett problem är att tallplantorna kan dö av snöskytte innan träden har utvärderats i fältförsök vilket innebär att sjukdomen är svår att detektera. *Gremmeniella* kan döda unga skott och knoppar på tall, gran och contortatall, och kan även angripa äldre tallskog. Svampen gynnas av fuktiga förhållanden och försvagade träd, och kan ge stora ekonomiska förluster.

Gremmeniella, knäckesjuka, snöskytte och törskate är sjukdomar som har inventerats efter utbrott i fältförsök och observationsförsök på tall i norra Sverige⁴⁰ Resultaten visar att det finns en tillräckligt hög grad av genetiskt betingad resistens för att resistensförädling för dessa sjukdomar kan fungera. Urvalet baseras då på både förflyttningseffekten, dvs. den generella anpassningen till klimatet, och den naturliga variationen i resistens inom populationen. Orsaken till angrepp har visat sig kunna bero på dålig anpassning, ett för sydligt tillväxtmönster, för att passa ståndorten.⁴¹

Det finns observationer som indikerar att knäckesjuka kan vara inkörsport för andra skadegörare som exempelvis *Diplodia*.⁴² Om så är fallet kan riskerna med utbredda angrepp av knäckesjuka öka, liksom motiven för att hitta sätt att minska omfattningen av angrepp. Det skulle vara möjligt att inleda resistensförädling för knäckesjuka, men då det fortfarande saknas kvantitativa data på tillväxtförluster över en omloppstid anses det svårt att motivera. Det finns även indikationer på variation i frekvensen av angrepp mellan år, där vissa familjer angrips ett år och andra familjer angrips ett annat. En förklaring är väderbetingad variation i tidpunkten för skottsträckning i förhållande till knäckesjukans spridning av sporer.⁴³ Det naturliga urvalet hos trädpopulationer på nordliga breddgrader styrs i hög grad av klimatfaktorer eftersom dessa innebär ett ständigt närvarande selektionstryck. Selektion för ökad motståndskraft mot en specifik skadegörare kan vara lika kritiskt för överlevnad i samband med att populationer angrips, men eftersom angreppen ofta varierar i tid och rum blir selektionstrycket inte lika konstant.⁴⁴ Dessa exempel visar på komplexiteten i angreppsmönstren mellan sjukdomar och träd, och indikerar att urval för anpassning till ståndort och klimat,

⁴⁰ Persson, T., Andersson, B. & Ericsson, T. 2010. Relationship between autumn cold hardiness and field performance in northern *Pinus sylvestris*, *Silva Fenn.*, 44(2): 255-266. <https://doi.org/10.14214/sf.152> .

⁴¹ 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827580701388215> .

⁴² Gunnar Isacson, Skogsstyrelsen. Personlig kommunikation (2023).

⁴³ Andersson, B. & Danell, Ö. (1997). Is *Pinus sylvestris* resistance to pine twist rust associated with fitness costs or benefits? *Evolution*, 51: 1808-1814. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1997.tb05104.x> .

⁴⁴ Eriksson, G. (1998). Evolutionary forces influencing variation among populations of *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica* 32: 173-184. <https://doi.org/10.14214/sf.694> .

liksom bättre ståndortsanpassning, kan vara viktiga alternativ eller komplement till resistensförädling för att uppnå lägre grad av skador.

3.4.3 Utmaningar

Erfarenheter och kunskap om skadegörare och resistensförädling mot dessa utifrån svenska förhållanden pekar på ett antal utmaningar.

Framtida skadegörare: Törskate började uppmärksammas i ungskog omkring millennieskiftet, men inventeringar har visat på förekomst av omfattande skador och tillväxtförluster i yngre och medelålders skog långt tidigare.^{45, 46} Mot den bakgrunden är det svårt att veta om andra idag påtagliga men hanterbara skadegörare som knäckesjuka eller tallskytte framöver kan bli stora problem på liknande sätt som törskate. Det är likaså omöjligt att förutse utvecklingen för andra ännu inte så välkända men relativt allmänt spridda svampsjukdomar som *Diplodia*, rödbandsjuka och *Sydowia*. Osäkerheten att prognosticera angrepp försvårar generellt möjligheten att ligga steget före och ha en lämplig strategi för att hantera såväl dessa som andra skogsskadegörare.

Brist på fenotypdata: Det finns fenotypdata från fältförsök i olika omfattning för flera vanligt förekommande svampsjukdomar⁴⁷, men data är svåra att använda för att få en tillräckligt bra skattning av genetiskt betingad resistens. Anledningen är att sjukdomstrycket ofta är ojämnt spritt över försöken eller att angreppen är få. Trädhöjd och diameter, mätegenskaper för att skatta målegenskapen volymproduktion, kan enkelt mätas på alla träd i ett försök. Skadegörares angrepp, som är mätegenskap för målegenskapen resistens, går däremot bara gå att mäta om träden visar tydliga angrepp och i tillräckligt hög frekvens.⁴⁸

Vissa sjukdomar som törskate angriper endast somliga försök. Andra sjukdomar som rotröta kan uppträda först efter att försöken är avslutade vilket gör att de i så fall inte fångas upp när försöken inventeras. Eftersom försöken i allmänhet bevaras i form av observationsförsök (avsnitt 3.3.5) skulle det dock vara möjligt att återkomma för senare mätningar om angrepp uppträder i äldre försök. Både när det gäller törskate och rotröta finns dessutom möjligheter att använda screening för att identifiera individer med hög känslighet för respektive sjukdom (avsnitt 3.2.3), men det har inte kommit till praktisk användning i Sverige ännu.

Urvalsstrategier och avvägningar: Urvalet i svensk skogsträdsförädling har hittills byggts på att fyra till fem egenskaper vägs in vid beräkning av ett index som används vid urvalet. Dessa egenskaper är överlevnad/frysskada, höjd, diameter, sprötkvist och grenvinkel/grengrovlek. Det går att addera fler egenskaper som exempelvis resistens, men det riskerar att ske på bekostnad av den potentiella genetiska vinsten i arealproduktion utan eventuella tillväxtförluster som orsakas

⁴⁵ Martinsson, O. & Nilsson, B. (1987) The impact of *cronartium flaccidum* on the growth of *pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2:1-4, 349-357, DOI: <https://doi.org/10.1080/02827588709382472>.

⁴⁶ Lagerberg, T. (1912). Studier över den norrländska tallens sjukdomar, särskilt med hänsyn till dess förnygringar. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt, häfte 9: 162-167.

⁴⁷ Persson, T., Andersson, B. & Ericsson, T. 2010. Relationship between autumn cold hardiness and field performance in northern *Pinus sylvestris*, *Silva Fenn.*, 44(2): 255-266. <https://doi.org/10.14214/sf.152>.

⁴⁸ Maximal variationsskattning för en skada uppnås vid 50 procent genomsnittlig angreppsfrekvens, och avtar mot såväl 0 som 100 procent. Personlig kommunikation Torgny Persson, Skogforsk, 2023.

av skador och sjukdom. Detta innebär att man måste värdera olika egenskaper och göra en avvägning mellan dem.

Vid denna typ av avvägningar kan man även behöva bedöma vilken eller vilka strategier som är lämpliga att använda för att värdera och vikta olika egenskaper vid urval.⁴⁹ Den vanligaste strategin i Sverige är att vikta olika egenskaper genom ett index utifrån hur stort genomslag man vill att respektive egenskap ska ha i urvalet. En annan strategi är att göra urvalet baserat på ett tröskelvärde, vilket i Sverige tillämpats i samband med urval för resistens. Urval kan också göras sekventiellt för en egenskap i taget och då baserat på tröskelvärden för respektive egenskap. Detta har inte tillämpats i svenska förädlingsprogram. En metod som sträcker sig över minst två förädlingscykler bygger på att man använder olika urvalsparametrar i olika generationer. Ett exempel är urval för tillväxt i en första förädlingscykel och resistens i nästkommande cykel, vilket i praktiken varit fallet då mer törskatemottagliga kloner selekterats bort från vissa svenska fröplantager (avsnitt 3.4.2).

3.5 Samband mellan resistens och andra egenskaper

För att kunna inkludera resistensförädling mot sjukdomar i ett traditionellt förädlingsprogram för ökad värdetillväxt är det viktigt att känna till eventuella genetiska korrelationer mellan resistensegenskaper och de tillväxtrelaterade egenskaper man vill förädla för.

En näraliggande fråga handlar om huruvida vissa patogener föredrar att angripa träd med god eller dålig status i fråga om näringsinnehåll, frodvuxenhet eller likande. Sådana preferenser påverkas av hur mycket resurser träden allokerar till försvarsmekanismer och hur mycket tillgängliga näringsresurser patogenen kan erhålla från trädet. Detta diskuteras även när det gäller trädens försvarsstrategier (avsnitt 2.2.1) och växtätarens födosök på träd (avsnitt 4.5).

En svårighet är att kontrollera om de tillväxtegenskaper man är intresserad av i förädlingen påverkas negativt av skador som uppträder eller om eventuella samband beror på genetiska faktorer. Sjukdomar kan exempelvis påverka tillväxten negativt om de pågår under en längre tid och det kan försvåra undersökningar av om det finns genetiska korrelationer mellan tillväxt och resistens. Trots dessa svårigheter har forskning visat på avsaknad av genetiska korrelationer mellan granens resistens mot rotticka och tillväxt eller virkesegenskaper.^{50, 51} Likaså finns forskningsresultat som pekar mot att sådana

⁴⁹ Burdon, R.D., Klápště, J. (2019). Alternative selection methods and explicit or implied economic-worth functions for different traits in tree breeding. *Tree Genetics & Genomes*, 15, 79. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1384-z>.

⁵⁰ Steffenrem, A., Solheim, H. & Skrøppa, T. (2016). Genetic parameters for wood quality traits and resistance to the pathogen *Heterobasidion parviporum* and *Endoconidiophora polonica* in a Norway spruce breeding population. *Eur J Forest Res*, 135: 815–825. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0975-6>.

⁵¹ Chen, ZQ., Lundén, K., Karlsson, B. *et al.* (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. *Eur J Forest Res*, 137: 517–525. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1120-5>.

korrelationer inte heller finns mellan stamtillväxt hos tall och svampangrepp.^{52, 53} Det har även rapporterats svaga genetiska kopplingar mellan hårdighet och förekomst av svampsjukdomar.⁵⁴

Däremot finns det resultat som indikerar att rottickan växer snabbare i granar vars tillväxt har ökat av gödning.⁵⁵ Vidare finns en allmän uppfattning om att frodiga (snabbväxande och/eller gödslade) träd drabbas mer av angrepp av rostsvampar jämfört med mindre frodiga individer^{56,57}. Även om det finns forskningsrapporter som indikerar att rostsvampar gynnas av snabbväxande träd har de studier som gjorts på tall i det svenska förädlingsprogrammet påvisat svaga samband mellan rostsvampangrepp och tillväxt.⁵⁸ Eftersom eventuella positiva eller negativa korrelationer mellan olika målegenskaper är så viktiga att känna till behöver detta kontinuerligt undersökas genom forskning och följas upp i förädlingen.

Risken att träd som får en ökad resistens mot en viss skadegörare blir mer mottagliga för andra skadegörare eller någon annan abiotisk stressfaktor är ytterligare en viktig aspekt i samband med resistensförädling. I en stor studie på contortatall i Kanada skattades heritabiliteten för resistens mot tre olika skadegörare, varav två rostsvampar och en insekt.⁵⁹ Resultaten visade att det skulle vara möjligt att förädla för alla ingående skadegörare samtidigt och att selektion för resistens inte skulle påverka tillväxtpotentialen negativt. Denna typ av korrelationer har inte studerats i Sverige på ett systematiskt sätt.

⁵² Murat, A., Payn, ., Mckeand, S. & Isik, F. (2023). Genetic Parameter Estimates from a Polymix Breeding Population of *Pinus taeda* L., *Forest Science*, 69: 415-423, <https://doi.org/10.1093/forsci/xfad006> .

⁵³ 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. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827580701388215> .

⁵⁴ Persson, T., Andersson, B. & Ericsson, T. 2010. Relationship between autumn cold hardiness and field performance in northern *Pinus sylvestris*, *Silva Fenn.*, 44(2): 255-266. <https://doi.org/10.14214/sf.152> .

⁵⁵ Piri, T. (2007). Effects of vitality fertilization on the growth of *Heterobasidion annosum* in Norway spruce roots. *European Journal of Forest Pathology*, 28: 391-397. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1998.tb01193.x> .

⁵⁶ Skogsskötselserien nr 12, Skador på skog, del 2, Skogsstyrelsen. <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/mer-om-skog/skogsskotselserien/skogsskotselserien-12-skador-pa-skog-del-2-gamla-och-nya-epidemier-och-utbrott-pa-skog.pdf>

⁵⁷ Martinsson, O. & Nilsson, B. (1987) The impact of *cronartium flaccidum* on the growth of *pinus sylvestris*. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2:1-4, 349-357, DOI: <https://doi.org/10.1080/02827588709382472>.

⁵⁸ 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*. 37:3, 153-171. <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2085322> .

⁵⁹ Wu, HX. & Ying, CC. (1997) Genetic Parameters and Selection Efficiencies in Resistance to Western Gall Rust, Stalactiform Blister Rust, Needle Cast, and Sequoia Pitch Moth in Lodgepole Pine, *Forest Science*, 43: 571-581, <https://doi.org/10.1093/forestscience/43.4.571> .

4 Skadegörare och skador i svensk kontext

Kapitlet redogör för några av de patogener och orsaker till skador som förekommer i Sverige och där resistensförädling bedöms ha potential att förbättra skogsodlingsmaterialet. Algsvampar av släktet *Phytophthora* kan angripa många olika trädarter och är ett växande problem globalt och i Sverige.⁶⁰ Redogörelse för dessa algsvampar och åtgärder mot dem ryms inte i denna rapport då släktet är stort och komplext, och många olika trädslag kan angripas.

I maj 2023 tillsatte regeringen en statlig offentlig utredning *Skogsträdsförädling för ökad motståndskraft*⁶¹. Syftet är att föreslå samhällsekonomiskt motiverade åtgärder, exempelvis förädling, för att långsiktigt bevara främst ask och alm med tanke på klimatförändringar och skogsskadegörare. Eftersom utredningens betänkande ska redovisas senast den 30 april 2024, behandlas resistensförädling av alm och ask endast kortfattat i denna rapport.

4.1 Askskottsjuka

4.1.1 Biologi och spridning

Forskningen på askskottsjuka i Europa är mycket omfattande, varför kunskapen idag är relativt god om svampens biologi och hur sjukdomen påverkar Europas askbestånd.⁶² Askskottsjukan orsakas av sporsäcksvampen *Hymenoscyphus fraxineus* (tidigare *Chalara fraxinea*) med ursprung i Ostasien. Den har spridits invasivt i Europa sedan åtminstone 1990-talet, och det första fallet i Sverige konstaterades 2001.

4.1.2 Motståndskraft

Motståndskraft mot askskottsjuka varierar stort mellan olika arter av ask. Vår vanliga ask tillhör de mest mottagliga arterna, medan smalbladig ask är något mer resistent. Manna-ask som har en sydligare utbredning i Europa har en mycket god motståndskraft mot sjukdomen. Skillnaderna i resistens beror troligen på arternas utvecklingshistoria, där olika exponering för askskottsjukans patogen eller liknande patogener påverkat utvecklingen.⁶³

Asken saknar trots allt inte motståndskraft helt. Enligt Enderle⁶¹ uppvisar cirka en procent av de europeiska askarna inga eller obetydliga symptom och betraktas som resistent eller toleranta. Andra källor uppger att 3–5 procent av individerna har en viss grad av resistens. Studier tyder även på att olika populationer har olika grad av resistens. Exempelvis verkar motståndskraftiga askar vara mer vanligt

⁶⁰ Matsiakh I, Menkis A. (2023). An Overview of *Phytophthora* Species on Woody Plants in Sweden and Other Nordic Countries. *Microorganisms*. 11(5):1309. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051309>.

⁶¹ Regeringens utredningsdirektiv: <https://www.regeringen.se/rattsliga-dokument/kommittedirektiv/2023/05/dir.-202360>

⁶² Enderle, R., Stenlid, J. & Vasaitis, R. (2019). An overview of ash (*Fraxinus* spp.) and the ash dieback disease in Europe. *CAB Reviews*, 14: 025. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914025>.

⁶³ Plumb, WJ., Coker, TLR., Stocks, JJ., et al. (2020) The viability of a breeding programme for ash in the British Isles in the face of ash dieback. *Plants, People, Planet*, 2020: 2: 29–40. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10060>.

förekommande på brittiska öarna än i Danmark.⁶⁴ Resultat visar även på högre grad av motståndskraft hos träd med övervägande hanblommor jämfört med honblommiga träd. I och med att det finns resistenta askar är det troligt att trädslaget kommer att finnas kvar i landskapet om än på en mycket låg nivå. Detta gäller även om inga ansträngningar görs för att få fram ett mer resistent skogsodlingsmaterial av ask.

4.1.3 Åtgärder

Det tydligaste övergripande rådet till skogsägare är att inte hugga ner askar som uppvisar någon form av motståndskraft mot askskottsjuka. Helst bör dessa träd märkas upp. Då undviker man att de huggs ner av misstag och kan samtidigt följa individernas utveckling över tid. I Norge har man rekommenderat plantering av friska plantor från lokala frökällor, både för att förhindra förlust av genetisk variation och för att bevara trädens lokala anpassning.

4.1.4 Resistensforskning och resistensförädling

Resistensforskning som syftar till att få fram ett mer motståndskraftigt skogsodlingsmaterial är enligt de flestas bedömningar det mest framgångsrika eller kanske det enda sättet att bevara asken i mer än en rudimentär nivå i skogs- och kulturlandskapet. Detta bygger på att det finns en tillräcklig genetisk variation i resistens och att resistensen är genetiskt betingad. I flera av Europas länder pågår aktiviteter för att begränsa skadorna och återfå en mer resistent population av ask. Danmark har etablerat fröplantager med planerad skörd av mer resistent skogsodlingsmaterial till 2025. Det finns även pågående program i Litauen, Tyskland, Österrike, Storbritannien och flera andra länder.⁶⁵

Efter askskottsjukans inträde i Sverige görs insatser för att identifiera och föröka genotyper av ask med en hög resistens mot angrepp av skadesvampen med syftet att etablera en fröplantage. Skogforsk driver den praktiska förädlingen av ask vid sin fältstation i Ekebo, medan forskning främst utförs vid SLU. Förädlingen är i ett tidigt skede där insamlade kloner från askens hela svenska utbredningsområde och från äldre fröplantager nu står på tillväxt. Syftet är fortfarande främst tillämpad forskning och utveckling för att uppnå förädlingsresultat, vilket troligen kräver mer resurser och att fler aktörer i hela produktionskedjan deltar.

4.2 Almsjuka

4.2.1 Biologi och spridning

Almsjukan angriper alla tre arter av alm som förekommer naturligt i Europa; vår vanliga skogsalm (*Ulmus glabra*), vresalm (*U. laevis*) och lundalm (*U. minor*). Sjukdomen har drabbat Europa i två steg. Först på 1910-talet då svampen *Ophiostoma ulmi* orsakade symptomen. Den har en relativt svag virulens och många almar överlevde attackerna. Patogenen fördes på 1930-talet vidare till USA där det något årtionde senare uppträdde en ny och mer virulent variant, *Ophiostoma novo-ulmi*, som slog ut en stor andel av de amerikanska almarna.

⁶⁴ Sollars, E., Harper, A. & Kelly, L. *et al.* (2017). Genome sequence and genetic diversity of European ash trees. *Nature*, 541: 212–216. <https://doi.org/10.1038/nature20786> .

⁶⁵Plumb, WJ., Coker, TLR., Stocks, JJ., *et al.* (2020) The viability of a breeding programme for ash in the British Isles in the face of ash dieback. *Plants, People, Planet*, 2020: 2: 29–40. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10060> .

Denna aggressiva variant fördes till Europa kring 1970 och började snabbt att spridas från Nederländerna till land efter land i almens hela utbredningsområde. Till Sverige och Skåne kom almsjukan 1980 och har därefter spridit sig till större delen av landet där almen förekommer vilket där lett till mycket stor utslagning av trädslaget. Ett undantag är de mindre populationer av bergalm (*Ulmus glabra* subsp. *montana*) som finns spridda i delar av södra och mellersta Norrland.

Risken för att all alm i Sverige dör ut är liten på grund av rotskottsbildning och att unga träd kan reproducera sig innan de angrips av almsjukan. Det allvarliga är när grövre och äldre almar försvinner. Då går samtidigt en lång rad biologiska, kulturella och sociala värden förlorade för gott.

4.2.2 Åtgärder

År 2005 kom almsjukan till Gotland. Bekämpningen började redan året därpå och har sedan dess fortgått kontinuerligt. Spridningen av almsjukan kontrolleras genom att identifiera, destruera och transportera i väg allt material från angripna träd. Tack vare dessa åtgärder och Gotlands isolerade läge finns stora delar av almpopulationen kvar, främst lundalm. Almpopulationen på Gotland är unik i hela Europa på grund av sin storlek och de olika värden den hyser. Av den anledningen är det mycket viktigt att även fortsättningsvis bekämpa almsjukan på Gotland.

De alternativ som hittills nyttjats för att bevara alm framför allt i landskap och städer i Europa är vaccinering av extra värdefulla träd samt plantering av resistenta kloner av både europeiska och främmande arter av alm. Dessa metoder har varit aktuella där de kulturella och sociala värdena dominerat.

4.2.3 Resistensforskning och resistensförädling

I Sverige har det inte forskats tillräckligt på resistens mot almsjukan för att man med säkerhet ska kunna säga hur stor genetisk variation i motståndskraft som kan finnas och som skulle kunna utnyttjas i förädling. Under 2023 gjorde SLU och Skogforsk ett almupprop⁶⁶. Syftet är att få information om friska almar som potentiellt kan visa sig ha motståndskraft mot almsjukan och som står nära sjuka almar. En framtida resistensförädling av lund- och skogsalm i Sverige är nödvändig för att man ska kunna restaurera alm i prioriterade områden. Tillsammans med en fortsatt bekämpning av almsjukan på Gotland framstår resistensförädling som ett viktigt verktyg för att långsiktigt kunna bevara almen i Sverige.

I bland annat Nederländerna, Spanien och USA har man satsat mycket på att skapa resistenta hybrider mellan olika arter av alm, exempelvis en europeisk och en asiatisk art, för att kombinera resistens och lokal anpassning i samma kloner.⁶⁷ I Europa är det främst lundalm som är föremål för denna utveckling, där man i Spanien har ett litet antal resistenta kloner som inte bara är avsedda för urbana miljöer utan även skulle kunna användas som skogsodlingsmaterial.⁶⁸

⁶⁶ [Almuppropet 2023: Friska almar nära sjuka sökes! | Externwebben \(slu.se\)](#)

⁶⁷ Martín, JA., Sobrino-Plata, J., Rodríguez-Calcerrada, J. *et al.* (2019). Breeding and scientific advances in the fight against Dutch elm disease: Will they allow the use of elms in forest restoration? *New Forests*, 50: 183–215. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9640-x>.

⁶⁸ Martín, JA. *et al.* (2015). Seven *Ulmus minor* clones tolerant to *Ophiostoma novo-ulmi* registered as forest reproductive material in Spain. *iForest*, 8: 172-180. doi: <https://doi.org/10.3832/ifor1224-008>.

4.3 Törskatesvamp på tall

4.3.1 Biologi och spridning

Törskate (*Cronartium pini*) är en väl studerad rostsvamp som angriper tall över hela landet.⁶⁹ Svampens utbredningsområde är hela norra barrskogsbältet och den angriper flera olika tallarter. Angrepp av törskatesvamp på tall rapporterades redan i början av 1800-talet. Den angriper såväl unga som äldre tallar och den kan därför förekomma under hela beståndets omloppstid. Sporerne infekterar genom barrrens klyvöppningar eller direkt i barken, varefter hyfer växer in i floem och xylem där den blockerar transporten av växtnäring och vatten. När infektionen vuxit från angreppsstället in till stammen dör så småningom den del av trädet som är ovanför grenen, och sedan ofta hela trädet även om det kan ta många år för äldre träd. Normalt tar det några år från det att trädet blir angripet tills dess att man kan fastställa symptomen.

Törskatesvampens tydligaste symptom är de orange fruktkroppar som framträder i juni månad. Ett annat tydligt tecken är att hela eller stora delar av grenar lyser av röda barr som dött på grund av angrepp på grenar eller stam. Andra kännetecken är avlånga stamsår indränkta med kåda och förtjockningar på angripna grenar. Om svampen strypt näringstillförseln ovanför angreppet dör toppen vilket kan synas på långt håll på äldre tallar. I tät ungskog och medelålders skog kan det dock vara svårt att se symptomen. Där är de tydligaste tecknen de orange fruktkropparna som syns under försommaren. Det är därför den tid då det är enklast att identifiera angrepp av törskate.

Det finns två varianter av törskatesvampen – en asexuell variant (tidigare *Cronartium flaccidum*) som sprider sig från tall till tall, och en sexuell variant (tidigare *Peridermium pini*) som värdväxlar med olika kärlväxter, framför allt skogskovall och tulkört. De två varianterna av törskate kan inte skiljas åt i fält men däremot med hjälp av DNA-teknik. Det har inte gått att hitta några skillnader i virulens mellan de båda varianterna och de förekommer båda två i hela landet. Enskilda populationer av båda varianterna från olika delar av landet kan dock uppvisa varierande aggressivitet.

4.3.2 Åtgärder

För att kunna avgöra vilka skötselåtgärder som är lämpliga behöver man fastställa om det är törskate som drabbat beståndet, och om så är fallet vilken variant det är. Det finns sannolikt olika lämpliga skötselstrategier beroende på vilken variant av svampen som dominerar.

Det råder fortfarande osäkerhet kring hur snabbt svampen sprider sig i träd och hur det varierar med trädets egenskaper. Yngre träd dör oftast av angreppen, medan äldre träd kan överleva länge, och vissa fall överleva svampangreppet helt.

Skogsstyrelsen rekommenderar inte att man lämnar törskateangripna tallar som fröträd eller hänsynsträd om det inte är träd med höga naturvärden. Den viktigaste

⁶⁹ 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*. 37:3, 153-171. <https://doi.org/10.1080/02827581.2022.2085322>.

anledningen är att minska riskerna för att törskateangripna och därmed mottagliga tallar sprider sina gener vidare till naturligt förnygrade träd.

4.3.3 Resistensförädling

Genetiskt betingad resistens mot törskatesvamp utnyttjas i förädlingen av tall i norra Sverige för att ta fram mer motståndskraftiga träd. Detta beskrivs i avsnitt 3.4.2. Utvecklingen mot ett mer effektivt urval som bygger på screening av plantmaterial beskrivs i avsnitt 3.2.3. Kopplingen mellan angrepp av rostsvampar och tillväxt behandlas i avsnitt 3.5.

4.4 Rotticka på gran

4.4.1 Biologi och spridning

Röta i levande träd orsakas framför allt av svamparna rotticka (*Heterobasidion spp.*), hougsskivling (*Armillaria spp.*) och blödsinn (*Stereum sanguinolentum*), där rottickan är den absolut vanligaste och den som orsakar de största skadorna. I Sverige finns två arter av rotticka; *Heterobasidion annosum* s.s. och *Heterobasidion parviporum* där den första (tidigare kallad P-typen) angriper såväl tall som gran och andra trädslag, medan den senare (tidigare S-typen) framför allt angriper gran. *H. annosum* s.s. återfinns i södra Sverige upp till norrlandsgränsen medan *H. parviporum* finns i hela landet.

Rottickans sporer sprids vid temperaturer över noll grader. Sporererna är luftburna och gror på färsk vedytor, exempelvis stubbar och skadade rötter. Svampens mycel växer ned i veden och kan sprida sig till träd i närheten genom rotkontakter.

4.4.2 Åtgärder

Åtgärder för att minska spridningen av rottröta orsakad av rotticka bygger på att undvika att färsk stubbar infekteras av sporer. Den klassiska metoden är att undvika avverkning under årets varmare månader då sportrycket är högre än under vintern. Vi avverkning då risken för sporspridning är stor kan stubbehandling med medel som hindrar rottickans sporer att gro vara ett relativt effektivt sätt att minska infektionerna. Detta tillämpas ganska allmänt vid gallring av gran i temperaturer över 5 plusgrader, och möjligheten att införa stubbehandling även vid slutavverkning diskuteras. Ungskogsröjning och underväxtröjning under sommarhalvåret har också visat sig kunna leda till ökad infektion i beståndet vilket lett till råd om att undvika röjning av grandominerade bestånd under denna tid. I Finland finns lagkrav på stubbehandling vid såväl slutavverkning som gallring under vissa temperaturbetingelser.

4.4.3 Resistensförädling

Granens försvar mot rotticka bygger på produktion av organiska föreningar som hämmar svampens tillväxt. Denna kemiska försvarsförmåga som kan ge träden en viss resistens varierar mellan träd. Eftersom variationen till stor del är genetiskt betingad och inte tycks vara korrelerad med tillväxt eller virkesegenskaper finns grundläggande förutsättningar för resistensförädling för ökad resistens. Forskning på både rottickans genetik och värdträdets genetik kopplat till resistens pågår, och resultaten kommer att användas i förädlingsprogrammet för gran. Målsättningen är att selektera bort förädlingsmaterial med låg resistens mot rotticka och därigenom höja den genomsnittliga motståndskraften i framtida förädlade plantor.

Det finns även planer på vegetativ framställning av högresistenta plantor från särskilt motståndskraftiga kloner.

Utvecklingen av molekylärbioologiska tekniker har möjliggjort identifiering av gener som styr resistens mot rotröta. Dessa gener används för att identifiera genotyper med lägre eller högre grad av resistens. Det är fortfarande bara en mindre del av klonerna som finns i fröplantager och förädlingsprogram som är testade. Det finns därmed stort behov av systematisk testning av resterande kloner. Metoder för inokulering med rotticka på gran har utvecklats för att kunna användas vid screening av plantmaterial vilket behandlas översiktligt i avsnitt 3.2.3. Detta har ännu inte utnyttjats vid förädling eller anläggning av nya fröplantager för gran.

4.5 Fytofager: insekter och klövvilt

Klövvilt och snytbagge är exempel på växtätare som på olika sätt och i olika grad kan skada barrträd. Det är allmänt känt att klövviltsbete på ungskog av tall tenderar att vara mer intensivt på vissa träd än andra i ett bestånd, och att djuren ofta återkommer till träd som betats tidigare år. Det finns även tydliga skillnader i snytbaggens intensitet i angreppen mellan olika plantor på en föryngringsyta. Djurens preferenser påverkas troligen av både ståndortsfaktorer och genetiska faktorer som inverkar på trädens tillväxt och näringsinnehåll, sekundära metaboliter (försvarsämnen) och andra foderegenskaper.^{70 71}

Det finns olika hypoteser om vilken typ av träd klövvilt och insekter föredrar. Enligt ”plant vigour hypothesis”⁷² föredrar herbivorer generellt kraftiga och vitala träd, medan ”plant stress hypothesis”⁷³ föreslår att djuren främst föredrar träd med någon form av stress. Hypoteserna kopplar till frågan om det finns positiva eller negativa korrelationer mellan resistens mot angrepp av fytofager och andra viktiga egenskaper i förädlingen, främst tillväxt. Vissa resultat pekar mot positiva samband och att ökad tillväxt ökar risken för angrepp.^{74 75} Samtidigt kopplar hypoteserna till frågan om det är möjligt att förädla för resistens mot angrepp av herbivorer. Även här finns resultat att så är fallet åtminstone för insekter.⁷⁶ Troligen finns motsvarande möjligheter att resistensförädla mot viltbete även om vägen dit kan vara längre och ekologiska metoder som att minska viltstammar och öka tillgången på alternativt foder även måste användas.

⁷⁰ Felton, AM., Wam, HK., Stolter, C., Mathisen, KM. & Wallgren, M. (2018). The complexity of interacting nutritional drivers behind food selection, a review of northern cervids. *Ecosphere*, 9: 5: e02230. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2230>.

⁷¹ Iason, GR., O'Reilly-Wapstra, JM., Brewer, MJ., Summers, RW. & Moore, BD. (2011). Do multiple herbivores maintain chemical diversity of Scots pine monoterpenes? *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 12; 366:1337-45. doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0236>.

⁷² Price, PW. (1991). The plant vigour hypothesis and herbivore attack. *Oikos*, 62, 244-251. <https://doi.org/10.2307/3545270>.

⁷³ White, TCR. (2009). Plant vigour versus plant stress: a false dichotomy. *Oikos*, 118: 807–808. <https://www.jstor.org/stable/40235390>.

⁷⁴ Zas, R., Björklund, N., Sampedro, L. *et al.* (2017). Genetic variation in resistance of Norway spruce seedlings to damage by the pine weevil *Hylobius abietis*. *Tree Genetics & Genomes*, 13, 111. <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1193-1>.

⁷⁵ Herms, DA. & Mattson, WJ. (1992). The Dilemma of Plants: To Grow or Defend. *The Quarterly Review of Biology*, 67: 283–335. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/2830650>.

⁷⁶ Whitehill, JGA. & Bohlmann, J. (2019). A molecular and genomic reference system for conifer defence against insects. *Plant Cell Environ.*, 42: 2844-2859. <https://doi.org/10.1111/pce.13571>.

En studie på granplantor framställda genom den vegetativa metoden somatisk embryogenes (SE) påvisade mindre skador av snytbagge hos SE-plantor jämfört med plantor som dragits upp från frö.⁷⁷ Detta var enligt rapportförfattarna inte genetiskt betingat utan mer troligt ett resultat av att den stress SE-tekniken medförde ledde till att plantorna satte i gång sina försvarssystem och utsöndrade olika kemiska ämnen (sekundära metaboliter) som repellerade snytbaggarna. Mycket återstår troligen innan detta fenomen kan förklaras fullt ut, men det visar på komplexiteten och svårigheterna med att klarlägga hur olika faktorer påverkar trädens motståndskraft mot angrepp av växtätare.

4.6 Torkstress

Klimatförändringarna leder troligen till ökade risker för temporär torkstress i högre grad än vad vi än så länge har sett. Tillsammans med andra extremhändelser utmanar det trädens resiliens och motståndskraft mot skadegörare. Hittills anses det mycket svårt att ta höjd för extremhändelser i prognoser för skogars framtida utveckling eller i förädlingsprogram. Däremot räknar man inom förädlingen med att torka på hittills mer normala nivåer ger avtryck i förädlingsprogrammets resultat. Det sker genom den naturliga variation i torkstress som fångas upp i de fältförsök som ligger till grund för urval till fortsatt förädling och till fröplantager.

Trädens respons på torkstress varierar och kan bero på graden av torka, om stressen beror på att marken eller luften är torr, och på trädens arvsanlag.⁷⁸ Till att börja med regleras klyvöppningarna vilket är en momentan och central reaktion för att styra trädets vattenhushållning. Det påverkar också upptaget av koldioxid som behövs för fotosyntes som ger energi och byggmaterial för tillväxt och försvar. Många trädslag faller löv vid stark torka, vilket inte bara minskar vattenavgång och fotosyntes, utan möjliggör att resurser kan allokeras till exempelvis rötterna. Även tillväxten kan avta genom mindre celledelning och cellexpansion. Hos träd kan vattenpelarens kontinuitet i stammens ledningsbanor (xylemet) vara en känslig punkt och avgörande för vattenförsörjningen. Att vidmakthålla den är en viktig strategi vid svår torka. Torkstress kan öka känsligheten för insektsangrepp och patogener som kan sänka tillväxten och indirekt hota överlevnaden.

Torkstress kan ge olika effekter och reaktioner hos träd beroende på deras ålder och storlek. Studier på unga träd kan därför inte översättas till hur äldre träd reagerar på torka. Detta kan vara en utmaning i samband med urval och förädling där undersökningar ofta görs på yngre material. Skogsträdsförädling och relaterad forskning motiveras ofta utifrån behovet av virkesproduktion. Torktolerans kan i de sammanhangen ofta definieras som bibehållen tillväxt under förhållanden med torkstress. En mer plastisk fenotyp kan emellertid vara en evolutionär fördel för träden och därmed för produktionen på lång sikt där tillväxten i stället varierar

⁷⁷ Puentes, A., Högberg, K.-A., Björklund, N. & Nordlander, G. (2018). Novel Avenues for Plant Protection: Plant Propagation by Somatic Embryogenesis Enhances Resistance to Insect Feeding. *Front. Plant Sci.*, 9: 1553. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01553>.

⁷⁸ Ryan, M.G. (2011). Tree responses to drought. *Tree Physiology*, 31: 237–239. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr022>

med vattentillgång, vilket innebär en högre tillväxt vid god vattentillgång och lägre tillväxt vid vattenstress.⁷⁹

En studie om granens försvarsreaktioner mot blånadssvamp som sprids med granbarkborre visade att trädens försvar blev lägre vid svår torka under månaderna innan svampen inokulerades.⁸⁰ Detta kunde tolkas som att trädens inducerade kådförsvår försämrades vid brist på vatten och/eller kådans byggstenar (lösliga kolhydrater). Studien stödde delvis hypotesen att olika provenienser kan uppvisa olika grad av försvar mot granbarkborre. Detta eftersom en proveniens från Nordosteuropa med senare tillväxtstart bildade fler så kallade traumatiska hartskanaler än en svensk proveniens som började växa tidigare på säsongen. Antalet hartskanaler som bildas vid barkborreangrepp har i andra studier visat sig påverka trädets förmåga att övervinna och överleva angrepp av barkborre. En slutsats av studien var att det finns skäl att komplettera förädlingsmålen för svensk skogsträdsförädling med ökad motståndskraft mot olika biotiska skadegörare.

⁷⁹ Moran, E., Lauder, J., Musser, C., Stathos, A. & Shu, M. (2017). The genetics of drought tolerance in conifers. *New Phytologist*, 216: 1034-1048. <https://doi.org/10.1111/nph.14774>

⁸⁰ Öhrn, P., Berlin, M., Elfstrand, M., Krokene, P. & Jönsson, AM. (2021). Seasonal variation in Norway spruce response to inoculation with bark beetle-associated bluestain fungi one year after a severe drought, *Forest Ecology and Management*, 496: 119443. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119443> .

5 Internationella erfarenheter av resistensprogram

Internationellt finns stor erfarenhet av förädlingsprogram för resistens hos flera trädslag mot olika skadegörare. Detta kapitel redogör för några vetenskapliga översiktsartiklar som summerar och beskriver dessa erfarenheter, samt ger en vägledning för att utveckla resistensprogram.

5.1 Erfarenheter från några resistensprogram

En översiktsartikel av Woodcock *et al.* från 2019⁸¹ sammanfattar viktiga lärdomar från en rad resistensprogram från norra halvklotet. Programmen syftade främst till att främja virkesproduktion, restaurera ekosystem eller för att ta tillvara trädslagets kulturella eller estetiska värden.

I dessa program screenade man resistens mot skadeinsekter och patogener genom undersökningar i fält och fröplantager, eller genom att inokulera träden med skadegöraren. Alla programmen bedrevs under flera decennier och omfattade bland annat följande trädslag och skadegörare:

- Västlig vittall, *Pinus monticola* som är känslig för White Pine Blister Rust (WPBR, *Cronartium ribicola* J.C. Fish. Rabenh).
- Flera arter av alm, *Ulmus*, som över trädslagets hela utbredningsområden dödats av almsjukan orsakad av svamparna *Ophiostoma ulmi* och *O. novo-ulmi*.
- Sitkagran, *Picea sitchensis* som är känslig för skadegöraren *Pissodes strobi* (White pine weevil).
- Amerikansk kastanj (*Castanea dentata*), idag listad som en akut hotad art. Den invasiva svampen *Cryphonectria parasitica* från Asien har sedan 1904 dödat miljarder träd med omfattande ekologiska och ekonomiska konsekvenser som följd.

Enligt artikeln garanterar resistensprogram inte en fullständig framgång men tillräckliga resurser och välplanerade program kan generellt bidra till att mildra effekter av skadeinsekter och patogener. Nedan framgår ett antal slutsatser från artikeln samt relaterad forskning.

5.1.1 Biologiska förutsättningar hos värdträd och skadegörare

Flera biologiska aspekter hos värdträd och dess patogener eller skadeinsekter påverkar möjligheter och förutsättningar för ett resistensprogram. Värdträdets resistens mot en skadegörare kan omfatta ett brett spektrum av svar: extrem känslighet, olika grader av partiell resistens eller fullständig resistens (se 2.2.1-2). Alla system för värdträd och skadegörare är olika. En central faktor är om värdträdet har en genetisk variation för resistens och i vilken grad den är ärftlig,

⁸¹ Woodcock, P., Marzano, M. & Quine, C.P. (2019). Key lessons from resistant tree breeding programmes in the Northern Hemisphere. *Annals of Forest Science*, 76: 51. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0826-y>.

dess heritabilitet.⁸² Resistensens omfattning i naturliga populationer och i skogsodlingsmaterialet ger information om skadegörarens potentiella effekt över tid och om möjligheten att implementera ett framgångsrikt resistensprogram.

Forskning från USA och Kanada visar att nio arter av vittall är mottagliga för den invasiva rostsvampen White Pine Blister Rust, WPBR.⁸³ Den är närbesläktad med törskatesvamp och är en obligat patogen vilket innebär att den alltid orsakar sjukdom. WPBR kräver en art i vinbärssläktet, *Ribes* spp., samt en fembarrig tallart att värdväxla mellan. Interaktionen mellan svamp och värd är dynamiskt, föränderligt och påverkas av faktorer hos både svamp, värd och omgivning.

De olika arterna av tall är utvärderade med avseende på resistens eller ingår i operativa resistensprogram. Det mest omfattande resistensarbetet i västra Nordamerika avser främst vittall (*P. monticola*), sockertall (*P. lambertiana*), Weymouthtall (*P. strobus* L.) och under senare tid vitbarktall (*P. albicaulis*). Arbetet har hittills resulterat i tillgänglighet och användning av resistent frö från de viktigaste arterna för att återplantera och restaurera skogar. Fyra tallarter har fullständig resistens mot WPBR genom reglering av en enskild gen, samt partiell resistens som troligen uttrycker av flera gener. Övriga fem tallarter verkar endast delvis resistenta mot rostsvampen.

5.1.2 Resistens och vitalitet över tid

Ett resistensprogram bör beakta olika risker med att utöva ett starkt urvalstryck på skadegöraren som att skadegöraren övervinner värdträdens resistens. Vitaliteten hos resistenta träd kan minska över tid om patogenen utvecklar nya stammar som trädet inte är lika resistent mot, eller om träden är partiellt resistenta mot patogenen. Dessa risker kan påverka användningen av det resistenta materialet.

Sniezko *et al.* (2020) undersökte hur hållbar och stabil resistensen hos västlig vittall och sockertall var mot rostsvampen *Cronartium ribicola*.⁸⁴ Man identifierade resistens hos båda arterna i screeningförsök av plantor i åtta 15 till 20-åriga fältförsök i Oregon och norra Kalifornien. Hållbarheten avsåg om patogenens utveckling av virulens ledde till en minskad resistens hos tallarna. Man skattade hållbarhet genom att plantera resistent material i närvaro av skadegöraren över stora arealer och under lång tid. Med stabilitet avsåg forskarna att studera om resistensen mot rostsvampen var effektiv både över tid och under olika miljöer och klimatförhållanden.

Resultaten visade att resistensen varierade både mellan trädslag och miljöer. Den kvalitativa resistensen (en enskild gen med stor effekt) var därmed av begränsad användning på sikt när resistenta träd utvecklade skadesymptom. Kvantitativ resistens (uttryckt av flera gener) mot sjukdomar bedömdes vara mer långsiktigt hållbar i flera försök. Forskarna drog därför slutsatsen att screening bör omfatta

⁸² Sniezko, R.A. & Koch, J. (2017). Breeding trees resistant to insects and diseases: putting theory into application. *Biol. Invasions*, 19: 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1482-5>.

⁸³ Sniezko, R.A. & Liu, J.-J. (2022). Genetic resistance to white pine blister rust, restoration options, and potential use of biotechnology. *Forest ecology and management*, 520: 15: 120168. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120168>.

⁸⁴ Sniezko, R.A., Johnson, J.S., Savin, D.P. (2020). Assessing the durability, stability, and usability of genetic resistance to a non-native fungal pathogen in two pine species. *Plants, People, Planet*, 2: 57–68. <https://doi.org/10.1002/ppp3.49>.

både kvalitativ och kvantitativ resistens. Man framhöll även vikten av långsiktiga skattningar av resistens i fältförsök kombinerat med resistensprogram för att bedöma resistensens hållbarhet och stabilitet över flera miljöer.

Studien visade även att det vid återbeskogning eller restaurering är viktigt att följa upp resistensen av materialet. Även information om i vilken frekvens som resistensen förekommer i en plantage eller en familj är viktig. Det finns endast få resistensprogram, särskilt gällande inhemska träd och främmande skadegörare, som har studerats under tillräckligt lång tid eller på ett sådant sätt så att de kan ge god kunskap om hur hållbar och stabil resistensens är. I den första generationen av förädling är resistensen ofta begränsad, varför en fortsatt förädling kan vara önskvärd för att få en ökad hållbarhet och stabilitet.

Forskarna drog slutsatsen att skogsträdsförädling är ett viktigt verktyg för att utveckla resistent träd. Men oavsett förädlingsmetod, konventionell eller med hjälp av genomik eller bioteknik, är användning av resistent material inte ett fullständigt botemedel mot skadegörare. Forskarna menade därför att man bör ha realistiska förväntningar på vad resistensförädlingen kan åstadkomma.

5.1.3 Genetisk variation

Vid utplantering av resistent träd ges vanligen rekommendationer om att bevara trädslagets genetiska variation och att använda sig av en blandning av trädslag. Plantager eller populationer där resistensen har utvecklats behöver behålla genetisk variation i adaptiva egenskaper som tillväxthastighet, tålighet mot torka och köldhärdighet för att kunna anpassa sig till olika miljöer. En tillräcklig nivå av genetisk variation behöver därför bevaras i plantagen eller populationen. Det bör inte heller finnas negativa korrelationer mellan resistens och andra adaptiva egenskaper. Det innebär att träd som är resistent mot en skadegörare fortfarande bör ha en god tillväxthastighet, köldhärdighet eller tålighet mot torka.

Eftersom frekvensen av ärftlig resistens mot många skadegörare ofta är låg kan man behöva utvärdera hundratals till tusentals föräldraträd eller deras avkommor för att hitta individer som är tillräckligt resistent och behålla en tillfredsställande genetisk variation. Trädslagets geografiska utbredningsområde kan behöva delas in i förädlingszoner för att utveckla resistent träd som kan överleva och anpassa sig till sin lokala miljö samtidigt som de visar en stabil resistens över flera miljöer.

5.1.4 Operativ långsiktig hantering

Den operativa hanteringen i ett resistensprogram bör balansera mellan hur brådskande hotet från skadegöraren är och konsekvenserna av om det resistent materialet inte presterar som tänkt. Om en skadegörare med stor spridningsförmåga introduceras kan det innebära att man relativt snabbt behöver utveckla ett resistensprogram. Det tar ofta minst 10–20 år innan det är möjligt att plantera ett resistent material (Figur 1). Arbetet kan påskyndas genom att använda genomik vid screening och förädling. Utvecklingen av resistens kan ta längre tid om man även vill inkludera andra önskvärda egenskaper, bibehålla genetisk variation eller använda en viss förädlingsmetod.

Det finns olika metoder för att söka (screena) efter resistens i fältförsök. Screening innebär dock begränsningar av den genetiska variationen, bland annat genom att man gör ett urval av genotyper och antalet försökslokaler.⁸⁵

Trädslagets egenskaper som fröproduktion, tid till frömodnad, samt möjlighet att ta sticklingar från eller ympa trädet påverkar möjligheten att utveckla och använda ett resistent material.⁸⁶ Användningen beror bland annat av tillgången på det resistenta materialet, trädslagets spridningsförmåga, samt biotiska och abiotiska förhållanden och risker. Även trädslagets ekologiska, sociala, kulturella och ekonomiska betydelse påverkar målet med och förutsättningarna kring resistensprogrammet.

Det är även viktigt att beakta andra befintliga och framtida skaderisker för trädslaget, utöver den skadegörare man försöker hantera i programmet. Anledningen är att träd som är resistent mot en specifik skadegörare kan vara mottagliga både för andra skadegörare och för olika abiotiska påfrestningar. Det påverkar möjligheten att lyckas i resistensprogrammet och med användningen av det resistenta materialet.

5.1.5 Finansiering

Resistensprogram kräver generellt varaktiga investeringar under medellång till lång sikt. Otillräckliga resurser eller brist på samordning kan leda till brister exempelvis att man tillgängliggör material som kan vara resistent även då resistensdata från fältförsök ännu inte är tillräckliga.

Flera utmaningar kring resistensförädlingen i USA finns beskrivna.⁸⁷ De omfattar behovet av kostsam infrastruktur som laboratorier, växthus och lokaler för fälttester. Även olika personella resurser och expertis är nödvändig för att operativt hantera verksamheten och att registrera och analysera resistensdata över tid. Dessa aktiviteter är vanligtvis inte samordnade i operativa förädlingsprogram, varför resistensprogram ofta inte lyckas tillgodose en storskalig efterfrågan på ett förbättrat odlingsmaterial.

Vidare är kooperativ som drivs av universitet och industri en stor tillgång för resistensförädlingen i östra USA. Resistensprogrammen drivs och finansieras av medlemmarna med fokus på kommersiellt värdefulla trädslag. Medlemmarna använder fröplantagerna för eget bruk. Finansieringen är dock beroende av medlemskap och investeringar och varierar därför över tid.

I USA har statliga plantskolor tillhandahållit mark och personal för att sköta fröplantager och göra avkommeprövningar vilket har varit viktigt för resistensförädlingen. Antalet plantskolor minskar dock stadigt i hela USA. Framför allt i östra USA där den mesta marken är privatägd saknas även rätt

⁸⁵ Sniezko, R.A. & Koch, J. (2017). Breeding trees resistant to insects and diseases: putting theory into application. *Biol. Invasions*, 19: 3377–3400. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1482-5>.

⁸⁶ Woodcock, P., Cottrell, J., Buggs, R. & Quine, C. (2018). Mitigating pest and pathogen impacts using resistant trees: A framework and overview to inform development and deployment in Europe and North America. *Forestry*, 91. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx031>.

⁸⁷ Pike, C.C., Koch, J. & Nelson, C.D. (2021). Breeding for resistance to tree pests: successes, challenges, and a guide to the future. *Journal of Forestry*, 19: 96–105. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa049>.

kompetens och faciliteter för att bedriva resistensförädling som motsvarar befintliga och framtida krav.

5.1.6 Samordning och samverkan

Resistensprogram kräver i allmänhet under medellång till lång sikt en central samordning av exempelvis regering och/eller icke-statliga organisationer.⁸⁸ Exempelvis har samverkan mellan privata och offentliga sektorer i östra USA varit avgörande för resistensförädling och ökad fröproduktion. Även om samverkan skiljer sig mellan olika resistensprogram omfattas ofta följande:

- En grupp personer som har åtagit sig att rädda en art och de socioekonomiska och ekologiska värden som är kopplade till arten.
- Forskare i olika områden som är intresserade av att förstå underliggande vetenskapliga orsaker till resistensen.
- Finansieringskällor som bidrar med så pass mycket resurser så att det även kompenseras för variationer i finansiering mellan olika år.
- Ett konkret intresse och engagemang hos aktiva volontärer och intresserade medborgare för resistensprogrammet.
- Nätverk av personer i ledande befattningar som vill uppnå en effektiv resistens och kommunicera om data, framsteg och motgångar i programmet.

Framgångsrika resistensprogram behöver förlita sig på en flexibel samverkan mellan myndigheter, ideella organisationer, branscher, medborgare och forskare för att allokera resurser och producera resultat. För att möta framtida utmaningar med skadegörare krävs att samverkan är innovativ och utformad för att identifiera, utveckla och använda resistenta träd.

Den amerikanska kastanjen är ett karismatiskt trädslag och ett unikt exempel på en kombination av framgångsfaktorer. Många forskare har studerat mekanismer bakom resistensen mot den invasiva svampen *Cryphonectria parasitica* och hur den kan kontrolleras. En begränsning är dock att producera kastanjetråd där trädens ursprung och fenotyp är kända. Om man lyckas med det kan resistensforskningen bli mer attraktiv. Information om trädens ursprung bidrar till att integrera förädling, biokontroll och biotekniska program för att restaurera den amerikanska kastanjen.

5.1.7 Uppföljningar och utvärderingar

De resistenta trädens utveckling i fältförsök och plantager behöver följas kontinuerligt. Det möjliggör både att utvärdera det resistenta materialet och att identifiera och försöka motverka kommande hot, exempelvis nya stammar av patogener.

⁸⁸ Pike, CC., Koch, J. & Nelson, CD. (2021). Breeding for resistance to tree pests: successes, challenges, and a guide to the future. *Journal of Forestry*, 19: 96–105. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa049>.

Det är lämpligt att sondera efterfrågan av ett material som har utvecklats i ett resistensprogram. Viljan att använda det materialet beror bland annat på vilka fördelar det har i skogsodlingen, vilket förtroende man har för att materialet verkligen är resistent och huruvida man kan acceptera att resistensen kanske inte är fullständig.

Se även Bilaga 1 för en vägledning för resistensprogram.

5.2 Forskning

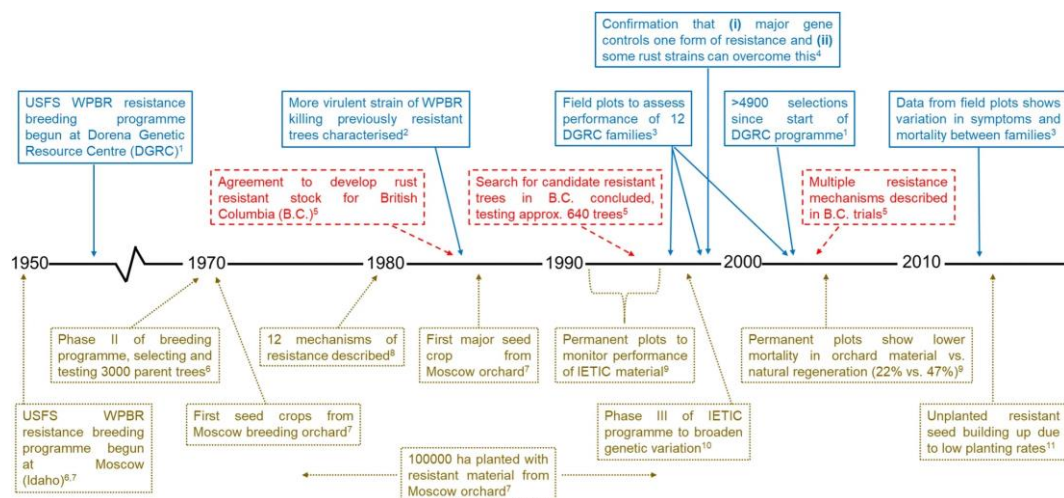
För trädslag som främst är av ekologiskt intresse som ask, hemlock och bok, får forskning och utveckling av resistens ofta mindre och mer kortsiktiga anslag.⁸⁹ För att resistensförädlingen och resultaten därifrån ska vara effektiv och konkret krävs dock en kontinuerlig och långsiktig finansiering.

Vissa aspekter av resistensförädling går att genomföra på kort sikt och lämpar sig därför för forskning. Det omfattar biologiska studier av nya patogener, patogeners interaktioner inom ekosystem, histologiska interaktioner mellan värd och patogen och studier av vilka koncentrationer av inockulum som behövs för att framkalla ett svar (olika grad av resistens) hos värdrädet. Andra aspekter av resistensförädling som kontrollerade korsningar och avkommeprövningar tar längre tid och är därför beroende av insatser vid förädlingsinstitut eller myndigheter. Om sådana insatser inte sker exempelvis för att trädslaget saknar kommersiellt intresse, kan det leda till att forskningresultaten aldrig tas omhand i förädlingsprogram eller fröplantager. Således är det en utmaning att omsätta resultat från resistensforskning till att producera ett skogsodlingsmaterial med förbättrade resistensegenskaper.

Trädens storlek och långa generationstid innebär behov av långsiktiga institutionella åtaganden vilket kan vara en svårighet i resistensforskningen.⁹⁰ Det kan leda till en mer begränsad utveckling av metoder i resistensprogram, eller att forskare inte anser resistens hos skogsträd vara ett tillräckligt dynamiskt och attraktivt forskningsområde. Även att publicera resistensforskning med dess långa tidsperspektiv kan vara svårt. Möjliga konsekvenser är att resultat inte expertgranskas och/eller endast publiceras i interna rapporter eller i underlag i samband med konferenser. Detta kan i sin tur innebära svårigheter att hitta kvalitetssäkrade resultat från resistensstudier.

⁸⁹ Pike, CC., Koch, J. & Nelson, CD. (2021). Breeding for resistance to tree pests: successes, challenges, and a guide to the future. *Journal of Forestry*, 19: 96–105. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvaa049>.

⁹⁰ Buggs, RJA. (2019). Changing perception of tree resistance research. *Plants People Planet*, 2: 2-4. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10089>



Figur 1. Tidslinje med centrala händelser i resistensprogram för västlig vittall, *Pinus monticola* i Nordamerika⁹¹. Programmen avser Dorena Genetic Resource Center (blå text), British Columbia Ministry of Forests (röd text) och Inland Empire Tree Improvement Co-operative (brun text). Hänvisningar till angivna referenser finns i den refererade artikeln.

⁹¹ Woodcock, P., Marzano, M. & Quine, C.P. (2019). Key lessons from resistant tree breeding programmes in the Northern Hemisphere. *Annals of Forest Science*, 76: 51. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0826-y>.

6 Utgångspunkter för resistensprogram i Sverige

Detta kapitel behandlar några utgångspunkter att förhålla sig till vid utveckling av resistensprogram för skogsträd i Sverige.

6.1 Regler om skogsodlingsmaterialets genetiska egenskaper

Produktion och saluföring av skogsodlingsmaterial regleras genom EU-harmoniserad lagstiftning.^{92,93} Enligt dessa regler ska svenska frökällor, till exempel fröplantager, frötäktbestånd och kloner, vara godkända av Skogsstyrelsen innan frö och plantor från dem får saluföras. Myndigheten kontrollerar dessutom genom sin tillsyn att frökällor sköts på så sätt att de skördade fröpartiernas genetiska egenskaper i så hög grad som möjligt avspeglar de godkända frökällorna.

Egenskaper som enligt regelverket ska bedömas vid godkännande av frökällor är anpassningsbarhet, sundhet, resistens, volymproduktion, virkeskvalitet samt form och växtsätt. Kravnivåer på de egenskaper som bedöms utgår från aktuell tillgänglig kunskap och utifrån ägarens eller sökandens syfte med frökällan.

Sverige har inga strikta lagkrav som sätter exakta nivåer för de egenskaper som bedöms, men det finns krav på att skogsodlingsmaterial ska ge skogsbestånd som har goda förutsättningar att utvecklas väl och som kan utnyttja marken för tillfredsställande virkesproduktion.⁹⁴ Detta krav motsvarar såväl allmänna samhällsintressen som Sveriges internationella åtaganden om exempelvis biologisk mångfald⁹⁵ och kolinlagring⁹⁶.

6.2 Regler om växtmaterial och skadegörare

Historiskt har det funnits en palett av skogsskadegörare som skogsbruket i Sverige med hjälp av forskningen har lärt sig att leva med. Utvecklingen med ökande handel med växtmaterial och ett varmare klimat har ökat riskerna för att nya aggressiva och potentiellt invasiva skadegörare etablerar sig i Europa och Sverige.⁹⁷ EU har inom ramen för sitt arbete med livsmedelssäkerhet utvecklat lagstiftningen för växthälsa och växtskydd för att motverka en sådan utveckling.⁹⁸ En viktig pusselbit är att förhindra reglerade skadegörare att introduceras och

⁹² Skogsstyrelsens föreskrifter (SKSFS 2002:2) om produktion för saluföring, saluföring samt införsel för saluföring av skogsodlingsmaterial

⁹³ Rådets Direktiv 1999/105/EG av den 22 december 1999 om saluföring av skogsodlingsmaterial

⁹⁴ Skogsstyrelsens föreskrifter och allmänna råd (SKSFS 2011:7) till Skogsvårdslagen

⁹⁵ Konventionen om biologisk mångfald. <https://www.cbd.int/countries/?country=se>.

⁹⁶ Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2023/839 om ändring av förordning (EU) 2018/841 vad gäller tillämpningsområdet, förenkling av reglerna för rapportering och efterlevnadskontroll och fastställande av medlemsstaternas mål för 2030 och av förordning (EU) 2018/1999 vad gäller förbättrad övervakning, rapportering, uppföljning av framsteg och översyn.

⁹⁷ Santini, A., Ghelardini, L., De Pace, C., Desprez-Loustau, M.L. *et al.* (2013). Biogeographical patterns and determinants of invasion by forest pathogens in Europe. *New Phytol.*, 197: 238-250. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04364.x>.

⁹⁸ Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2016/2031 om skyddsåtgärder mot växtskadegörare, ändring av Europaparlamentets och rådets förordningar (EU) nr 228/2013, (EU) nr 652/2014 och (EU) nr 1143/2014 samt om upphävande av rådets direktiv 69/464/EEG, 74/647/EEG, 93/85/EEG, 98/57/EG, 2000/29/EG, 2006/91/EG och 2007/33/EG

sprida sig inom unionen. Handelsbegränsningar med detta syfte måste dock balanseras mot kraven på frihandel utifrån världshandelsorganisationen, WTO:s, regler vilket påverkar reglernas omfattning.⁹⁹

Skadegörare som ännu inte finns inom EU eller som endast finns i begränsade områden kan regleras som karantänskadegörare (Quarantine Pests, QP) inom EU. Om de sprids inom unionen kan det få stora miljömässiga, ekonomiska eller sociala konsekvenser. Misstanke om förekomst av dessa arter måste därför anmälas till en behörig myndighet, som för Sveriges del är Jordbruksverket. Om förekomst konstateras sjösätts EU:s åtgärdsplan för utrotning eller inneslutning av skadegöraren.¹⁰⁰ Ett exempel på en sådan karantänskadegörare är smaragdgrön asksmalpraktbagge, *Agrilus planipennis* (Emerald ash borer).¹⁰¹ Denna skalbagge har i Nordamerika och Ryssland uppvisat aggressiva angrepp som dödat samtliga angripna askar efter några år.

Askskottsjuka och almsjuka är exempel på redan introducerade skadegörare som inte hann regleras innan de var spridda inom EU.^{102, 103} Askskottsjukan spreds troligen initialt i Europa genom handel med växtmaterial. Karantänsbestämmelser hade möjligen kunnat stoppa eller begränsa patogenens spridning, men eftersom den beskrevs vetenskapligt först år 2006 hade svampen hunnit få en omfattande spridning i Europa och den sprids ytterligare med hjälp av vinden. Medvetenheten om askskottsjukan kom således för sent för att få effektiva karantänsåtgärder på plats.

Det finns även lagstiftning för reglerade icke-karantänskadegörare (Regulated Non-Quarantine Pests, RNQP) inom EU. Den lagstiftningen är avsedd att minimera risken för att vissa etablerade skadegörare som bedöms kunna ge omfattande ekonomiska förluster sprids via växtmaterial. Ett exempel på en reglerad icke-karantänskadegörare på skogsodlingsmaterial är rödbandsjuka, patogenen *Dothistroma needle blight* (*Dothistroma spp.*, *D. septosporum* och *D. pini*).¹⁰⁴ Många arter av tall är känsliga för denna patogen som ursprungligen kommer från Nordamerika. Enligt SLU Skogsskada upptäcktes rödbandsjukan i Sverige 2007 och den är nu etablerad i landet.

Vid förflyttning av växtmaterial inom EU krävs enligt växtskyddslagstiftningen att avsändaren intygar att materialet är fritt från både karantänskadegörare och icke-karantänskadegörare. Övriga skadegörare, som inte är reglerade, omfattas inte av detta krav. I sammanhanget bör nämnas att av de mer än 400 miljoner skogsplantor som årligen levereras till Sverige har mer än 50 miljoner plantor odlats upp vid plantskolor utomlands, främst Tyskland och andra länder runt

⁹⁹ Cook, DC. & Fraser, RW. (2008). Trade and invasive species risk mitigation: Reconciling WTO compliance with maximising the gains from trade. *Food Policy*, 33: 176-184.

<https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2007.07.001> .

¹⁰⁰ [Karantänskadegörare - Jordbruksverket.se](https://www.jordbruksverket.se/karantanskadegorare)

¹⁰¹ [ovr240.pdf \(jordbruksverket.se\)](https://www.jordbruksverket.se/ovr240.pdf)

¹⁰² Skogsstyrelsen, 2017. Skogsskötselserien. Skador på skog, del 1 och 2.

¹⁰³ Skogsstyrelsen, 2013. Beredskap vid skador på skog. Meddelande 3.

¹⁰⁴ Kommissionens genomförandeförordning (EU) 2019/2072 om fastställande av enhetliga villkor för genomförandet av Europaparlamentets och rådets förordning (EU) 2016/2031 vad gäller skyddsåtgärder mot växtskadegörare. Bilaga VI, del E.

Östersjön¹⁰⁵. Både täckrotsplantor och barrotsplantor innebär att stora mängder odlingssubstrat och rester av bevattningsvatten förs in i Sverige, vilket har potential att fungera som inkörsport för nya oreglerade skadegörare i landet.¹⁰⁶

6.3 Klimatförändringarnas effekter på skogen

Klimatförändringarna kommer att påverka skogen och skogsbruket i allt högre grad. Medeltemperaturen i Sverige har redan ökat med en dryg grad från perioden 1961–1990 till perioden 2010–2017. Detta motsvarar mer än 15 mils nordförflyttning av klimatzonerna i Sverige, eller drygt 140 meter uppåt i höjded.¹⁰⁷

Några konsekvenser av klimatförändringarna är att längre tillväxtsäsonger generellt ökar skogens tillväxt. Högre temperaturer på våren och sommaren kan dock öka risken för torka och skogsbrand. Dessutom innebär en tidigare tillväxtstart hos träden att risken för vårfrost ökar då temperaturskillnaden mellan dag och natt fortfarande är stor. Man räknar även med att mer nederbörd och höjda grundvattennivåer under vinterhalvåret kan förkorta tillväxtsäsongen på blöta marker.

Med undantag för älg i sydligaste Sverige kommer mildare vintrar att leda till större stammar av klövvilt vilket kan öka betesskadorna. Även risken för stormfällning ökar, i synnerhet om andelen gran fortsätter att vara på en hög nivå i södra Sverige.

Förutsättningarna för många skadeinsekter och patogener väntas bli mer gynnsamma i ett varmare klimat. Det gäller vanligt förekommande och kostsamma skadegörare som rotröta, granbarkborre och snytbagge, men också andra inhemska och nytillkomna främmande arter. Samtidigt kan många naturliga fiender till skadegörarna få bättre förutsättningar att föröka sig om det finns kontinuerlig tillgång till föda i form av lämpligt substrat, vilket kan motverka ökningen av vissa skadegörare. Genom att gynna naturliga fiender i skogsbruket kan således effekterna av vissa skadegörare dämpas.

6.4 Skogsskötsel för klimatanpassning och mot skadegörare

Klimatanpassning handlar om att säkra framtida skogsproduktion och minska kostnaderna för akut skadehantering genom att minska risken för klimatrelaterade skador.

Skogsstyrelsen har efter samråd med skogssektorn tagit fram och rapporterat om effektmål och förslag på anpassningsåtgärder för att möta det förändrade klimatet.¹⁰⁸ Effektmålen har tre syften; att upprätthålla ett skogsbruk med jämn leverans och god ekonomi, att motverka negativa effekter på andra samhällsvärden, och att underlätta renskötselns klimatanpassning. Riskspridning

¹⁰⁵ [Levererade skogsplantor - Skogsstyrelsen](https://skogsstyrelsen.se/statistik/statistik-efter-amne/levererade-skogsplantor/) (https://skogsstyrelsen.se/statistik/statistik-efter-amne/levererade-skogsplantor/)

¹⁰⁶ Stenlid, J., Oliva, J., Boberg, JB. & Hopkins, AJM. (2011). Emerging Diseases in European Forest Ecosystems and Responses in Society. *Forests*, 2: 486–504. <https://doi.org/10.3390/f2020486>.

¹⁰⁷ Skogliga konsekvensanalyser 2022. Rapport 2021/6. Skogsstyrelsen.

¹⁰⁸ Klimatanpassning av skogen och skogsbruket – mål och förslag på åtgärder. Rapport 2019/23. Skogsstyrelsen.

är en central del av klimatanpassningen. Rapporten rekommenderar skogsägare att använda olika typer av skogsodlingsmaterial både avseende trädslag och vilka frökällor plantorna kommer från. Syftet är att uppnå en hög genetisk variation både mellan och inom de vanligaste trädslagen. En viss andel oförädlad material rekommenderas också om den naturliga föryngringen ligger på en låg nivå i landskapet (se även¹⁰⁹). Detta kan även fungera som jämförelsematerial i förhållande till skog som uppkommit från förädlade plantor. Även föryngringsmetod och skötselsystem kan varieras för ökad riskspridning. Det innebär att man tillämpar såväl plantering som sådd och naturlig föryngring, varierar trakthyggesbruk med hyggesfria metoder och ökar andelen blandskog. Åtgärder för riskspridning bör enligt rapporten gå hand i hand med god ståndortsanpassning.

Riskspridningen gäller även i förhållande till skogsskadegörare. Vissa skadegörare gynnas exempelvis av trakthyggesbruk där slutavverkning och plantering med barrplantor kan utgöra ett smörgåsbord för snytbaggens och de svarta bastborrarans olika utvecklingsstadier. Likaså kan likåldrig äldre granskog som plötsligt exponeras för sol och vind i samband med slutavverkning av beståndet intill främja tillväxten av granbarkborrar. Liknande situationer kan givetvis uppstå naturligt, men att variera skogsbruksmodellen kan minska risken för större angrepp.

Skogsägare i Centraleuropa ser sig om efter alternativa trädslag. Detta eftersom planterad gran har drabbats hårt av granbarkborre och andra skadegörare på grund av de senaste årens kombination av värme och torka. En liknande utveckling riskeras i delar av Sverige där granen dominerat skogsodlingen. Skogsbruket i södra och mellersta Sverige kan därför behöva se över strategin att i så hög grad som idag förlita sig på gran som huvudträdslag. Vid sidan av tall kan användningen av trädslag från sydligare latituder därför komma att öka (assisterad migration). Dessutom kan användning av plantor med specifika egenskaper såsom torktålighet komma att realiserars beroende på förädlingsframstegen.

I törskatedrabbade områden i norra Sverige ser man sig om efter alternativ till tall i samband med föryngring. Sibirisk lärk¹¹⁰ är det trädslag som rönt mest intresse. Förädlingsinsatser sker vid Skogforsk med målet att öka tillgången till förädlad material för norra Sverige, men det råder fortfarande brist på lämpligt frö.

6.5 Resistensförädlingens plats i skogsbruket

De lagtekniska och skogliga åtgärder som beskrivs i detta kapitel syftar till att förebygga angrepp av skadegörare och skapa klimatresilienta skogar. Resistensförädling och resistensprogram aktualiseras när dessa åtgärder inte utförts, inte räckt till eller när skadegörare av andra orsaker angriper skogen i större skala.

¹⁰⁹ Lindgren, D. (2010) Konsekvenser av skogsträdsförädling och fröplantager beträffande genetisk variation och skadegörare. Bilaga 5 till Karlsson, B. och Rosvall, O. (2010) Uppdrag om förbättrat växtodlingsmaterial, Jo2008/1883.

¹¹⁰ Benämns även rysk lärk. Westin, J., *et al.* (2016) Förädling av lärk i Sverige – Kunskapsläge och material. Skogforsk arbetsrapport 895-2016.

Det är svårt att inleda resistensförädling förebyggande eller innan man ser allvarliga skador. Det kan bero på svårigheter att motivera kapacitetsuppbyggnad innan hotet från den aktuella skadegöraren är reellt och att driva resistensförädlingen i rätt riktning då antalet sjukdomar och kombinationer av sjukdomar och klimathändelser kan bli stort i framtiden.

Resistensförädling kan därför ses som ett instrument att ta till när andra åtgärder inte bedöms räcka till, när en patogen ökar dramatiskt eller då stora skadeverkningar redan är ett faktum. Den långsiktighet som krävs för framgång i resistensförädling gör å andra sidan att framförhållning och tidiga förberedande steg borde vara lönsamt, i synnerhet för sådana skadegörare där andra åtgärder redan på förhand bedöms vara otillräckliga.

7 Slutsatser och rekommendationer

Rapportens övergripande slutsats är att det krävs många olika åtgärder för att minska problemen med skogsskadegörare. Resistensförädling är en viktig del i ett batteri av åtgärder och förändringar som krävs av skogsbruket.

7.1 Informationsdelning

7.1.1 Information om skadegörare

Den sammantagna kapaciteten för att hantera skogsskador och skadegörare finns hos flera organisationer som bidrar med olika former av projekt, specialistkompetens, myndighetsutövning och finansiering.

Kapaciteten har växt under senare år, men för att alla resurser ska kunna bidra maximalt krävs tydliga roller, effektiva samverkansformer och inte minst en effektiv informationsöverföring. Denna typ av immateriell kapacitet behöver utvecklas och formerna för det etableras.

Tidig information till rätt aktörer bidrar till mer effektiva åtgärder när nya skadegörare etablerar sig. Därför är kunskap och medvetenhet om skadegörare i fältorganisation och bland skogsägare viktigt. Att rapportera relevanta fynd vidare kan vara avgörande för vilka åtgärder som kan vidtas. Informationskedjan från observation i fält till specialister, beslutsfattare och forskare behöver vara säker och välkänd för alla berörda. Med ökad medvetenhet kan antalet rapporter om skador öka, vilket ställer större krav på beredskap att hantera och värdera denna information.

7.1.2 Information om skogsodlingsmaterial

Information till intressenter och finansiärer: Skogsträdsförädlingens generella inriktning, inklusive resistensförädling, avgörs av intressenter och finansiärer som i hög grad baserar sina beslut på underlag från Skogforsk. För att skapa förutsättningar för välgrundade och långsiktiga beslut bör sådana underlag innehålla scenarier där långsiktig effekt av olika förädlingsinriktningar beskrivs. Samlad information med rimliga antaganden om förädlingens effekter på tillväxt, kvalitet, resistens och andra förädlingsmål ger förutsättningar för en bred diskussion om hur mål för exempelvis tillväxt, riskspridning och virkeskvalitet ska värderas och nås.

Information till skogsägare: Beslut om metod för återbeskogning (plantering, sådd eller naturlig föryngring) och val av skogsodlingsmaterial påverkar i hög grad hur förädlingens effekter tas tillvara på bästa sätt. Det innebär att det förädlade materialet används på de objekt där förädlingseffekten utnyttjas bäst. En stor del av den produktiva skogsmarken ägs av intressenter och direkta finansiärer till skogsträdsförädlingen. Här finns troligen bra tillgång till information tillgänglig för de som beslutar om skogsodling och skogsodlingsmaterial i praktiken. Övrig skogsmark ägs av exempelvis privatpersoner som inte har samma direkta tillgång till information. Här kommer sådan information ofta via virkesköpare, entreprenörer, rådgivare eller plantleverantörer vilket gör dem till mycket viktiga kanaler för informationsspridning. Dessa aktörer behöver därför ha goda kunskaper och incitament så att de kan ge skogsägaren en allsidig information. Då

kan skogsägaren i sin tur göra välgrundade avvägningar i sitt skogsbruk, exempelvis gällande tillväxt, resistens, riskspridning, ekologiska aspekter, samt ha rimliga förväntningar på det förädlade materialet.

Utvecklingen mot alltmer högförädlad skogsodlingsmaterial i kombination med risken för ökade skogsskador ställer behovet av en allsidig och korrekt information om skogsodlingsmaterial på sin spets. Skogligen aktörer som Skogforsk, SLU och Skogsstyrelsen, samt företag som levererar tjänster och säljer skogsodlingsmaterial och rådgivning, behöver se över sin kommunikation med kunder och rådgivningsmottagare för att besluten om återbeskogning ska bli så välgrundade som möjligt.

7.2 Skogsträdsförädling

7.2.1 Verktyg för resistensförädling

Skogsträdsförädling bygger idag på en enkel och snabb registrering av mätegenskaper som höjd och diameter i traditionella fältförsök. Skogsskadegörare uppträder i allmänhet inte i tillräcklig frekvens i sådana fältförsök för att denna typ av registrering ska ge användbara resultat. Resistensförädling kräver på samma sätt enkla och snabba metoder för att mäta effekter av skogsskadegörare på ett stort antal individer. Metoderna måste medge systematisk registrering där mätegenskaperna förekommer i tillräcklig frekvens för att statistisk bearbetning ska kunna göras och motståndskraftiga träd identifieras med god statistisk säkerhet.

Screening: Screening av skador på plantor efter artificiell inokulering med rotsvampar under kontrollerade former har under många år varit och är fortfarande ett viktigt verktyg vid resistensförädling i bland annat USA.¹¹¹ Företag och organisationer i Sverige har dragit slutsatser av bland annat erfarenheterna från USA, och förbereder en uppbyggnad av infrastruktur för att screena plantor. Ett screeningcenter skulle kunna genomföra tidiga tester av tusentals plantor (genotyper) vilket kan bli ett värdefullt verktyg i svenska resistensförädlingsprogram. De skadegörare som är mest aktuella är rotticka på gran och törskate på tall. Resultaten från tidiga tester i ett screeningcenter bör följas upp i fältförsök för att verifiera att resultaten håller över tid och under naturliga betingelser.

Observationsförsök: Skogsträdsförädlingens fältförsök övergår efter slutinmätning till långliggande observationsförsök för att möjliggöra uppföljning av beståndets utveckling. Observationsförsöken bör så långt som möjligt skötas för att möjliggöra framtida systematisk inventering i samband med skador. Åtgärder görs för skötsel av försöken men finansieringen är osäker. Det bör prioriteras att allokera resurser för en fortsatt långsiktig skötsel av observationsförsöken eftersom de kan ge värdefull information om mottaglighet för skadegörare när träden blir äldre.

Breeding without breeding: Resultat av resistensförädling bör även följas upp i praktiskt skogsbruk, till exempel genom ”breeding without breeding” (se 3.2.4). Detta innebär att man mäter in trädens prestation i praktiska planteringar och

¹¹¹ Hannerz, M. (2023) Friskare träd i framtidens skog – med ett screeningcenter för törskate och rotröta.

undersöker om det finns korrelationer mellan graden av angrepp hos träden i beståndet och deras föräldrar och andra släktingar, exempelvis kloner i en fröplantage.

*Verktøget Plantval*¹¹²: När mer data finns tillhands bör möjligheter att utveckla Skogforsk webbaserade verktyg Plantval till att inkludera resistensinformation tas tillvara.

7.2.2 Motståndskraft och tillväxt

Framgångsrika förädlings- och resistensprogram bygger på att det finns god kännedom om eventuella genetiska korrelationer mellan resistensegenskaper och andra egenskaper man förädlar för. Baserat på tillgänglig forskning har skogsträdsförädlingen hittills dragit slutsatsen att inga ogynnsamma korrelationer finns mellan tillväxt och resistens. En sådan slutsats bör hela tiden betraktas som preliminär och bör utmanas genom analys av tillgänglig forskning. Berörda aktörer inom forskning och skogsträdsförädling rekommenderas att bidra till ökad kunskap inom området och att kontinuerligt följa upp om sådana korrelationer förekommer. Frågan om samband mellan trädets olika egenskaper är angelägen för både skogsträdsförädlare och skogsbruk och ett viktigt ämne för fortsatt forskning.

Mot bakgrund av pågående klimatförändringar, extrema väderhändelser och ökande risker för angrepp av skogsskadegörare är rekommendationen att i förädlingsprogrammen lägga större vikt vid trädens anpassning till sådana stressfaktorer. Varje egenskap som läggs till i urvalet vid förädling minskar den genetiska vinsten för övriga egenskaper. Ökad tonvikt på anpassning till stressfaktorer kan därför innebära att andra förädlingsmål som volymproduktion måste prioriteras lägre. Även om det inte upptäcks några genetiska korrelationer mellan olika egenskaper man förädlar för, bör det ändå finnas en beredskap för att introduktion av andra förädlingsmål än volymtillväxt kan leda till lägre tillväxtpotential. Urval av träd med bättre anpassningsförmåga (resistens, torktålighet etc.) kan å andra sidan antas medföra en högre sannolikhet att deras förväntade tillväxtpotential realiserar över en omloppstid.

7.2.3 Förädling för olika skogsbruksmetoder

Skogsträdsförädling bygger på mätning av trädens egenskaper och prestation i unga, likåldriga och trädslagsrena fältförsök. Det innebär att förädlingen tar fram genotyper som ger hög arealproduktion under likartade betingelser, exempelvis trakthyggesbruk. Skogsbruket påverkas av drivkrafter som leder mot ökad variation i skogsbruket. Därmed förväntas inslagen av olikåldriga bestånd med fler trädslag att bli vanligare. Utifrån detta scenario är rekommendationen att lägga mer resurser på att undersöka om det finns skillnader i hur förädlad material utvecklas och klarar trycket från skadegörare i blandskog och olikåldriga bestånd jämfört med förhållandena i traditionella fältförsök.

¹¹² Plantval är ett webbaserat verktyg som hjälper användare att välja skogsodlingsmaterial för en viss lokal. Verktøget rangordnar skogsodlingsmaterial från olika frökällor efter deras beräknade produktion på den aktuella lokalen. Plantval utvecklas och drivs av Skogforsk. <https://www.skogskunskap.se/rakna-med-verktyg/foryngring/plantval/>

7.2.4 Förädling för ökad variation

Det allokeras betydande resurser till förädling och produktionssystem för barrträd med mycket hög produktionskapacitet. Även om förädlingen syftar till att få fram träd med optimal tillväxt i framtida klimat bör risken beaktas att denna tillväxtpotential inte kommer att realiseras fullt ut på grund av exempelvis torkstress och skador. Därför bör resurser i minst lika hög grad tilldelas utvecklingen av ett mer varierat utbud av plantor där klimatanpassning och motståndskraft mot skador är i fokus. Syftet är att möjliggöra återbeskogning med en bredare trädslagspalette där kunskapen om trädens anpassningsförmåga utvecklats jämfört med idag. Det skulle även bidra till möjligheterna att åstadkomma en alltmer vässad ståndortsanpassning. Näraliggande exempel på inhemska trädslag som kan bidra med ökad variation och riskspridning är sibirisk lärk för norra Sverige och ek för södra delen av landet.

7.2.5 Begreppet vitalitet

Det är svårt att i skogsträdsförädlingens fältförsök mäta olika skador och erhålla statistiska skattningar av skador och tillväxtnedläggningar om frekvensen skador är låg, vilket ofta är fallet. Det kan dessutom vara svårt att fastställa orsaken till skador i fältförsök. Därför slås alla skador samman och den sammantagna skadenivån benämns vitalitet. Hög vitalitet innebär att trädet inte har några synliga skador vilket kan bero på att det inte utsatts för några skadegörare eller att det är motståndskraftigt. Det innebär inte att det är resistent mot någon särskild skadegörare. Hög vitalitet innebär inte heller exempelvis god konkurrensförmåga eller snabb tillväxt. En undertryckt planta kan således ha hög vitalitet samtidigt som ett frodvuxet träd kan ha nedsatt vitalitet. Samtidigt som begreppet vitalitet enligt denna definition är centralt inom skogsträdsförädlingen används det ofta i en vidare bemärkelse i andra sammanhang. Det är därför viktigt att dess betydelse kommuniceras till skogsägare, beslutsfattare, forskare och andra som intresserar sig för skogsträdsförädling.

7.3 Frö- och plantproduktion

Skogsfrö är en kommersiell produkt på en fri marknad där olika aktörer beslutar om sin produktion på kort och lång sikt. Exempel på sådana beslut är vilka frökällor som ska skördas ett visst år, och vilka fröplantager som behöver bevaras och anläggas för framtiden. Risken att skadegörare ökar i omfattning eller ändrar beteende i framtiden, liksom möjligheten att få tillgång till resistensförädlad material till nya frökällor bör ingå i planeringen. Ett exempel är törskate vars spridningsmönster övervakas och där resistensförädling i första hand väntas beröra de förädlingspopulationer som används inom de hårdast drabbade områdena. Men hur kommer utvecklingen att bli och hur tar man som fröproducent höjd för osäkerheten?

Antal fröplantager: Diversitet och riskspridning är viktiga begrepp i skogsbruket, och det bör gälla även fröproduktionen. Därför bör man undersöka möjligheterna att anlägga flera mindre fröplantager till en plantagezon i stället för en stor. På så sätt kan resistensförädling och andra förädlingsmål varieras mellan olika plantager beroende på tillgången på resistent kloner och behovet av skogsodlingsmaterial med specifika krav på resistens, hårdighet, tillväxt eller andra egenskaper. Dessutom sprider man risken för bakslag på flera plantager. Om det finns behov

av en mindre mängd frö med hög resistens skulle exempelvis en mindre växthusplantage med ett begränsat antal kloner med god resistens kunna anläggas. Detta skulle ge en begränsad mängd resistent frö med lägre genetisk diversitet vilket kan vara ett komplement till en traditionell öppen plantage med fler kloner, högre genetisk diversitet men lägre resistens.

Särplock och gallring: Alternativa vägar att uppnå särskilda syften eller egenskaper hos materialet såsom resistens eller hårdighet kan vara särplock eller genetisk gallring i syfte att öka det genetiska värdet i den skördade populationen. Dessa metoder förutsätter att särplockningen eller gallringen godkänds och registreras i rikslängden.

Utländska frökällor: Möjligheter att använda utländska frökällor för att uppnå högre diversitet eller för att nyttja resultaten från andra länders resistensförädling bör tas tillvara, givet att materialet är anpassat till växtplatsen. Ett exempel är de goda förutsättningar som finns att använda frö från finska tallplantager i Sverige norr om sextionde breddgraden.

7.4 Användning av skogsodlingsmaterial

7.4.1 Val av skogsodlingsmaterial

Utvecklingen mot ett mer varierat utbud av plantor av olika trädslag där det finns kunskap om anpassningsförmåga och motståndskraft mot skador i ett förändrat klimat bör främjas. Eftersom produktion av skogsodlingsmaterial i hög grad drivs av efterfrågan är skogsbrukets intresse för en bredare trädslagspalette avgörande för utvecklingen. Rådgivning och information har en viktig funktion att fylla för att öka detta intresse.

7.4.2 Ståndortsanpassning

Användningen av resistent skogsodlingsmaterial bör differentieras i förhållande till infektionstrycket eller den förväntade risken för angrepp utifrån rådande kunskapsläge. Det är viktigt att modeller som utvecklas för att hantera risker för skogsodlingsmaterial i olika klimatlägen eller ståndortsindex kommer till användning så att kloner eller fröplantagematerial som är mer resistent mot angrepp allokeras till högrisklägen. Verktyg för ståndortsanpassning med hög upplösning och med indata från exempelvis laserscanning, drönarinventering och skördarregistrering bör utvecklas och användas för detaljplanering av återbeskogningen. Detta blir också ett sätt att hushålla med resistent skogsodlingsmaterial och använda det där behoven är som störst.

Ett vidareutvecklat Plantval med högre geografisk upplösning av ståndort kan bli ett viktigt verktyg för att styra valet av skogsodlingsmaterial i kärva klimatlägen och därmed minska risken för allvarliga skador. Ett exempel kan vara att undvika skogsodlingsmaterial som är känsligt för snöbrott i snörika områden. Ett annat exempel är att förbättra anpassningen av material i nordsluttningar med ett lokalklimat där extra hårdighet krävs.

7.4.3 Beredskap och riskhantering

Mot bakgrund av osäkra prognoser om framtida klimat och skadegörare bör en övergripande strategi vara att försöka ta höjd för olika framtidsscenarioer. Det

innebär att använda olika typer av skogsodlingsmaterial och metoder inom exempelvis en brukningsenhet. Det kan gälla träslag, förädlingsgrad (oförädlad och förädlad material från olika frökällor), härkomst och resistensegenskaper, men också planttyp, skyddsbehandling och valet mellan plantering, sådd och naturlig föryngring. Det handlar till stor del om att balansera möjligheter och risker med det skogsodlingsmaterial och de metoder man väljer i förhållande till olika klimatscenarier.

7.4.4 Hyggesfria metoder

Alternativa brukningsformer som hyggesfritt skogsbruk kan framställas som oberoende av skogsplantering. Men olika typer av luckhuggning och succesiv avverkning kommer troligen att medföra behov av skogsodlingsmaterial. Plantering som komplement till den naturliga genpoolen som står för föryngringen i hyggesfritt skogsbruk kan vara ett sätt att sprida risker och förbättra anpassningen av skogen till snabba klimatförändringar.¹¹³

7.5 Uppföljning

Skogsägarnas benägenhet att använda resistensförädlad skogsodlingsmaterial kommer att påverkas av fördelarna på kort och lång sikt i förhållande till priset. Ökad kunskap och information om praktiska resultat i resistensförbättring och beståndsutveckling vid användning av resistensförädlade plantor kommer att vara viktigt för skogsägarnas förtroende för och intresse att använda materialet. Därför rekommenderas att oberoende parter följer upp effekterna av skadegörare och skogstillväxt i praktisk skogsodling och att resultaten görs tillgängliga för skogsbruk och skogsägare. Uppföljningen bör avse dels skogsträdsförädlingens generella effekter på materialets motståndskraft och tillväxt, dels den specifika resistensförädlingens effekter på motståndskraft och hälsotillstånd i skogen.

För att underlätta uppföljning av skogsodlingsmaterialets prestation och egenskaper i praktiken bör skogsägare dokumentera och arkivera uppgifter på beståndsnivå om vilket skogsodlingsmaterial som har använts. Detta görs exempelvis genom att spara materialets stambrevsnummer i beståndsregister, skogsbruksplan eller i någon webbaserad tjänst. Det finns även metoder att spåra trädens bakgrund genom DNA-prover och därigenom följa upp förädlingens effekter i praktiken.

7.6 Reglering

Samtidigt som problemen med skogsskador ökar får vi allt bättre kunskap om orsaker och skadegörare. Kunskapen om resistens och resistensförädling kommer likaså att öka. Det banar väg för att högre legala krav bör kunna ställas på att skogsodlingsmaterial uppvisar motståndskraft mot vissa skadegörare. Ett exempel på detta är ökad kunskap om tallens mottaglighet för törskate. Denna ökade kunskap bör kunna avspeglas i högre krav på resistens mot törskate i framtida skogsodlingsmaterial.

¹¹³ Gömöry, D. *et al.* (2021). Genetic aspects linked to production and use of forest reproductive material (FRM): Collecting scientific evidence for developing guidelines and decision support tools for effective FRM management. EUFORGEN. <https://www.euforgen.org/publications/publication/genetic-aspects-linked-to-production-and-use-of-forest-reproductive-material-frm/>.

Lagkrav syftar till att upprätthålla en miniminivå på skogsodlingsmaterialets standard. I praktiken bör dock utvecklingen drivas av forskningsframsteg och efterföljande förädling, samt av skogsbrukets efterfrågan.

7.7 Övergripande inriktning

Efter en lång epok med stadigt ökad tillväxt i den svenska skogen har tillväxten under senare år gått ner vilket leder till eftertanke. Att tillväxten överstiger avverkningen har varit en norm och av många setts som en garant för ett långsiktigt hållbart skogsbruk. Även om orsakerna bakom nedgången inte är helt klarlagda finns anledning att peka ut torka och skadegörare som viktiga element. Resistensförädling mot skadegörare bör därför ses som ett av flera verktyg för att bromsa utvecklingen och minska riskerna för ytterligare tillväxtminskningar.

Olika samhällsintressen utöver virkesproduktion för skogsindustrins behov behöver vägas in i framtida skogsträds- och resistensförädling. Det handlar om andra ekonomiska värden men även om ekologisk och social hållbarhet. Utvecklingen av skogstillståndet i Sverige påverkar exempelvis hur väl Sverige uppfyller internationella åtaganden om biologisk mångfald och kolinbindning. Genom att dra nytta av internationella erfarenheter där resistensförädling redan används för att fylla olika ekonomiska, ekologiska och sociala behov kommer resistensförädlingen tillsammans med andra verktyg att kunna leverera skogsodlingsmaterial som i allt högre grad svarar upp mot många av de behov som identifierats i denna rapport.

Vägledning för resistensprogram

En övergripande ram för att vägleda beslut i resistensprogram har beskrivits av Woodcock *et al.* (2018)¹¹⁴. Vägledningen omfattar sex steg där varje steg beskriver ett antal centrala aspekter, utvärderar olika alternativ och identifierar överväganden och risker. Alla dessa steg är möjligen inte relevanta för resistensprogram i Sverige, men visar på helheten och komplexiteten i frågan.

Steg 1: Initialt beskriver man dels ”systemet” för värdträd och skadegörare, dels syftet med ett resistensprogram

- *Beskriva skadeinsekten* eller patogenen: Här beskriver man skadegörarens spridningshastighet, virulens och geografiska utbredningsområde. Det påverkar exempelvis behovet av resistent material som krävs och vilka förutsättningar som finns för att utveckla ett resistensprogram. Man behöver även beakta skadegörarens kapacitet att övervinna trädens resistens. Denna risk är generellt störst för sexuellt reproducerande skadegörare.
- *Definiera mål och begränsningar med resistensprogrammet*: Detta påverkar valet av metoder för att identifiera, utveckla och använda resistent träd. Även stadiet och svårighetsgraden av utbrottet samt tillgängliga resurser påverkar metodval. De beslut man tar kring när, var och varför resistent material är tänkt att användas och vilka resurser som finns tillgängliga behöver ske i samverkan med berörda aktörer.
- *Överväga andra strategier för att mildra effekterna av skadegöraren*: Resistensprogrammets lämplighet varierar och bör vara ett komplement till andra strategier. Mest effektiva är resistensprogram som kompletteras med insatser för att mildra effekten av skadegöraren, exempelvis att kontrollera skadegöraren och hantera skadade träd. En alternativ och kanske billigare och snabbare strategi än resistensprogram är att använda andra trädslag vilket samtidigt kan främja skogens resiliens mot framtida hot och gynna den biologiska mångfalden. Ytterligare en strategi är att försöka begränsa utbrottets spridning genom att exempelvis röja drabbade träd. Detta är mest effektivt i ett tidigt stadium av utbrottet, men kan vara svårt i de fall skadegöraren har flera värdträd.

Steg 2: Undersöka resistensen i naturliga populationer, eller inom förädlingsmaterialet om ett sådant finns

- *Undersöka frekvens, grad, ärftlighet och hållbarhet av resistens*: Detta är centrala faktorer i ett resistensprogram. Det är viktigt att känna till avvägningar (trade offs) mellan resistens och andra

¹¹⁴ Woodcock, P., Cottrell, J.E., Buggs, R.J.A., Quine, C.P. (2018). Mitigating pest and pathogen impacts using resistant trees: a framework and overview to inform development and deployment in Europe and North America. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 91:1, 1–16. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx031> .

anpassningsegenskaper som tillväxt och mottaglighet för abiotiska eller andra biotiska hot.

- *Undersöka skadedrabbade populationer:* Genom att söka efter friska träd i skadedrabbade områden kan man identifiera individer som troligen är resistenta och robusta mot lokala påfrestningar i miljön. Hur effektiv undersökningen är beror bland annat på trädets genetiska variation i det undersökta området samt hur väl den representerar populationen i stort. Fältundersökningar för att hitta resistenta träd är generellt sett mest tillförlitliga där mottagliga träd uppvisar tydliga skador.
- *Använda försöksplanteringar:* Syftet är att söka efter resistens och/eller att validera att träd är resistenta. Man kan fastställa resistens genom att plantera försöksmaterial i områden med ett högt tryck av skadegöraren och mäta resistensen över tid. Det är en fördel med spårbarhet mellan resistenta träd i försöksplanteringen och föräldraträden. Variation i tidpunkten för ett angrepp och dess svårighetsgrad kan försvåra fältförsök för att testa resistens. Därför används ibland en mer aktiv screening exempelvis genom att inokulera trädet med patogenen.
- *Utföra genetisk screening:* Att screena med molekylära markörer som är associerade med resistens blir allt viktigare för att hitta och validera resistenta träd. Screeningen testas bäst i kombination med mer konventionella metoder som att identifiera potentiellt resistenta individer i försöksplanteringar eller genom att validera fältundersökningar. Genetisk testning med markörer kan endast utföras om man först har stora mängder fenotypisk information kombinerat med genetisk information att identifiera och validera markörer/modeller från.
- *Undersöka resistensen hos besläktade arter:* Besläktade trädslag kan variera stort i hur mottagliga de är för en specifik skadegörare. Genom att i försöksplanteringar undersöka trädslag inom samma släkte som den sjukdomsdrabbade arten kan man få en ökad kunskap exempelvis om mekanismerna för resistensen. Det kan indikera hur genomförbart ett resistensprogram är och hur möjligheten ser ut att ta fram hybrider mellan den skadedrabbade arten och närbesläktade arter.
- *Beakta resistensens ärftlighet:* Den fenotypiska resistensen beror av genetiska egenskaper och miljöeffekter. I vilken utsträckning fenotypisk resistens är ärftlig är avgörande för att ett resistensprogram ska gå att genomföra och vara framgångsrikt. Variationen inom en art för vilken effekt skadegöraren har är ofta ärftlig. Likaså innebär samspelet mellan genotyp och miljö att trädets näringsmässiga status eller torkstress i hög grad kan påverka uttrycket av en resistent fenotyp, även om resistensen har hög ärvbarhet (heritabilitet). Provenienser som visar tydlig resistens mot en skadegörare på en plats kan vara mer mottagliga om de planteras i områden där miljön är mer stressande för träden.

Steg 3: Strategi för att utveckla resistenta träd

Hur effektiva och genomförbara olika alternativ är för att utveckla resistenta träd beror på den information man samlat in i stegen 1 och 2. Vid val av strategi bör man särskilt ta hänsyn till genomförbarheten utifrån begränsningar i tid och ekonomi, skadegörarens spridningshastighet och virulens, frekvens och typ av resistens hos de drabbade trädslaget och närbesläktade arter samt acceptansen att plantera materialet. Nedan framgår olika alternativ för att utveckla resistenta träd.

- *Förlita sig på naturliga processer och skötsel av naturliga populationer:* Naturliga processer sker snabbast när träd har en hög dödlighet, selektionstrycket är högt och populationen har en hög anpassningsförmåga. Strategin är ett viktigt alternativ för att mildra effekter på kort och medellång sikt av skadegörare med snabb och vidsträckt spridning och vid begränsade resurser. Effektiviteten av det naturliga urvalet minskar om man avverkar resistenta träd för att försöka begränsa utbrottet. Genom att skapa luckor för föryngring i skadedrabbade skogar kan man främja det naturliga urvalet.
- *Klassisk förädling för att selektera resistenta individer (för olika urvalsstrategier, se avsnitt 3.4.3):* Strategin är lämplig när skadedrabbade trädslag visar en låg till måttlig frekvens av ärftlig resistens. Att utveckla resistenta träd innebär ofta kompromisser mellan flera prioriteringar. Några exempel är att mildra skadegörarens påverkan på träden, utveckla en effektiv resistens, behålla trädens anpassningsförmåga och se till att resistent material planteras på rätt plats.
- *Genetiska markörer och genomisk selektion:* Klassisk förädling använder allt oftare olika genomiska tekniker för att förstå den genetiska bakgrunden till resistens. Med Marker Assisted Selection (MAS) och genomisk selektion kan man prediktera unga plantors resistensnivåer. MAS kan effektivisera förädlingen men det är ofta en utmaning att identifiera enskilda markörer som är stabilt associerade med resistens, särskilt om flera gener med små individuella effekter är inblandade. Vid genomisk selektion (avsnitt 3.4.7.1) används tusentals genetiska markörer, vanligen Single Neutral Polymorphism (SNP) som är en punktmutation av ett enstaka baspar i DNA-sekvensen.

Steg 4: Föröka resistent material för odling

- *Förökning i fröplantager som byggts upp av fröplantor med utvalda föräldrar:* Träden i denna typ av fröplantager har initialt mer variation i resistens än föräldrarna på grund av rekombination mellan föräldrarnas genom, där mindre resistenta individer sedan selekteras bort. Ett starkt urval leder till mer resistenta och genetiskt enhetliga avkommor. Det kan vara gynnsamt kommersiellt, men ökar samtidigt risken både för att skadegöraren utvecklas för att övervinna resistensen och att trädens anpassningsförmåga minskar i förhållande till andra hot.

- *Förökning i plantager som byggts upp av utvalda kloner:* Denna typ av plantager innehåller individer av utvalda genotyper vilka är förökade genom vegetativa tekniker. Den genetiska variationen i klonplantagen beror bland annat på antalet kloner. Antalet kloner är en balans mellan att säkra en större vinst genom att endast använda de mest resistenta klonerna och att behålla genetisk variation i andra egenskaper. Empirisk och teoretisk forskning har föreslagit att 20–50 kloner behövs för förädlingen i allmänhet, inte specifikt för resistens, för att uppfylla båda dessa mål. Hur väl förädlingen lyckas med vegetativt förökat material varierar både mellan och inom trädslag. Tekniker som somatisk embryogenes kräver stora investeringar, vilket kan begränsa dess användning i resistensprogram med begränsade resurser.

Steg 5: Använda det resistenta materialet

- *Naturliga processer och skötsel av naturliga populationer:* Om resistensstrategin är avhängig av att det resistenta materialet sprids av sig själv krävs god föryngring och en tillräcklig konnektivitet mellan populationer. Beroende på resistensens omfattning kan denna strategi vara tillräckligt effektiv och ske till en låg kostnad. Skadorna kan dock breda ut sig snabbare än nya resistenta träd hinner spridas och etableras, varför även en aktiv spridning av resistent material kan bli nödvändig.
- *Riktad eller mer godtycklig användning.* Användningen av ett resistent odlingsmaterial kan riktas till vissa geografiska områden eller användare för att kunna maximera fördelarna. Det kan även användas mer godtyckligt. Det senare kan vara lämpligt om odlingsmaterialet är förhållandevis billigt, utbudet är stort och om eventuella bakslag i odlingen har relativt begränsade konsekvenser för exempelvis virkesproduktion eller biologisk mångfald. Om materialet däremot är kostsamt, utbudet är begränsat, eller om eventuella bakslag får större negativa konsekvenser kan en mer målinriktad och planerad användning vara lämplig. Genom en riktad användning till lämpliga områden får man störst utdelning av materialet. Andra fördelar är att man kan undvika att plantera stora mängder genetiskt liknande material inom samma område, underlätta genflödet av resistenta träd och minska effekter av fragmentering av andra organismer.

Steg 6: Följa upp odlingen av resistenta träd

Det är viktigt att följa upp resistenta genotyper i skogsodlingen med avseende på exempelvis tillväxt, överlevnad och mortalitet. På så sätt kan man både mildra hot mot träden och förbättra resistensprogrammet. Information om skador och mortalitet hos individer av samma trädslag som inte är resistenta kan ge en slags standard för att utvärdera hur resistenta träd presterar. Informationen bör helst också omfatta data om det tryck som skadegöraren utövar på träden.