

ARBETSRAPPORT 1158-2023

AutoPlant - planteringsrobotens potential i svenskt skogsbruk

Systemanalys

Anna Wallner, Anders Eriksson & Jussi Manner



En maskinellt planterad planta. Foto: Björn Edlund

Innehåll

Förord	4
Summary	5
Sammanfattning	6
Bakgrund	7
Material och metoder	7
Analys på tre nivåer	7
Simulering av interaktionen mellan maskin och mark.....	7
Markmodell: stubbar och rötter	8
Markmodell: stenar och ytblock	9
Markberednings- och planteringsaggregatet "Borren"	10
Övriga maskinparametrar	11
Försöksdesign	11
Manuella moment vid autonom föryngring	11
Uppstart.....	12
Relationen mark, människa och maskin	12
Kostnadskalkyl och känslighetsanalys.....	12
Resultat och diskussion	13
Simuleringsresultat: skogsskötsel och prestation.....	13
Skogsskötsel.....	13
Prestationen	13
Kartläggning av manuella moment.....	15
Workshopens utfall	15
Uppstart.....	16
Relationen mark, människa och maskin	16
Kostnads- och känslighetskalkyl.....	17
Slutsatser	18
Markinteraktion.....	18
Behov av operatör	19
Kostnadskalkylen	19
Referenser	20



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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 15 februari 2023 av Petrus Jönsson, biträdande programchef Driftsystem och Gert Andersson, programchef Driftsystem. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering 30 maj 2023.

Redaktör: Caroline Rothpfeffer, caroline.rothpfeffer@skogforsk.se
©Skogforsk 2023 ISSN 1404-305X

Förord

Denna rapport skrevs i ett samarbete mellan Södra Skogsägarna och Skogforsk. Rapporten är en del av Autoplant-projektet vars mål var att utveckla en autonom skogsföryngringsmaskin. Projektperioden var februari 2021 – februari 2023 och projektet finansierades av Vinnova genom programmet Utmaningsdriven Innovation.

Den 1 mars 2023 i Växjö och Uppsala: Anna Wallner, Anders Eriksson, Jussi Manner

Summary

The System Analysis work package in the Vinnova project AutoPlant step 2 (Challenge-driven Innovation) addresses simulation of soil-machine interactions, operator tasks, cost calculations, and a sensitivity analysis for an autonomous machine used for mechanical site preparation (MSP) and planting. Input data for the system analysis is taken from previous research, findings from other work packages in the project, and workshops involving project members from different organisations.

The sensitivity analysis suggests that the parameter most significant for achieving profitability is machine capacity. Simulation of soil-machine interactions shows clearly that precision MSP causes very little soil disturbance. The conclusion from the workshop on manual work processes is that an operator will still be needed to serve autonomous machines for the foreseeable future, but that one operator will be able to serve several machines.

Sammanfattning

Arbetspaketet Systemanalys i Vinnovaprojektet *AutoPlant steg 2* (utmaningsdriven innovation) adresserar simulering av markinteraktion, den tänkta operatörens arbetsuppgifter, kostnadskalkyl och känslighetsanalys för en autonom maskin för markberedning och plantering. Indata till systemanalysen är hämtad från tidigare forskning, utveckling i andra arbetspaket inom projektet samt genom workshops med projektmedlemmar från olika organisationer.

Känslighetsanalysen pekar på att maskinens kapacitet är den parameter som väger tyngst för att uppnå lönsamhet. Simuleringen av markinteraktion ger en tydlig bild av hur liten markstörningen blir vid precisionsmarkberedning. Slutsatsen från workshopen om manuella moment är att en operatör behövs för att serva även en autonom maskin för överskådlig framtid, men att en operatör kan serva flera maskiner.

Bakgrund

Trots den mångåriga utvecklingen av maskinell plantering har planteringsmaskiner ännu inte fått något ihållande genomslag och förekomsten av planteringsmaskiner i Norden är i praktiken försumbar (Sundblad m.fl. 2023). Ekonomiskt har det varit svårt att konkurrera med maskinell markberedning med efterföljande manuell plantering. Trots bristen på ihållande genombrott har utvecklingsarbetet ändå resulterat i ny värdefull kunskap och många praktiska erfarenheter. Med dagens nya utvecklingsprojekt som innehåller nya tekniska lösningar ökar chansen för att hållbar förnyringsteknik slår igenom i det svenska skogsbruket (Sundblad m.fl. 2023).

AutoPlant är ett Vinnova-finansierat visionärt utvecklingsprojekt med målet att utveckla autonom markberedning och plantering som är ekologiskt, ekonomiskt och socialt hållbar. I denna rapport beskriver vi markinteraktion vid precisionsmarkberedning, behovet av operatör vid autonom förnyring samt relaterar förväntad planteringskostnad till olika kostnadsdrivande faktorer. Övriga delar som berör systemanalys, t.ex. transport av plantor och maskiner, har berörts utan att utvecklingsmöjligheter övervägts.

Det övergripande syftet med systemanalysen var att analysera, med hjälp av utvecklingsresultat från andra AutoPlant-arbetspaket, uppskalning av AutoPlant-systemet samt att bedöma hur olika omständigheter påverkar helheten med avseende på markstörning, plantering och kostnadsbild i olika miljöer representativa för skogsbruket i Sverige. Vidare var syftet att analysera hur stenighet och minsta godtagbara avstånd mellan plantor påverkar planteringsrobotens prestation samt planteringsresultatet.

Material och metoder

Analys på tre nivåer

Eftersom flödena är komplexa, har en indelning i tre nivåer gjorts med olika komplexitet för att kunna fokusera på några nyckelprocesser, tex markinteraktion och behov av mänsklig inblandning, samt för att adressera helheten på ett mer övergripande plan. De olika nivåerna har varit en bra metod för att sätta resultaten i rätt sammanhang.

Nivå 1: studier av maskin-mark-interaktion

Nivå 2: studier av interaktionen mellan människa och en eller flera maskiner på ett hygge

Nivå 3: studier av alla flöden, dvs bränsleförbrukning, personalkostnader, maskininköp, logistik, planteringshastighet och liknande aspekter.

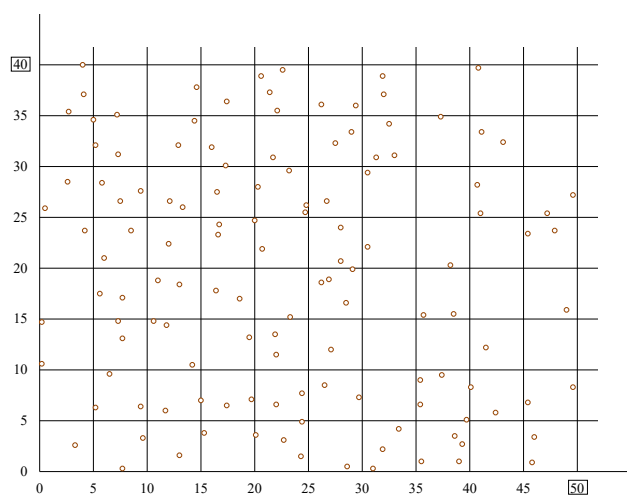
Simulering av interaktionen mellan maskin och mark

För att studera interaktionen mellan maskin och mark byggdes en modell i en händelsestyrd simuleringsmiljö (ExtendSim). Modellen är en vidareutveckling av den grundmodell som tidigare tagits fram i AutoPlant steg 1. Kort kan den beskrivas som en kombination av en markmodell och en maskinmodell vilka tillsammans utgör den simuleringsmiljö i vilken experiment kan göras för att bygga förståelse för interaktionen

dem emellan. Maskinmodellen är medvetet gjort generisk så den flexibelt ska kunna anpassa sig till studier av lite olika autonoma markberednings- och planteringskoncept.

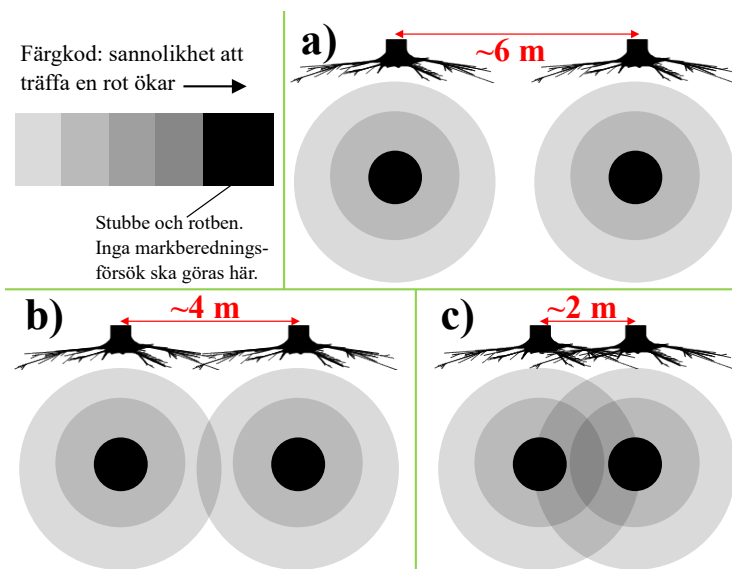
Markmodell: stubbar och rötter

Markmodellen består av tre delar: stubbar, rötter, och stenar. Herlitz (1975) typbeståndsmodell har använts för att skapa själva grundmodellen, dvs. en provyta bestående av koordinatsatta stubbar (Figur 1). Utöver koordinaterna ingår bl.a. stubbarnas diametrar. Alla stubbar antas ha rotben omkring sig samt ett antal huvudrötter. Simuleringstekniskt är rotbenet en osynlig utbredning av den synliga stubben och därmed har stubben inklusive rotbenen modellerats och simulerats som en fast helhet. Rotbenets storlek beräknades utifrån stubbens diameter enligt Björkhem m.fl. (1975).



Figur 1. Fältdata av Herlitz (1975): En brun cirkel motsvarar en stubbe. Storleken på provytan är 40 m × 50 m.

Rotträffar vid markberedningen simulerades med hjälp av en sannolikhetsmodell baserad på Björkhems m.fl. (1975) och Kalliokoskis m.fl. (2008) rotmodeller (Figur 2). Enligt dessa studier beror antal rötter samt deras tjocklek på stubbens diameter och trädslag.

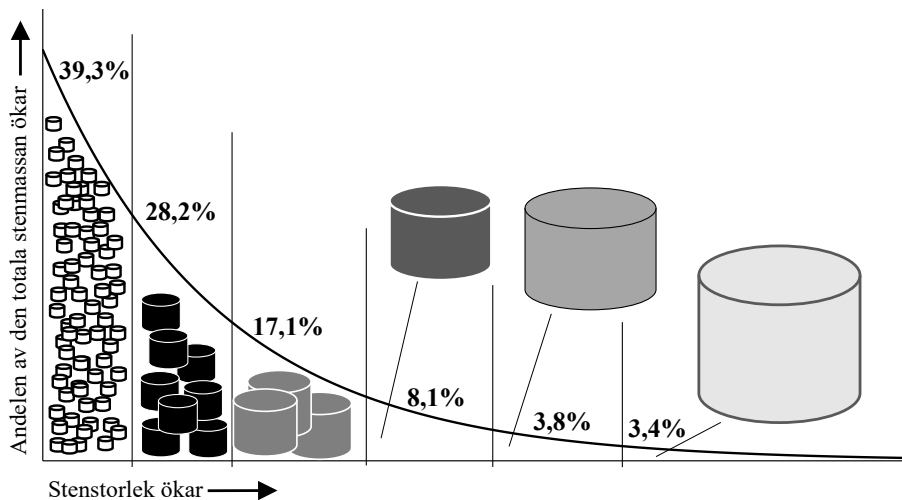


Figur 2. Rotträffar simuleras med hjälp av sannolikhetsmodell: a) ju längre bort från stubben man är desto mindre är sannolikheten att träffa en rot vid markberedning; b) och c) flera rotsystem kan överlappa vilket innebär en ökad sannolikhet att träffa en rot, om ett markberedningsförsök görs i det området.

Markmodell: stenar och ytblock

Till skillnad från stubbarnas fasta koordinater, randomiseras koordinater på stenar och ytblock vid varje upprepning. Stenstorlekar delades in i sex olika storleksklasser: 125 cm³, 3375 cm³, 27 000 cm³, 91 125 cm³, 216 000 cm³, 421 875 cm³ (Figur 3). Fördelningen baserades på Stendahl m.fl. (2009) samt Lideskog och Karlberg (2016).

Själva simuleringsverktyget är anpassningsbart – både markförhållanden (stenighet etc.) och maskininställningar är justerbara. Hela stenighetsskalan har simulerats från helt stenfria marker upp till 60 % stenighet. I resultatavsnittet redovisar vi dock endast resultat för stenigheterna 20 %, 30 % och 40 %. Stenigheterna valdes baserat på en workshop med skogsbolagens skogsskötselexperter (dvs. sannolikt AutoPlants framtida kunder) samt en litteraturundersökning. Därtill tillkommer rötter och stubbar. Tillsammans utgör dessa hinder en totalhinderkvot, vilken varierade mellan 33,6 och 53,6 %.

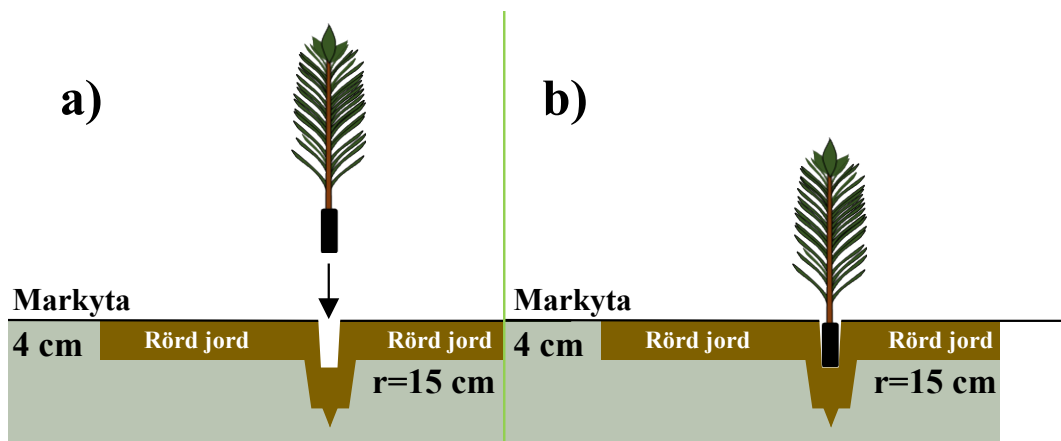


Figur 3. Stenstorlekar delades in i sex olika storleksklasser. Småstenar (39,3% av stenmassa) antogs inte utgöra något hinder för markberedning och plantering.

Markberednings-och planteringsaggregatet "Borren"

I denna studie har maskininställningarna anpassats efter aggregatprototypen "Borren" som användes i Autoplant-projektets sluttester. Enligt uppgifter från Bracke AB ger Borren ett fläckdjup på 4 cm och ett borrhåldjup på 12 cm (Figur 4). Fläckens diameter blir ca 30 cm.

En skillnad från de flesta planteringsaggregat har Borren inte något planteringsrör utan plantan faller fritt ned i borrhålet. Följaktligen antogs att Borren inte kan träffa någon sten under planteringsmomentet utan endast under markberedningsmomentet. I praktiken innebär detta att småstenar (storleksklass: 125 cm³) inte hindrar Borren från att markbereda (och plantera). Däremot kan stenar i övriga storleksklasser (storleksklasser: ≥3375 cm³) hindra markberedningen vilket också resulterar i att även planteringen misslyckas (Figur 3).



Figur 4. Plantering med Borren: a) Efter ett lyckat markbredningsförsök har en planteringspunkt skapats, b) och plantan kan släppas att falla ned i borrhålet.

Övriga maskinparametrar

Verktyget har inte parametern "antal plantor/ha" utan antalet plantor är ett simuleringsresultat. Men genom att variera kortast godtagbart avstånd mellan plantorna kan man indirekt påverka även det slutgiltiga antalet plantor/ha. I denna rapport använde vi avstånden: 2,0 m, 2,2 m eller 2,4 m. I simuleringarna har antagandet varit att AutoPlant för tillfället inte kan detektera hinder under markytan (stenar och rötter), däremot kan AutoPlant detektera stubbar samt stora ytblock (ovanpå markytan). Ifall AutoPlant träffar ett hinder under markberedning misslyckas planteringsförsök. Målet med framtida AutoPlant-varianter är att de även kan detektera hinder under markytan. Då hela konceptet inte finns tillgängligt att studera än, är momenttider samt körhastighet uppskattningar baserade på diskussioner med tillverkare och andra experter.

Försöksdesign

Tre olika minimiavstånd mellan plantorna samt tre olika stenighetsklasser resulterade i totalt nio olika försöksled (dvs. simuleringskörningar). Eftersom varje försöksled upprepades 24 gånger, blev det totalt 216 körningar.

Manuella moment vid autonom föryngring

Under projektperiodens första halva blev det tydligt att uppfattningen bland utvecklarna gick isär om hur självgående den autonoma planteringsmaskinen förväntades bli. Eftersom detta har en tydlig koppling till systemanalysen genomfördes en workshop i mitten av mars 2021 där alla manuella moment diskuterades. Ett tiotal skogsskötselexperter från alla projektets skogsbolag, tillverkare och forskare samlades för att tillsammans resonera kring vilka moment i och kring planteringsmaskinen som behöver utföras av människa och vilka moment som maskinen förväntas klara av på egen hand. Även här användes de tre nivåerna för att lättare kommunicera vilka moment som avsågs. Under olika rubriker på en digital whiteboard sammanställdes de moment som för överskådlig framtid antas komma att utföras mer eller mindre manuellt.

Uppstart

När en maskin har transporterats till uppställningsytan nära den trakt som ska förnygras finns ett antal arbetsmoment som ska utföras innan den första plantan kan sättas. Det är först när planteringen startar som värde skapas. För att studera detta gjordes följande antaganden:

- Plantor och maskin finns redan på trakten
- En operatör är närvarande och är den som utför alla arbetsmoment
- Arbetsdagen börjar när operatör, maskiner och plantor är på plats
- Avståndet från uppställningsyta till hygget är 350 m
- Kran finns att tillgå på servicebil eller liknande
- Specialanpassade plantrack med kassetter med 1500 plantor/rack används

Relationen mark, människa och maskin

Med information från simuleringen av markberedning och plantering (markinteraktionen) samt skattning av hur mycket arbetstid som förväntas av operatör (manuella moment), kan en uppfattning skapas om hur flera maskiner kan användas vid förnygringen.

Initialt diskuterades att en operatör kunde ansvara för maskiner som arbetade på olika trakter och vid behov hjälpa den maskin som via fjärrövervakning tillkallade operatör. I AutoPlant steg 1 visade en studie av rådande lagstiftning att det inte finns stöd för den typen av lösning. Dessutom indikerade listan över manuella moment att en mer lokal tillgång på operatör var nödvändig. Genom att betrakta mer än en maskin i arbete på ett och samma hygge, adresseras möjligheterna som en autonom maskin ger.

Gestaltning av en arbetsdag:

- Det är tidig morgon och jag har kommit till en ny trakt, maskinerna är hittransporterade och det är mitt jobb att starta upp förnygringen av den här ytan innan min kollega kommer och löser av mig. Jag har fått tre maskiner. Jag börjar med att lasta av första maskinen från trailern, tanka, utföra säkerhetskontroll och checka sensorer. Jag lastar sen plantorna på maskinen. Jag lyfter på 1500 plantor på ett rack på maskinen med hjälp av kranen på min bil. Sen kontrollerar jag den del av trakten som maskinen plantera och uppdaterar Pathfinder. Jag hjular maskinen in till hygget och startar planteringen. Jag vill säkerställa att planteringen är bra så jag ägnar en stund åt att kontrollera resultatet och brukar justera parametrarna något så att maskinens uppförande matchar den här traktens förutsättningar. Det verkar vara rätt lite sten här så planteringstakten blir helt ok. Dags att starta nästa maskin på samma sätt så att planteringstakten fördubblas. När jag startat den tredje maskinen når jag det här lagets maxhastighet förutsatt att inga servicestopp inträffar.

Kostnadskalkyl och känslighetsanalys

I framtagandet av nya tekniska lösningar och system är det viktigt med en initial förståelse för hur kostnaderna fördelar sig samt vad som påverkar kostnaderna i slutänden. Det fungerar som ett stöd i designprocessen. I AutoPlant-projektet har det inte varit klart hur den färdiga maskinen eller produkten ser ut och det slutgiltiga systemet kan se väldigt olika ut. En mindre, billigare maskin har lägre produktivitet än en större och dyrare maskin som också är mer högpresterande.

Inom systemanalysen gjordes en förenklad maskinkalkyl för en tänkt autonom planteringsmaskin. För maskinkostnadskalkylen användes ett interaktivt verktyg för

systemanalys (FLIS) som Skogforsk utvecklat. Då det inte finns en befintlig maskin att utgå från, valdes en skotare som underlag. Dock anpassades de ingående parametrarna för att mer realistiskt representera en tänkt autonom planteringsmaskin, då den såklart skiljer sig från en skotare.

Givet att det inte finns en entydig och klar bild av hur maskinen ska se ut, hur den ska användas eller i vilken terräng den bör verka i, bröts ett antal parametrar ut från kalkylen och hanterades som känslighetsparametrar. Följande parametrar identifierades som extra intressanta att variera i en känslighetskalkyl:

- Markens stenighet
- Investeringskostnad
- Robustheten på maskinen
- Grad av autonomitet
- Produktivitet på maskinen
- Årsutnyttjande på maskinen

I systemanalysen antas att AutoPlant redan finns i etablerad miljö med en fungerande logistik kring plantor samt plantskolor som är anpassade för konceptet. Transporter av plantor och maskiner betraktas endast på ett konceptuellt plan. Plantrack med 1500 pl/enhet är inte standard idag utan skulle kräva en anpassning i plantskolans produktionsflöde. Dessa kostnader är inte adresserade. Kostnadskalkylen inkluderar inte heller några specifika utvecklingskostnader.

Resultat och diskussion

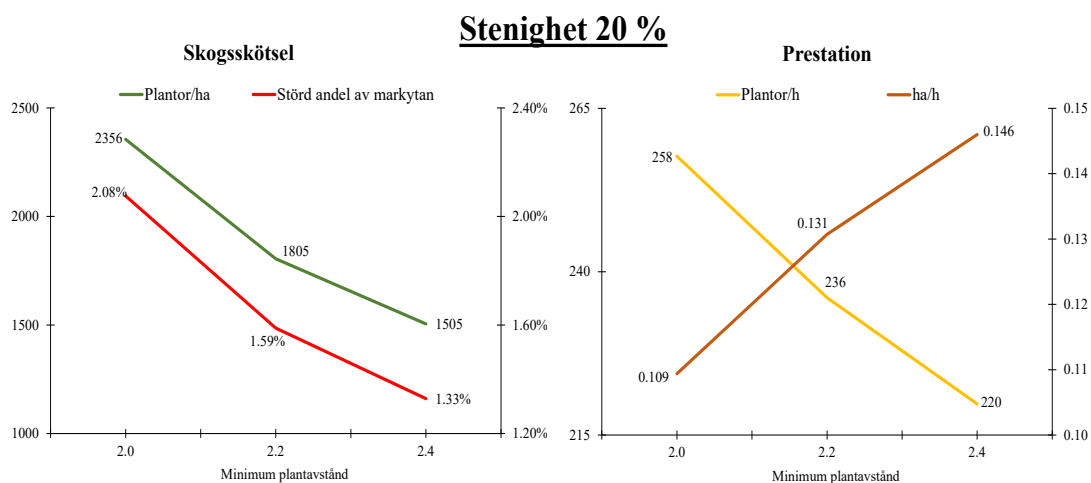
Simuleringsresultat: skogsskötsel och prestation

Skogsskötsel

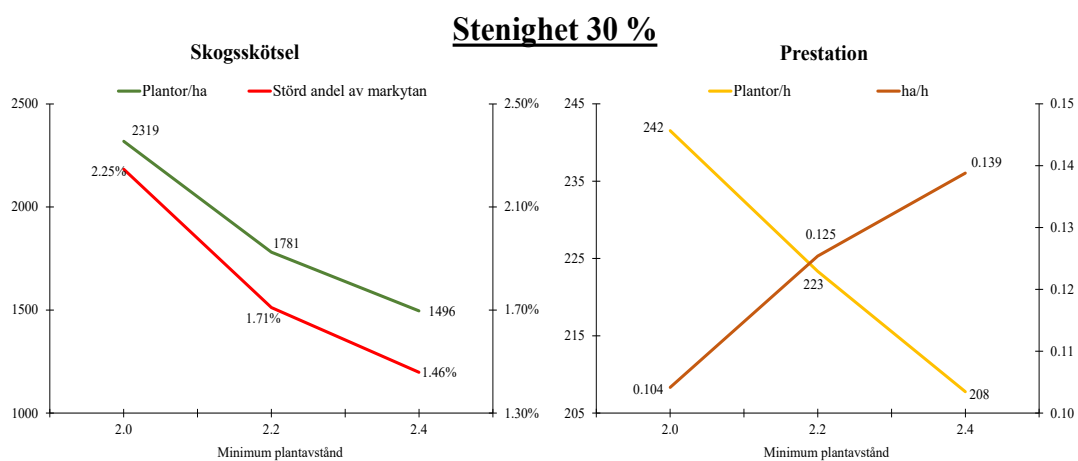
Antal planterade plantor varierade mellan ca 1500 och 2300 per ha beroende på minimum för godtagbart avstånd mellan planterade plantor (Figur 5-7). Dessa planttätheter är i linje både med skogsbolagens preferenser samt Skogsstyrelsens rekommendationer (Krekula m.fl. 2018). Stenigheten påverkade antalet plantor per hektar väldigt lite, men den störda andelen av markytan ökade något med ökande stenighet eftersom maskinen avslutade arbetet och påbörjade en ny fläck om det var för många hinder vid första försöket.

Prestationen

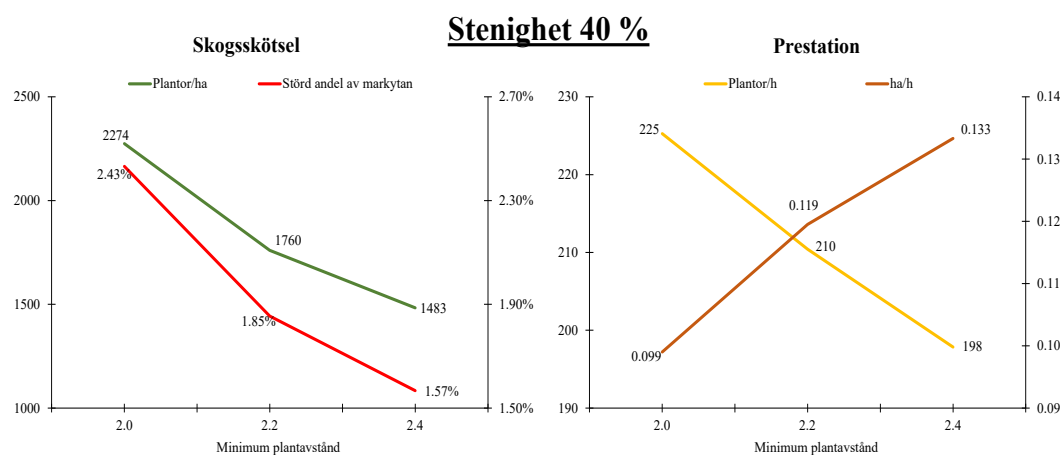
Prestationen påverkades huvudsakligen av godtagbart miniavstånd mellan planterade plantor. Ju tätare planteringen är desto flera plantor kan planteras per timme eftersom körningens relativa andel av tidsåtgången minskar. Om prestationen analyseras per hektar är läget precis motsatt. Ju glesare planteringsförband desto större yta hinner maskinen täcka per timme. Ökning i prestation börjar dock så småningom avta eftersom körningens (konstant tillägg) relativa andel av tidsåtgången blir större.



Figur 5. X-axlar: godtagbart minimiavstånd mellan planterade plantor (meter). Y-axlar från vänster: antal plantor per ha, störd andel av markytan, planterade plantor per timme och planterade hektar per timme.



Figur 6. X-axlar: godtagbart minimiavstånd mellan planterade plantor (meter). Y-axlar från vänster: antal plantor per ha, störd andel av markytan, planterade plantor per timme och planterade hektar per timme.



Figur 7. X-axlar: godtagbart minimiavstånd mellan planterade plantor (meter). Y-axlar från vänster: antal plantor per ha, störd andel av markytan, planterade plantor per timme, och planterade hektar per timme.

Kartläggning av manuella moment

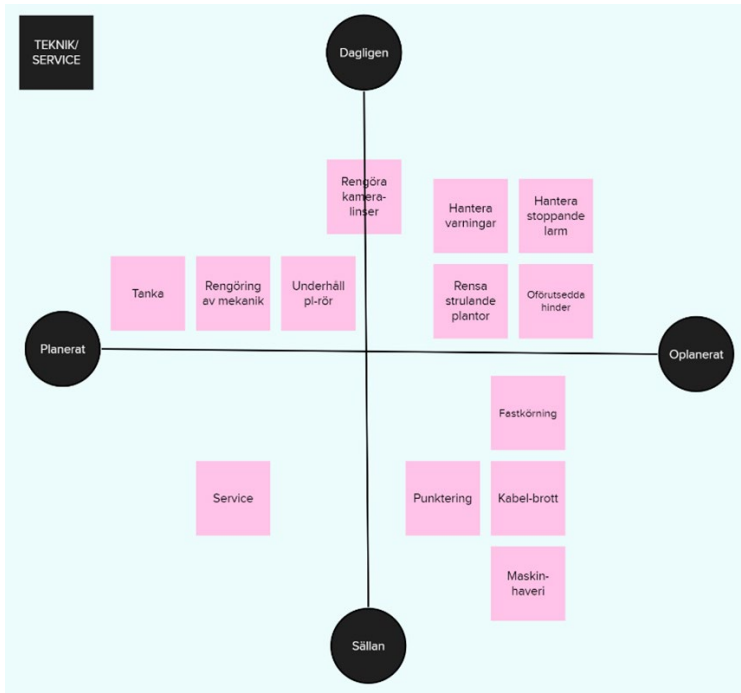
Workshopens utfall

De moment vid autonom plantering som bedömdes kräva mänsklig inblandning grupperades under rubrikerna logistik, planering, brandrisk, plantskötsel samt teknik/service (Figur 8).



Figur 8. Manuella moment grupperade i fyra olika arbetsområden.

Momenten som är kopplade till teknik och service fördelades över en fyrfältare enligt nedan i syfte att kunna göra en skattning av tidsåtgång samt stödja analyserna och beskrivningen av operatörsberoendet (Figur 9).



Figur 9. Manuella moment som berör arbetsområdet teknik och service klassade utifrån förutsägbarhet (planerat eller oplanerat) och frekvens (dagligen eller sällan).

Uppstart

Förväntade manuella moment vid uppstart av en maskin innan den är redo att påbörja den autonoma föryngringen och operatören har säkerställt planteringskvaliteten är listade i tabell 1. Uppskattningsvis tar uppstarten 1,5 h i anspråk av en operatör.

Tabell 1: Uppskattad tidsåtgång för manuella moment vid uppstart innan maskinen är redo att påbörja den autonoma föryngringen och operatören har säkerställt planteringskvaliteten.

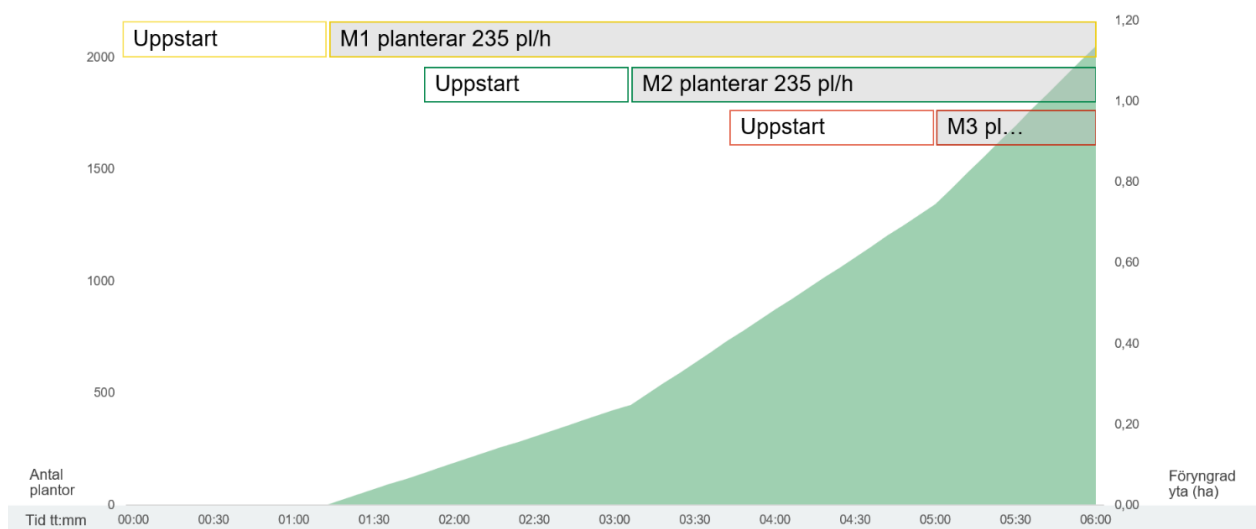
Arbetsmoment	Tanka	Säkerhetskontroll	Utvärdera hygge	Paht-Finder → maskin	Lasta på kassetter	Starta maskinen	Hjula in till hygge	Initial kvalitetskontroll
Tid (min)	7	15	5-30	5	15	1	10	20
Ack. tid (min)	7	22	52	57	63	64	74	94
Kommentar	Kan komma färdigtankad, kan också tankas i fält	Kontroll av säkerhet. Ren-göring och kontroll av sensorer	Checka dagens jobbyta, matchar förväntad självständig föryngring	Ev krävs uppdatering, köra pathfinder igen.	Kran på servicebil används för att lyfta rack med 1500 plantor		Antag 350 m från avlastning till hygget	Operatören övervakar maskinens arbete 20 min, ev justering

Relationen mark, människa och maskin

Resultatet från simuleringen av markberedning och plantering ger att 235 plantor/h är en rimlig prestation på vanligt förekommande mark med 20% stenkvot. Den uppskattade tiden för uppstarten tillsammans med planteringshastigheten ger följande sammanställning av tre maskiner som startas på och föryngrar en ny trakt. När sex timmar har gått är närmare 2 000 plantor satta och föryngringstakten når sin maximala kapacitet på ca 700 plantor i timmen (Figur 10).

Antaganden:

- Hantering av tomma kassetter sköts som idag, ingen utvärdering i systemanalysen
- Tidsuppskattningen avser en maskin som har testats närmare 10 000 timmar där många fel och brister är avhjälpta och personalen har god vana



Figur 10. Visualisering av föryngringstakt vid uppstart av tre maskiner på en ny trakt

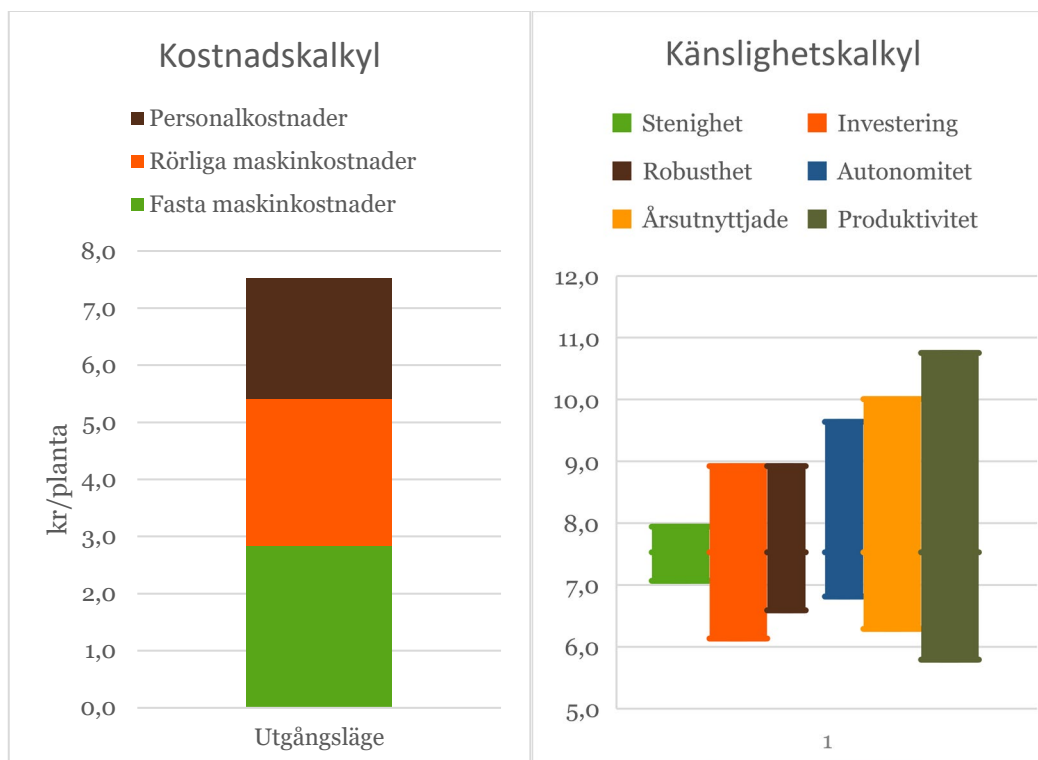
En viktig insikt vid tidsskattning av hur mycket tid som förväntas gå till service och till att ge maskinen teknisk support, är att det kopplar starkt till hur mogen och väl testad maskinen är. En körtid på 100 timmar, 1000 timmar respektive 10 000 timmar förväntas korrelera till hur ofta en operatör får rycka in och hjälpa maskinen på olika sätt.

Kostnads- och känslighetskalkyl

Resultat och data från mark-maskininteraktionssimuleringarna användes för att beskriva hur markens stenighet påverkar maskinens prestation. Som mått på robustheten på maskinen utvärderades hur teknisk utnyttjandegrad (TU) påverkar kostnaden. Om en person kan hantera 1, 2 eller 3 maskiner samtidigt, tolkas som graden av automation. Där innebär 1 till 1-förhållandet att det finns så många manuella uppgifter samt frekventa fel som måste avhjälpas så det blir svårt att motivera fler maskiner utan att offra för mycket i drifttid. Produktiviteten på maskinen varierades $\pm 30\%$ samt dagar för årsutnyttjandet varierades från 100 upp till 200 dagar.

I beskrivningen bröts den totala kostnaden ned till kostnadskomponenterna (1) fast maskinkostnad, (2) rörlig maskinkostnad och (3) personalkostnad. Genom att variera dessa parametrar byggdes en förståelse upp för vad variationerna innebär för systemets kostnadsbild uttryckt per planterad planta.

Ett bra resultat i termer av kronor per planterad planta kan åstadkommas genom att hålla ned insatserna, alltså personalkostnaden tillsammans med de rörliga och fasta maskinkostnaderna, men också genom att se till att maskinen planterar fler planter. Av resultaten framgår att alla de varierande parametrarna har en koppling till kostnaden per satt planta (Figur 11). Dock är produktiviteten den enskilt viktigaste parametern. Parametrarna som har med användningen av maskinen (TU och årsutnyttjande) likväl som investering är också intressanta. Observera att kostnad för plantköp, utkörning av planter, mm, inte ingår i kostnads- och känslighetskalkylen.



Figur 11. Kostnads och känslighetskalkyl. Det högra diagrammet visar uppdelning i kostnadskomponenter i basfallet. Till vänster visas kostnadsspännet från ett basläge när känslighetsparametrarna varierar.

Slutsatser

Markinteraktion

Tidigare simuleringar av Manner och Ersson (2021) visade att kontinuerligt framryckande planteringsrobotar kan ha en tendens att lämna ganska stora noll-tytor (30–35 m²), det vill säga tytor utan planter. För AutoPlant var noll-tytor inte ett problem tack vare riktad markberedning. Genom att utföra flera markbredningsförsök på en uppställningsplats utnyttjas hela markytan mer effektivt jämfört med kontinuerligt framryckande alternativ. Enligt vetenskaplig litteratur samt de senaste rekommendationerna från Skogsstyrelsen, är dock varken enstaka noll-tytor eller gruppställdhet något stort problem (Krekula m.fl. 2018; Jonsson m.fl. 2019). Luckorna föryngras oftast naturligt, vilket följaktligen gör att den biologiska mångfalden i beståndet ökar.

Traditionell markberedning går ofta ner till ca 20 cm djup och målet är en stor mineraljordsfläck (ca 1600 cm²) för att uppnå ett bra skydd mot snytbaggar (20 cm till närmaste humuskant). Studier med det grävmaskinmonterade planteringsaggregatet Bracke P11 visar att stenträffar vid markberedning är ett vanligt problem (Ersson 2014). Opublicerade simuleringar inom AutoPlant-projektet har visat att stenträffarna kommer att vara ett ännu mer påtagligt problem för (hel)autonoma planteringsmaskiner om djup och yta mer liknar tidigare aggregat. Ett sätt att minska stenträffar vid mekaniserad

markberedning är att använda ett mindre aggregat, dvs. minska mineralfläckens storlek. Detta alternativ är lämpligt om snytbaggas inte utgör någon risk. Aggregatet Borren som utvecklats i AutoPlant minskar antalet stenträffar genom att djupet på markberedningen minskas, men fläckens storlek är fortfarande tillräcklig för snytbaggas skydd. Detta är ett intressant alternativ på marker där djupare markberedning inte bedöms nödvändig.

Behov av operatör

Graden av självständighet för maskinen korrelerar starkt till hur många mantimmar som behövs under tiden maskinen är i drift. Utifrån den förnyringstakt som simuleringen påvisar och tidsuppskattningen för behov av mänsklig inblandning, är det rimligt att en operatör kan arbeta med och ansvara för mer än en maskin. Innan det förverkligas krävs dock ytterligare ett stort utvecklingsarbete.

Kostnads kalkylen

Lärdomar från arbetet med kostnads kalkylen är att det inte är entydigt att en större högproducerande maskin är den bästa vägen framåt. Uppsidor som kommer med mindre maskiner måste sättas i relation till den kanske enskilt lägre produktiviteten. Lägre investeringskostnader, lägre driftskostnader, möjlighet till billigare maskinflyttar och en förändrad driftstid kan motivera en mindre maskin. I ett fortsatt arbete bör dessa designfaktorer fortfarande vara öppna, även om framtagna tekniklösningar för autonom markberedning och plantering också sätter vissa ramar, till exempel med avseende på storleken på basmaskinen.

Referenser

Björkhem U., Lundeberg G. & Scholander J. 1975. Root distribution and compressive strength in forest soils. Root mapping and plate loading tests in thinning-stage stands of Norway spruce. Institutionen för växtekologi och marklära. Skogshögskolan. Rapporter och Uppsatser nr 22.

Ersson, B.T. 2014. Concepts for mechanized tree planting in southern Sweden. SLU. Avhandling – Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. 2014:76.

Herlitz A. 1975. Typbestånd i slutavverkning. Institutionen för skogsteknik, Skogshögskolan, Rapport nr 81.

Jonsson M., Bengtsson J., Gamfeldt L., Moen J. & Snäll T. 2019. Levels of forest ecosystem services depend on specific mixtures of commercial tree species. *Nature Plants* 5: 141–147.

Kalliokoski T., Nygren P. & Sievänen R. 2008. Coarse root architecture of three boreal tree species growing in mixed stands. *Silva Fennica* 42: 189–210.

Krekula B., Bergqvist J., Fries C., Gällerspång J., Reisek J., Ringagård J., Sollander E., Svensson L. & Wågström K. 2018. Föreskrifter för anläggning av skog. Regeringsuppdrag. Skogsstyrelsen. Rapport 2018/13.

Lideskog H. & Karlberg M. 2016. Simulated continuous mounding improvements through ideal machine vision and control. *Silva Fennica* vol. 50 no. 2 article id 1386.

Manner, J. & Ersson, B.T. 2021. Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *Journal of Forest Science* 67: 242–246.

Stendahl J., Lundin L. & Nilsson T. 2009. The stone and boulder content of Swedish forest soils. *Catena* 77: 285–291.

Sundblad L-G., Hannerz M., Manner J. & Ersson B.T. 2023. Tidigare, nuvarande och framtida planteringsmaskiner. Arbetsrapport 1149-2023. Skogforsk.