

Härdighet hos tallplantageskördar över tid i ett föränderligt klimat.

Projekt_ID: 20-443

English summary

Scots pine seed orchards are heavily influenced by external pollen contamination, particularly at a young age. Depending on the wind conditions during flowering in these orchards pollen of different phenological adaptation contribute to the harvest. This affects the suitability of the seeds to be used in reforestation of the orchards planned deployment area. The ongoing climate change is also influencing spring and flower phenology and at a higher rate with increasing latitudes. There is therefore a risk that female flowers at higher latitudes flower much earlier and are receptive to very southern pollen. Correct autumn phenology is paramount in Scots pine, which otherwise suffer frost damage in the fall. A monitoring system of seed orchard crops for northern Scots pine seed orchards was therefore initiated by the industry and Skogforsk in the 1980s. Skogforsk has monitored hardiness in northern pine seed-orchard crops for over 35-years through systematic autumn frost hardiness investigation using climate chambers. The main goal has been to assist the seed orchard owners to validate the quality of the crops and to provide regional recommendations for crop use depending on site climate. The freeze tests compare seed orchard crops with natural stands of known latitudinal origin to verify that the crops express their expected autumn frost tolerance. Data from the continuously performed investigations has created a unique material that can clarify how environmental and silvicultural factors influence seed-crop hardiness over time and space. Our aim of the project was to explore if we can improve our analysis of individual freeze tests and answer the following questions:

- What impact does the age of orchards and silvicultural practices have on the hardiness of seed-crops?
- Does the influx of more southern pollen increase with time?

Each freezing test is a comparison between stand seedlings with known latitudinal origin as reference and seedlings from seed orchard crops. The reference regression of stand seedlings damage levels as a function of their latitudinal origin has previously been done by linear regression. Here we fit a sigmoidal curve instead, which has a better fit with the data. A linear regression could potentially underestimate the hardiness of seed orchards of mid latitudinal origin and overestimate the hardiness for those at the two extremes. We see large variation in hardiness among the seed orchard crops across years, but no discernable trend. We also see that in earlier freeze-tests the northern most seed orchard had more damage than expected compared to the southern orchards while we saw the opposite in the most recent freeze test. This could indicate that more southern pollen is influencing orchards of southern Norrland reducing their autumn frost tolerance.

Svensk sammanfattning

Vildpollen har stor inverkan på skördarna från fröodlingar med tall, särskilt i unga plantager. Beroende på vindförhållandena under blomningen i dessa fröodlingar bidrar pollen med olika fenologisk anpassning till skörden. Detta påverkar fröernas lämplighet för användning vid återbeskogning av de områden som fröodlingen är planerad för. Den pågående klimatförändringen

påverkar också vårens och blomningens fenologi, särskilt med ökande latitud. Det finns därför en risk att honblommor vid högre latituder blommar tidigare och är mottagliga för pollen med mer sydlig härkomst. Korrekt höstfenologi är avgörande för tall, som annars riskerar frostsador med försämrade tillväxt och svampangrepp som följd. Ett övervakningssystem av skördar från tallfröplantager i norra Sverige initierades därför av industrin och Skogforsk på 1980-talet. Skogforsk har övervakat hårdighet hos tallfröplantager i norr i över 35 år genom systematiska undersökningar av höstfrosthållighet med hjälp av klimatkammare. Det främsta målet har varit att hjälpa ägarna av tallfröplantager att validera fröplantors kvalitet och ge regionala rekommendationer för användning beroende på plantornas hårdighet. Frystesterna jämför tallfröplantager med naturliga bestånd av känt latitudursprung för att verifiera att skördarna har sin förväntade höstfrosthållighet. Data från de kontinuerligt utförda undersökningarna har skapat ett unikt material som kan klargöra hur miljö och skötsel av fröodlingarna påverkar skördarnas hårdighet över tid och rum. Vårt mål med projektet var att utforska om vi kan förbättra vår analys av individuella frystester och besvara följande frågor:

- Vilken inverkan har plantageålder och skötselplan på fröskördens hårdighet?
- Har det inkorsande pollenet genom åren fått ett allt sydligare ursprung?

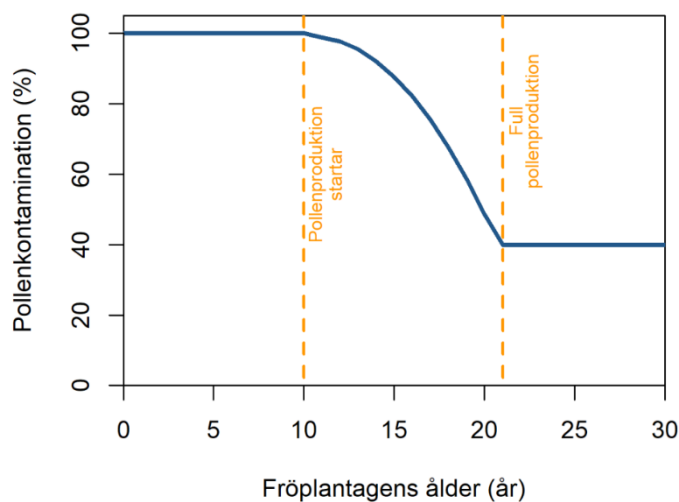
Varje frystest är en jämförelse mellan plantor med känt latitudursprung som referens och plantor från tallfröplantager. Referensregressionen för skadegrad hos plantor som funktion av deras latitudursprung har tidigare gjorts med linjär regression. Här anpassar vi i stället en sigmoid kurva, vilket ger en bättre passform till skadegraden. En linjär regression kan potentiellt underskatta hårdigheten hos fröodlingar med medel latitudursprung och överskatta hårdigheten för de som befinner sig vid de två ytterligheterna. Vi ser stor variation i hårdighet mellan frystest hos tallfröodlingar över åren, men ingen tydlig trend. Vi kan inte se någon effekt av plantageålder annat än att unga sydförflyttade fröodlingar ibland har en försämrade hårdighet jämfört mot förväntad. Vi observerar också att i tidigare frystester hade nordliga tallfröplantagen mer skador än förväntat jämfört med de södra, medan vi såg motsatsen i det senaste frystesten. Detta kan tyda på att allt sydligare pollen påverkar plantager i södra Norrland och minskar deras höstfrosthållighet.

Bakgrund

Skogsindustrin är beroende av pålitliga frökällor för att kunna återbeskoga den produktiva skogsmark som brukas. Fröodlingar har fördelen att de producerar stora välmatade frön vilket ger plantan en bra start. Fröodlingar är i dagsläget den mest betydelsefulla och ekonomiska lösningen för att kunna överföra de genetiska vinster som skapas i skogsträdens förädlingsprogram till skogsbruket. De första fröodlingarna etablerades i slutet på 1940-talet, och den första tallfröodlingen var Drögsnäs 1949. Många av de första tallfröodlingarna med nordligt material sydförflyttades för att på så sätt stimulera blomning och säkerställa fröomognad. Tanken var också att materialet skulle uppvisa en annan blomningsfenologi och på så sätt separeras från lokalt material och då minska inkorsningen av vildpollen (Koski, 1987). Det har senare visats sig ha väldigt liten effekt på andelen inkorsning med vildpollen hos tall (Heuchel *et al.*, 2022). Sydförflyttningen skapade i sin tur ett visst dilemma då inkorsande lokalt vildpollen har en betydligt sydligare härkomst än materialet i fröodlingen. Det resulterar av skörden kunde ha lägre hårdighet än vad som krävs för deras avsedda planteringszon (Aho, 1994; Hall *et al.*, 2023). Finland hade samma tankegångar kring sydförflyttning med sina äldre fröodlingar men tog strategin än längre, vilket har resulterat i fler sydförflyttade fröodlingar än vi har i Sverige, och i vissa fall än extremare (Wu *et al.*, 2023).

Den förhärskande vindriktning i Sverige är västlig till sydvästlig även om vindar längs ostkusten kan var ostliga till nordostliga, särskilt i älvarnas dalgångar (SMHI). Det gör att vildpollen kan ha olika härkomstlatitud år från år, vilket tillsammans med inkorsningsgraden påverkar enstaka skördars hårdighet i olika grad.

De snabba klimatförändringar som skett under de senaste decennierna har haft en större effekt vid nordligare breddgrader än globalt (Post *et al.*, 2018; Rantanen *et al.*, 2022). Det betyder att skillnaden i tidpunkt för den fenologiska våren, när antalet dygnsgrader når tröskelvärdet för blomning, troligen krympt mer vid allt nordligare breddgrader. Resultatet av detta blir då att honblommor i norr är mottagliga för allt sydligare pollenmoln, vilket om så sker reducerar hårdigheten hos fröskördar med mycket inkorsande vildpollen. Pollenproduktionen i fröodlingar med tall kommer i gång senare efter anläggning än honblomningen, vilket betyder att skördar från unga plantager får ett förhållandevis stort vildpollenbidrag. Bidraget från vildpollen förväntas minska allt eftersom fröodlingen blir äldre, till en nivå kring 40% (se figur 1). Bidraget förväntas dock variera från år till år som ett resultat av varierande väder- och vindförhållanden och lokala avvikelser i klimatet under blomning.



Figur 1. Den antagna tidstrenden för pollenkontamination (inkorsning) med stigande ålder i en fröplantage för tall. Tidpunkten för pollen-produktionens start är här satt till det brukliga tio år (första orangefärgade streckade linjen) men tidpunkten kan justeras om observationer från fröplantagen stödjer detta.

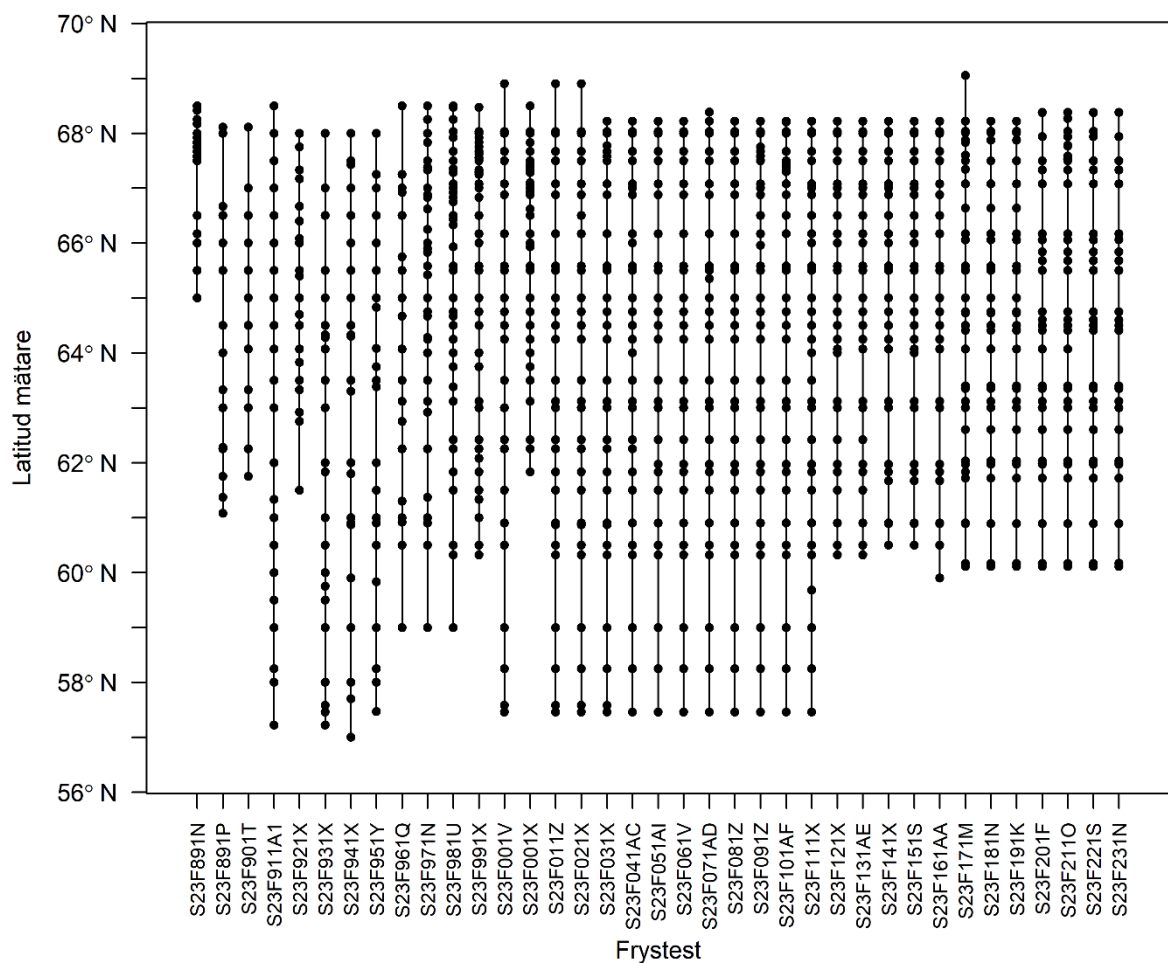
Figur från Hallingbäck *et al.* (2023).

För att kontrollera att det inte planteras ut material som inte når upp till förväntad hårdighet initierades systematiska frystest av fröskördar från framför allt fröodlingar i norra Sverige på uppdrag av industrin under 1980-talet. I dag har alltså Skogforsk med hjälp av frystestundersökningar i klimatkammare övervakat hårdigheten hos fröskördar från tallplantager i norra Sverige i drygt 35 år. Den långa obrutna tidserien av rutinmässiga frystester har skapat ett unikt material. Givet de rapporterade förändringar i klimatet som observerats är förväntningarna att det påverkar fröskördarna så att de generellt blir mindre hårdiga, men till olika grad beroende på materialets ursprung och fröodlingens skötsel. Vi förväntar oss generellt en lägre hårdighet hos unga sydförflyttade fröodlingar och en ytterligare försämrad hårdighet oberoende av plantagelokalens läge om pollineringen skett med sydligt vildpollen. Vi förväntar oss också att äldre fröodlingar kan bli allt mindre hårdiga över tid, då vildpollinering kan ske med allt sydligare pollen som ett resultat av proportionellt snabbare klimatförändringen vid högre latitud. De här hypoteserna interagerar dessutom med plantageskötsel, där gallring kan leda till att fröodlingen får en lägre pollenproduktion/ha och att friställningen leder till större exponering av vildpollen. Sammanfattat kan vi ställa två frågor som vi hoppas att insamlad data kan svara på.

- Vilken inverkan har plantageålder och skötselplan på fröskördens hårdighet?
- Har det inkorsande pollenet genom åren fått ett allt sydligare ursprung?

Vidare förväntar vi oss att hitta en mer korrekt analysmetod som bättre fångar relationen mellan den skattade skadegraden hos fröpartier från bestånd och fröodlingar och deras härkomstlatitud. Analyserna har rutinmässigt använt en linjär regressionsmodell, vilket ger en god skattning av fröpartiars skadegrad. Men vinkeln på solinstrålningen avtar snabbare (så även tillväxtsäsongens längd) med ökad latitudgrad pga. jordens krökning, även om den krökningen i det här fallet endast rör sig om ca 10° (Fig. 2). Rent teoretiskt borde då skadegraden minska snabbare med allt högre latitudursprung. Invintringen är dessutom en fysiologisk process som inte förväntas ha en linjär utveckling och sådana processer följer ofta en sigmoid kurva (Nilsson, 2001; Andersson Gull *et al.*, 2018; Man *et al.*, 2021).

Rapporten grundar sig på plantagematerial som ingått i Skogforsks rutinmässiga frystester genomförda mellan åren 1989 – 2024. Bland de fröplantager som ingår i projektet påträffas majoriteten av första och andra omgången norrländska tallfröplantager men även tidiga skördar från tredje plantageomgången. Materialet i studien täcker en mängd olika faktorer som vi förväntar oss påverkar hårdigheten hos skördar från tallfröodlingar. Kan vi förstå effekten av dessa skulle det ge förbättrade rekommendationer vad gäller skötselrutiner och fröpartiernas användning. Vidare kommer resultaten att vara vägledande vid lokalisering av nästa generations fröplantager (FyrO).



Figur 2. Latitudursprung hos beståndsmätare som använts under de olika frystesterna. Notera att det gjordes två frystest under 1989 och 2000 (S23F891N och S23F001X är endast test av beståndsmaterial).

Material och Metod

Ingående material i studien är 37 frystester av beståndfrö- och skördar från tallfröodlingar i framför allt norra Sverige. I de 37 frystester som analyserats från 1989 till 2023 ingick 501 beståndsmätare totalt, varav 66 användes mer systematiskt för att beskriva en referenskurva för frysskadegrad i förhållande till härkomstlatitud (se figur 2). Genom att samtidigt ta med fröplantor från fröodlingsskördar kan dessa jämföras mot beståndsmätare och skördarnas skadegrad är då direkt relaterad till deras invintringsgrad och hårdighet. Totalt ingår 208 857 frystestade fröplantor i rapporten, från svenska, ryska och finska ortsegna bestånd samt 70 olika svenska och finska fröodlingar (se vilka skördar i fröodlingarna som ingår i appendixfigur S1)

Frystest.

Protokollet för frystesten har utvecklats över tid och till viss del tillsammans med finska kollegor, och har beskrivits i flera tidigare publikationer t.ex (Andersson, 1992; Andersson and Fedorkov, 2004; Persson *et al.*, 2010; Lehtinen and Pulkkinen, 2017). Plantorna såddes i ogödslad torv och groningen skedde vid +20°C i ett mörkt växthus. Under de efterföljande 10 veckorna med 20 timmar dag med +20°C och 4 timmar natt med +15°C. Från och med vecka 11 så utökades nattlängden med 1 timma i veckan med +15°C under dag och +5°C under natten för att plantorna skulle påbörja invintring. När nattlängden nått 10 timmar utsattes de första replikaten för frystemperaturer. Längden på plantornas tillväxtperiod modifierades inför frystest S23F181N då det hade noterats att ökad tillväxt hos plantor från nyare odlingar resulterade i att barrmassan blev så tät att plantorna blev mindre exponerade för köldgrader. Lösningen blev att korta ner tillväxtperioden från 10 till 8 veckor. Innan plantorna exponerades för minusgrader kontrollerades kassetterna så att varje fack enbart hade en planta (orsakade av flerkornssådd). Om flera plantor hade grott sparades bara den mest centrerade plantan. Kassetter med fröplantor placerades i en fryskammare som till en början hade en temperatur på +10°C och därefter sänktes temperaturen med 4°C i timmen till den slutliga temperaturen -15 till -10°C beroende på replikat och frystest. Den slutliga temperaturen bibehölls sedan i två timmar innan uppvärmning med 5°C i timmen påbörjades. Plantorna hölls i mörker under hela tiden de befann sig i fryskammaren. Efter frysning ställdes plantorna tillbaka i växthuset där de fick stå i en till två veckor, då frysskador blev synliga. Varje planta exponerades bara en gång för frysgrader, däremot så fanns alla fröodlingar och beståndsmätare i ett specifikt frystest med i varje replikat. Frysningarna repeteras sedan under c:a 4 veckors tid då invintringsgraden hos allt material kontinuerligt ökar. Skadegraden på varje planta skattades sedan på en sju gradig skala (0-6) där 0 innebär att det inte förekommer någon missfärgning av barren; 1, 1-20 % av barren har blivit bruna; 2, 20-40 %; 3, 40-60%; 4, 60-80%; 5, 80-99% och 6 när plantan är helt brun/död. Ett lågt värde betyder alltså lite skada och hög tolerans för frysgrader vilket i sin tur speglar materialets hårdighet och grad av invintring.

Datakurering

En stor del av projektiden har ägnats åt att kontrollera, sammanställa och digitalisera all data som samlats in genom åren samt föra in saknade uppgifter i Skogforsks databassystem, Fritid.

Statistisk analys

Då skadegraden från frystesten är kategorisk och kan endast anta de rankade värdena 0,1,2,3,4,5 & 6, använde vi ordinal regression (McCullagh, 1980) för transformering. Ordinal regression är en av många befintliga metoder för generalisering av vanliga linjära modeller. Med antaganden kring hur fördelningen av svarsvariabeln (den beroende variabeln), i detta fall skadegraden, ser ut byggs en

funktionslänk som omvandlar den observerade variabeln till att kunna beskrivas linjärt av oberoende variabler.

Analysen av data skedde i tre steg. I första steget transformerades registrerad skadegrad inom respektive frystest i en ordinal regressionsanalys. De oberoende variabler som användes vid den första analysen av frystesterna var fröparti från bestånd och fröodlingar som en faktor, upprepning eller frysomgång (som kan översättas till hur länge plantorna har tillåtits invintra) och position i odlingskassetterna (då det finns misstanke om att kantplantor exponerats för mer kyla). Därefter skattades marginalmedelvärdena för varje fröparti, vilket är en skattning av skadegraden hos varje fröparti givet de andra variablerna i modellen är samma för varje fröparti.

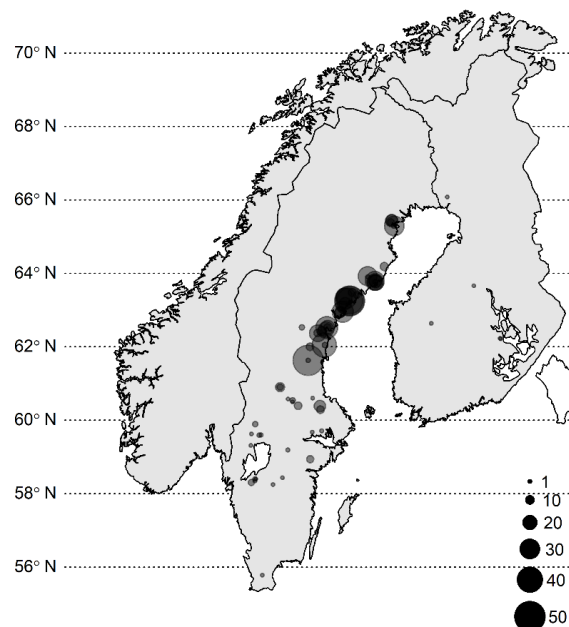
Steg två i analysen var att anpassa en regressionslinje mot beståndsmätarnas skadegrad som en funktion av deras härkomstslatitud. Här nyttjade vi en sigmoid-regression i form av en fyra-parameters Weibull-funktion (figur 3) enligt:

$$f(x) = c + (d - c) \exp\left(-\exp\left(b(\log(x) - \log(e))\right)\right)$$

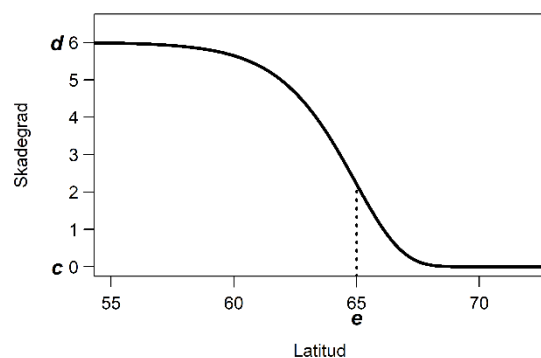
Där c är det lägsta och d det högsta värdet, och e den punkt där lutningen är som brantast och b beskriver hur kurvan avtar. Vi lät alla parametrar variera för bästa anpassning av kurvan till befintliga beståndsmätare. Därefter beräknades den faktiska avvikelser hos skördarna baserat på deras avstånd från kurvan (residual), givet deras förväntade härkomstslatitud. Vi anpassade även en kurva för fröodlingarna där vi använde förväntad härkomstslatitud givet klonernas ursprung och en inkorsning på 40% av lokalt vildpollen. Den senare användes för att jämföra hur väl generellt den förväntade skadegraden hos fröskördarna överensstämde med den uppmätta inom varje frystest. Stämmer den förväntade härkomstslatituden borde kurvan som var anpassad efter fröodlingarna ligga på kurvan från beståndsmätarna. Vi anpassade även separata kurvor för både ryskt och finskt material om de ingick i studien.

I steg tre undersöktes de faktorer som vi misstänker borde ligga bakom fröskördars avvikelser (residualer) från deras förväntade

Frystestade tallfröodlingar



Figur 2. Fröodlingarnas lokalisering och antalet analyserade fröpartier hos de i studien ingående fröodlingarna. Cirklarnas storlek beskriver antalet analyserade fröpartier från respektive fröodling, där Våge har flest med 57 analyserade fröpartier.

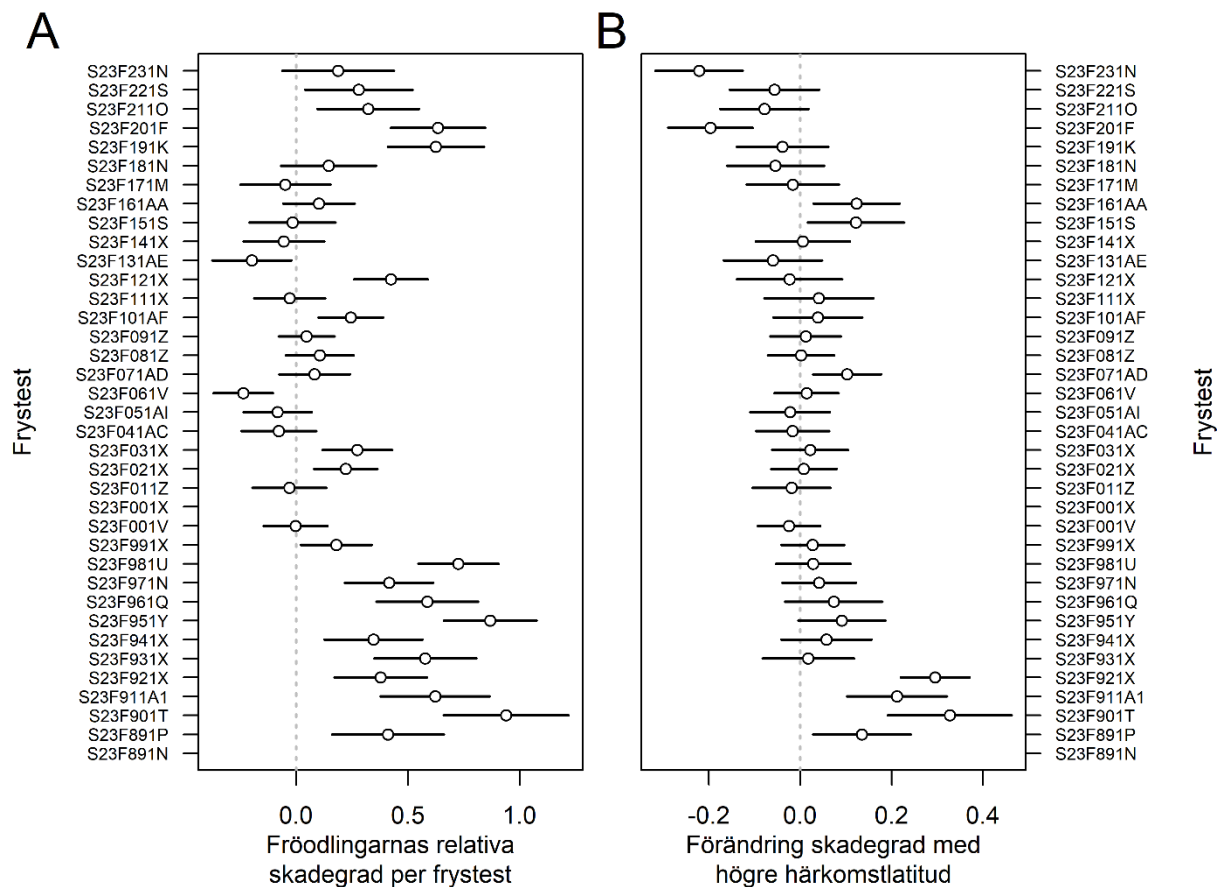


Figur 3. Beskrivning av hur kurvan som anpassa till beståndsmätarnas skadegrad ser ut. c beskriver det lägsta värdet och d det högsta värdet funktionen kan ta, och e där lutningen är som brantast.

hårdighet. I detta steg undersökte vi om plantageålder, sydförflyttning eller skördeår har någon effekt. Residualerna från analysen i steg två används som beroende variabeln, vilket alltså representerar den genomsnittliga avvikelsen ett fröparti har från den skattade regressionsmodellen inom varje frystest. Vi testade också om senare insamlat beståndsmaterial har en förändrad skadegrad jämfört med äldre materialet med liknande latitudursprung, som en extra koll om det skett någon förändring hos referensmaterialet.

Resultat och diskussion

Vi såg en stor variation i hur skadegraden hos skördar från fröodlingar förhölls sig till mätarnas motsvarighet. När vi modellerar hur mycket skadegraden för fröpartier från svenska fröodlingar skiljer sig från kurvan baserad på beståndsfrö noterade vi stora avvikelser mellan frystestomgångarna (figur 4A). Även när vi i modellen tar hänsyn till sydförflyttning (vilket generellt ger en något ökad skadegrad), fröodlingens ålder vid skörd, skördeår och fröodlingslokal förklarar modellen upp till 51% av variationen vi ser. Den återstående andelen ej förklarad variation betyder att det finns kvar viktiga komponenter hos fröodlingarna som påverkar hårdigheten som vi inte identifierat.

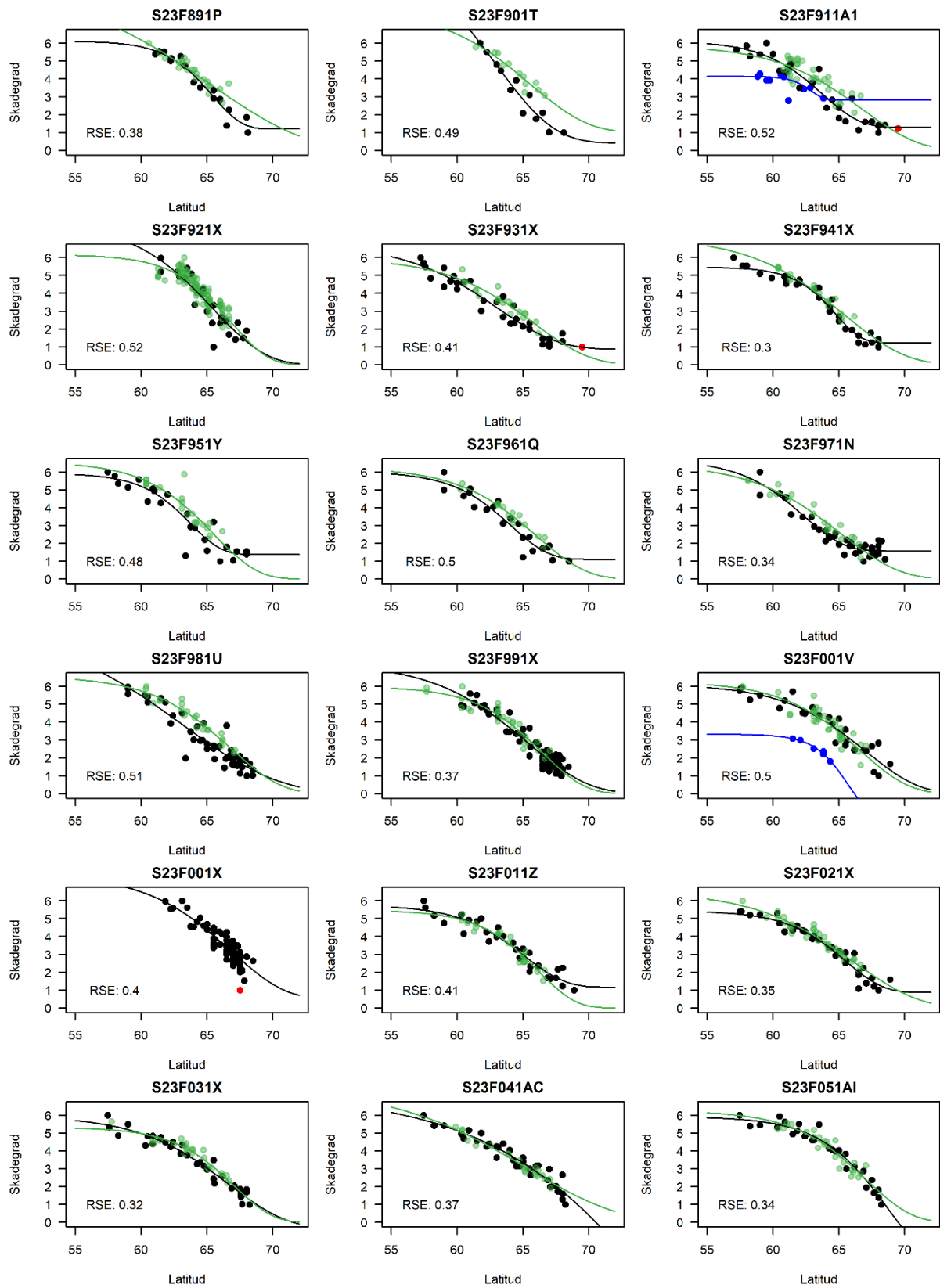


Figur 4. Skillnader mellan skadegraden hos skördarna i fröodlingarna jämfört med beståndsmätare (0-linjen) för varje frystest. **A)** Fröodlingarna hårdighet relativt beståndsmätarna hårdighet inom varje frystest. Positiva värden betyder att fröodlingarna i detta frystest är mer skadade än förväntat och tvärtom med negativa värden. **B)** Förändring i skadegrad hos fröodlingarna med ökad latitud relativt beståndsmätarna. I tidiga frystest var skadegraden högre ju längre norrut fröodlingen låg jämfört med beståndsmätare på samma latitud. I senare frystest 2020 och 2023 hade däremot sydligare fröodlingar en högre skadegrad än motsvarande beståndsmätare.

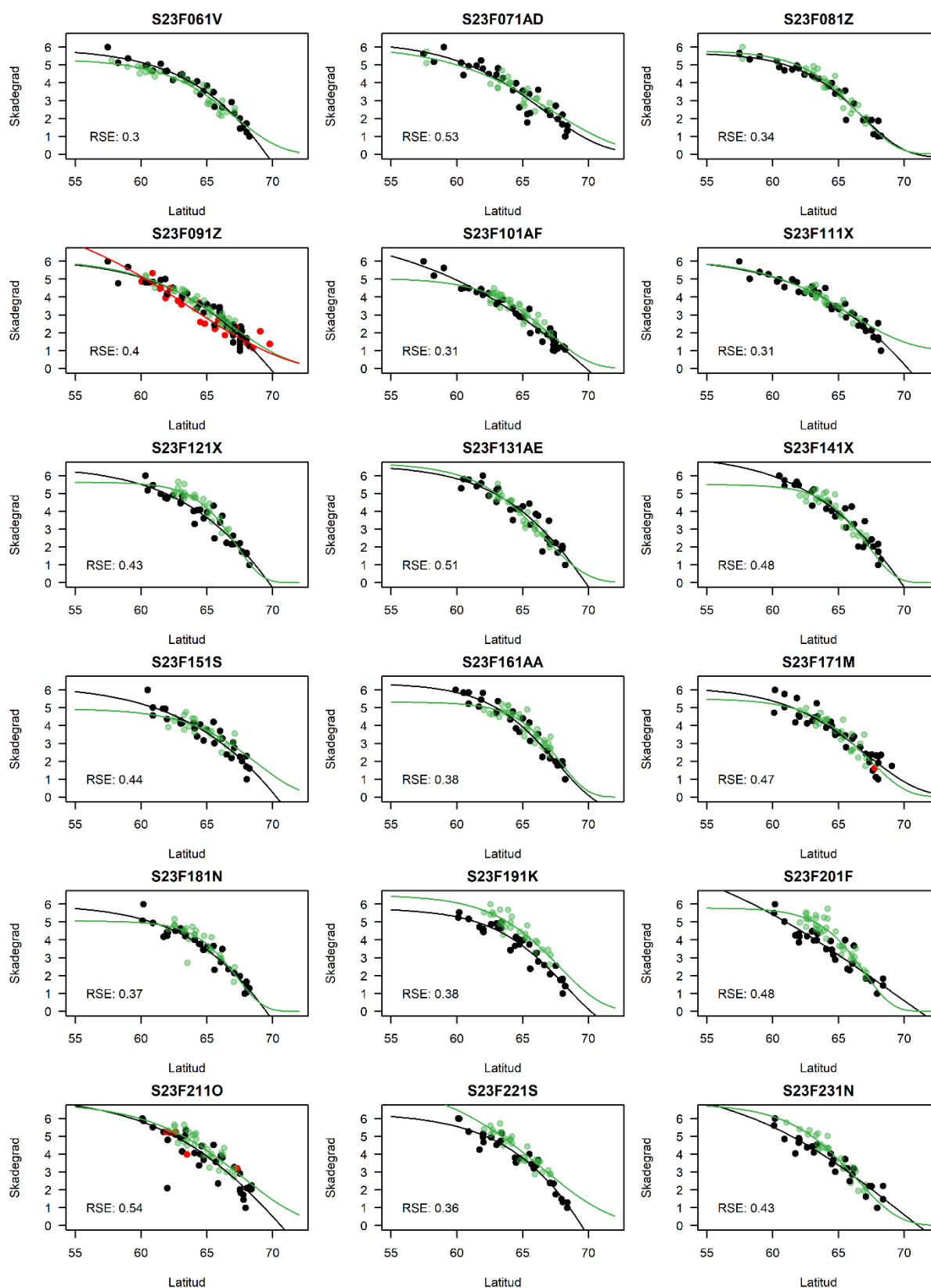
I figur 4 ser vi också att fram till 1999 (frystest S23F991X) är det stora avvikelser mellan år i fröodlingarnas hårdighet relativt beståndsmätarna, medan från 2000 och framåt är det mer gradvisa skillnader mellan år. En fråga vi skulle vilja svara på är om dessa skillnader beror på pollenmolnets ursprung. Vi hade då behövt veta vindriktningen vid blomning och om skillnaden i tid när honblommorna i fröodlingarna varit mottagliga överensstämmer med pollenmolnet. Vad vi däremot ser är att majoriteten av fröodlingarna har en lägre hårdighet jämfört med beståndsmätarna (figur 4A) och att hårdigheten hos fröodlingarna från S23F181N och framåt har sjunkit mer för sydligare plantager, även om den effekten bara är signifikant för frystest S23F201F och S23F231N (se figur 4B och 5 del 2). Med andra ord är kurvan som anpassats till fröodlingarnas skadegrad (grön i figur 5) brantare och skadegraden är högre jämfört med standardkurvan vid lägre latituder. Vår hypotes om att klimatförändringarna påverkar hårdigheten mer vid högre latitud innebär att vi snarare hade förväntat oss en mindre lutning på kurvan anpassad till fröodlingarna (som i frystest S23F901T, figur 5 del 1), vilket hade inneburit att hårdigheten försämrats mer vid högre latitud. Vad som orsakat den här förändringen i testade skördar är oklar. En möjlighet är att den något förkortade tillväxtsåongen i de senaste frystesterna från 10 till 8 veckor ger ett större utslag i sydligare förädlat material. En annan möjlighet är att varmare väder under frömognaden för dessa skördar har gett en eftereffekt hos fröplantorna med sämre hårdighet som följd i framför allt sydligare klimat. Är det eftereffekter kan det ha konsekvenser vid plantering men som tidigare påvisats försvinner dessa ofta redan när plantorna kommer in i sin andra tillväxtsåong (Andersson, 1994). För att utreda om det är nuvarande protokoll som ger dessa resultat kommer vi att odla några fröpartierna både åtta och tio veckor innan de får påbörja invintring vid kommande frystest för att se om det ger skillnader i skadegrad.

Generellt ser vi ingen signifikant trend i att fröodlingar har en sämre hårdighet i ung ålder, däremot finns en effekt där sydförflyttning ger högre skadegrad ju längre norr ifrån materialet härstammar. Dilemmat med detta resultat är att sydförflyttning skedde nästan enbart bland första omgångens fröodlingar vilka testades i ung ålder på 80 och 90-talet. I dessa frystest ser vi generellt en högre skadegrad ju längre norrut fröodlingen är belägen (figur 4B). Det gör det svårt att helt skilja effekten av sydförflyttning från mönstret i stort. Vi hade stora förhoppningar att med ett så här stort material skulle kunna visa trender över tid som kan säkerställas. Den trend vi ser är att i sydförflyttade EttO och TvåO fröodlingar kan ha en försämrad hårdighet i ung ålder (figur S2) även om den inte är signifikant. Vi har dessutom signifikanta avvikelser i hårdighet hos fröodlingar i enskilda frystester. Då skördarna mestadels är från året innan skulle detta kunna vara indikationer på att faktiska väderhändelser påverkat skörden genom inkorsande pollen med ett annorlunda latitudursprung än fröodlingarnas lokal. Tyvärr saknar vi information för att kunna fastställa om detta är orsaken.

Figur. 7



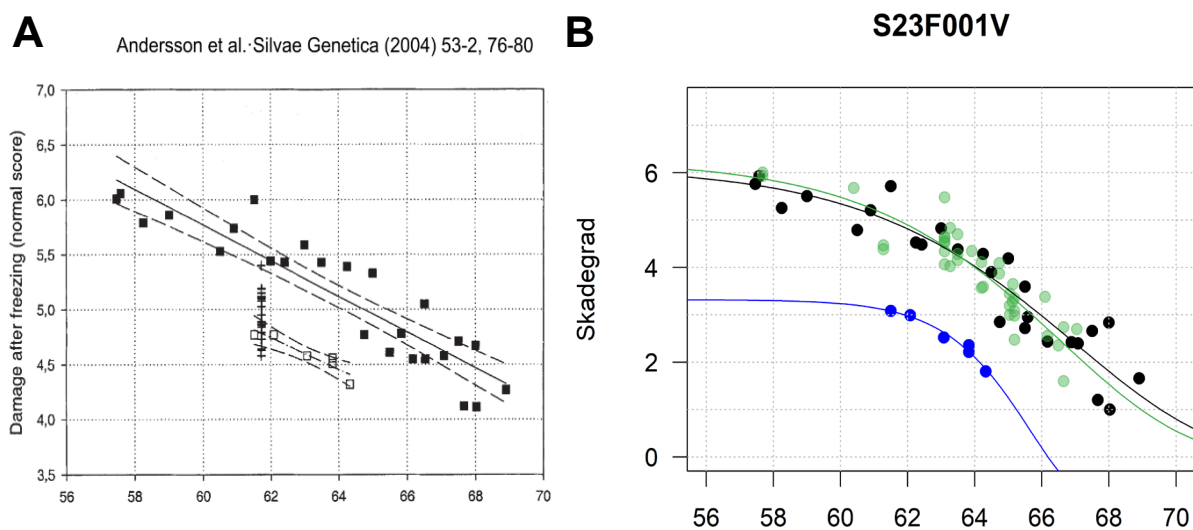
Figur. 8



Figur 5. Översikt av 36 av 37 frystest. Svarta punkter motsvarar beståndsmätarnas skadegrad i relation till deras latitudursprung och den svarta kurvan har anpassats därefter. Det är också den som alla andra fröpartier relaterar till vad gäller hårdighet. Befinner sig en punkt ovanför kurvan är den mer skadad än förväntat och har en då en försämrad hårdighet. Blå punkter och linje är ryska bestånd medan röda är finska bestånd och fröodlingar.

Sammanfattning

Överlag fungerar frystesten som en bra indikator för hur fröodlingarna generellt beter sig över tid även om vi inte kan svara på varför mönstret skiljer sig mellan frystestomgångar. Vi anser också att



Figur 6. Jämförelse mellan två kurvanpassningar för samma dataset med skadegrad som en funktion av latitudursprung, där också skattningen genomfördes med något olika antagande kring fördelningen av skadegraden. I A omvandlades skadegraden först till en normalfördelningen, se publikationen av Andersson and Fedorkov (2004) medan figur B bygger på i rapporten använd metodik. Svarta fyrkanter och punkter beskriver skadegraden hos beståndsmätarna. Öppna fyrkanter och blå punkter beskriver skadegraden hos ryskt beståndsmaterial.

en icke-linjär anpassning till skadegraden i relation till fröpartiers latitudursprung fungerar bättre än den tidigare linjära så länge de inte har en alltför stor variation i longitud (se figur 6 och jämförelsen mellan ryskt och svenskt beståndsmaterial). Som det går att se i figur 5 så går de flesta skadegradsskattningar att anpassa till en rät linje, men det kan i vissa fall leda till att hårdigheten hos material i mitten på regressionslinjen från breddgrad 64–65 underskattas. Däremot kan vi inte se att metoderna skiljer sig nämnvärt åt vid en relativ jämförelse. Något som också är intressant att notera är att riktigt nordligt finskt material får lite sämre hårdighet än vad som förväntas från deras latitudursprung kring 70 °N, vilket sannolikt kan förklaras av att lokalerna ligger nära Norra ishavet i ett mer maritimt klimat (se frystest S23F091Z i figur 5 del 2). En viktig aspekt att fortsätta ha med sig när det kommer till frystesterna är att behålla ett bredare latitudursprung på beståndsmätarna än fröodlingarna som testas, för att kurvanpassningen skall bli så korrekt som möjligt.

Vi ser att unga sydförflyttade plantager har en något lägre hårdighet än förväntat och det finns en antydning i några fall att hårdigheten ytterligare försämrats på senare år (se figur S2). Vi kan inte förklara orsaken till de möjliga mönstren som vi ser i vårt data. En hypotes kan vara att det extrema vädret med flera värmererekord de senaste åren har påverkat skördarna i testade fröodlingar genom pollinering av sydligare pollen, men detta sammanfaller med en protokollförändring i frystestgenomförandet.

Vi har inte haft möjlighet att lägga in olika skötselåtgärder hos fröodlingarna för att se hur de påverkar hårdigheten. Det finns dock tidigare studier som visar att gallring möjligen ger en ökad inkorsning (Heuchel *et al.*, 2022), med då krävs det samtidigt att ursprunget på inkorsande vildpollen har ett betydligt sydligare ursprung. Klocke gallrades 2003–2004, men vi ser ingen tydlig förlust i hårdighet i efterföljande skördar (figur S2). Även om modellen förklarar en betydande variation borde det finnas fler viktiga förklarande parametrar. Ett första steg i förbättringsarbetet skulle kunna vara att replikera en del av tidigare partier för att studera effekten av varierad odlingslängd. Dessutom skulle vi vilja undersöka pollenmolnets härkomst när honblommorna är mottagliga i fröodlingar för att bättre förstå hur det påverkar frystestresultaten. Vi är också nyfikna hur hårdigheten hos de något sydförflyttade TreO odlingarna utvecklas över tid.

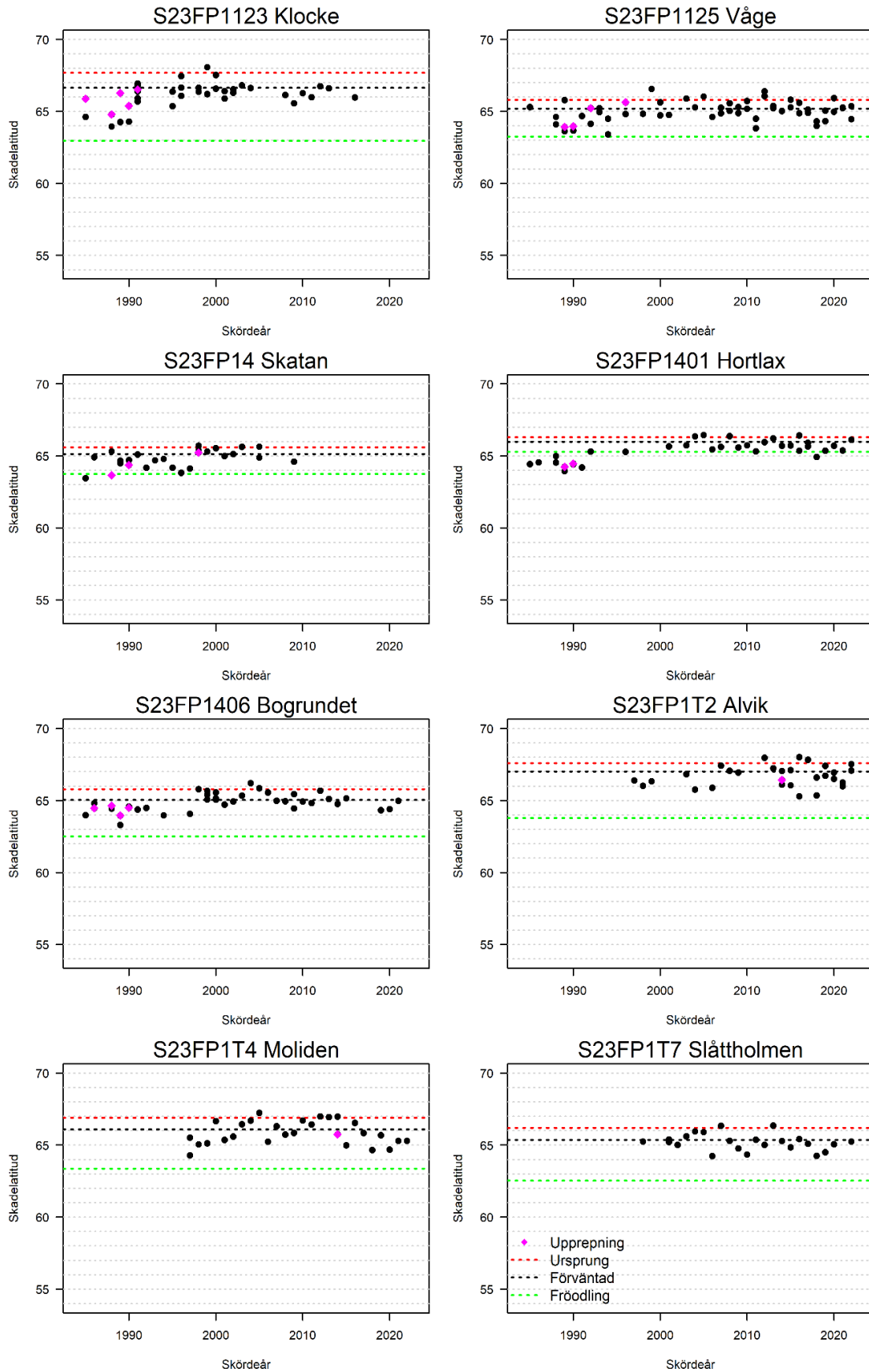
Litteratur

- Aho, M.L., 1994. Autumn frost hardening of one year old *Pinus sylvestris* (L.) seedlings: effect of origin and parent trees. *Scand J Forest Res* 9, 17-24.
- Andersson, B., 1992. Autumn frost hardiness of *Pinus sylvestris* offspring from seed orchard grafts of different ages. *Scand J Forest Res* 7, 367-375.
- Andersson, B., 1994. Aftereffects of maternal environment on autumn frost hardiness in *Pinus sylvestris* seedlings in relation to cultivation techniques. *Tree Physiol* 14, 313-322.
- Andersson, B., Fedorkov, A., 2004. Longitudinal differences in Scots pine frost hardiness. *Silvae Genet* 53, 76-80.
- Andersson Gull, B., Persson, T., Fedorkov, A., Mullin, T.J., 2018. Longitudinal differences in Scots pine shoot elongation. *Silva Fennica* 52, 10040.
- Hall, D., Zhao, W., Heuchel, A., Gao, J., Wennström, U., Wang, X.-R., 2023. The effect of gene flow on frost tolerance in Scots pine – Latitudinal translocation of genetic material. *For Ecol Manage* 544, 121215.
- Hallingbäck, H., Almqvist, C., Wennström, U., Persson, T., Hall, D., 2023. Mått på fröplantagers genetiska egenskaper. Arbetsrapport 1168-2023, Skogforsk, 72 s.
- Heuchel, A., Hall, D., Zhao, W., Gao, J., Wennström, U., Wang, X.-R., 2022. Genetic diversity and background pollen contamination in Norway spruce and Scots pine seed orchard crops. *Forestry Research* 2.
- Koski, V., 1987. Long geographic transfers, a possible way of eliminating pollen contamination in advanced-generation seed orchards of *Pinus sylvestris*. *For Ecol Manage* 19, 267-271.
- Lehtinen, M.T., Pulkkinen, P., 2017. Effects of Scots pine paternal genotypes of two contiguous seed orchards on the budset and frost hardening of first-year progeny. *Silva Fennica*.
- Man, R., Lu, P., Dang, Q.-L., 2021. Effects of insufficient chilling on budburst and growth of six temperate forest tree species in Ontario. *New Forests* 52, 303-315.
- McCullagh, P., 1980. Regression Models for Ordinal Data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 42, 109-127.
- Nilsson, J.-E., 2001. Seasonal Changes in Phenological Traits and Cold Hardiness of F1-populations from Plus-trees of *Pinus sylvestris* and *Pinus contorta* of Various Geographical Origins. *Scand J Forest Res* 16, 7-20.
- Persson, T., Andersson, B., Ericsson, T., 2010. Relationship between autumn cold hardiness and field performance in northern *Pinus sylvestris*. *Silva Fennica* 44, 255-266.
- Post, E., Steinman, B.A., Mann, M.E., 2018. Acceleration of phenological advance and warming with latitude over the past century. *Scientific Reports* 8, 3927.
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., Laaksonen, A., 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment* 3, 168.
- Wu, D., Pulkkinen, P., Pappinen, A., Neyko, I., Zhang, G., Di, B., Heinonen, J., Repo, T., 2023. Frost hardiness of Finnish plus tree progenies of Scots pine from seed orchards in Finland and Ukraine. *European Journal of Forest Research* 142, 1467-1477.

Appendix



Figur S1. En inventering av vilka fröodlingar och vilka skördeår som ingick i frystesterna. Flera fröodlingar har mer än ett fröparti/klängning och ibland även särplock som testats i ett och samma frystest, vilket framgår av figur S2.



Figur S2. Exempel på hårdighet översatt till motsvarande latitud hos skördar över tid hos några sydförflyttade EttO och TvåO fröodlingar. Den röda översta streckade linjen visar klonernas medelursprung i latitud. Den undre gröna linjen motsvarar latituden där fröodlingen ligger. Svart streckad linje motsvarar fröodlingens standardiserade ursprungslatitud givet 40% inkorsning av lokalt vildpollen.