

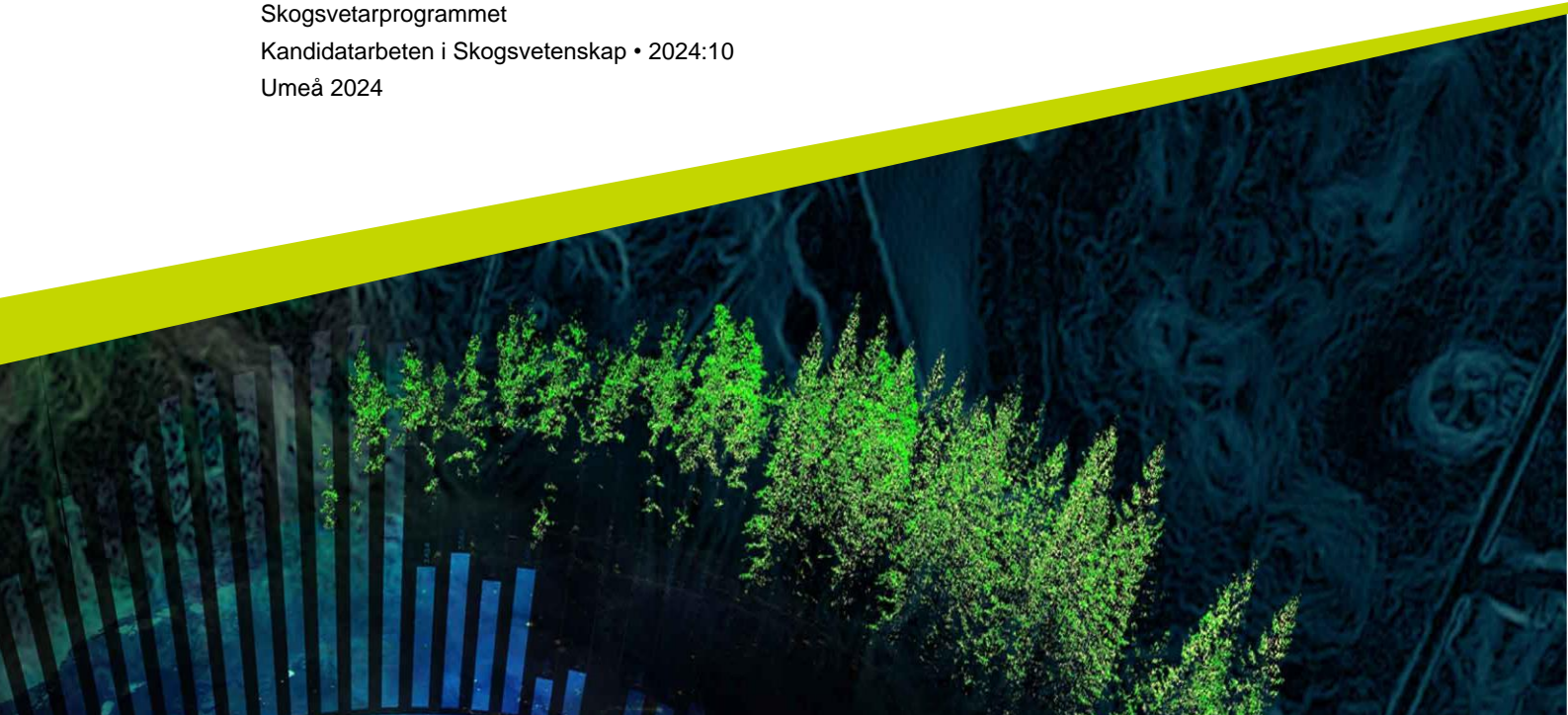


Metodutveckling för utvärdering av markradarteknik

Skapande av referensdata för radarforskning

Lukas Bergvik & Johannes Turesson

Självständigt kandidatarbete • 15 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Fakulteten för skogsvetenskap
Institutionen för skogens ekologi och skötsel
Skogsvetarprogrammet
Kandidatarbeten i Skogsvetenskap • 2024:10
Umeå 2024



Metodutveckling för utvärdering av markradarteknik. Skapande av referensdata för radarforskning

Lukas Bergvik & Johannes Turesson

Handledare:	Henrik Persson, Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning
Bitr. handledare:	Linnea Hansson, Skogforsk
Examinator:	Marcus Klaus, Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för skogens ekologi och skötsel
Omfattning:	15 hp
Nivå och fördjupning:	Grundnivå, G2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i skogsbruksvetenskap
Kurskod:	EX1015
Program/utbildning:	Skogsvetarprogrammet
Kursansvarig inst.:	Institutionen för skogens ekologi och skötsel
Utgivningsort:	Umeå
Utgivningsår:	2024
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd
Serietitel:	Kandidatarbeten i Skogsvetenskap
Delnummer i serien:	2024:10
Nyckelord:	Markradar, bildanalys, georeferering

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för skogsvetenskap
Institutionen för skogens ekologi och skötsel

Sammanfattning

Till följd av den tekniska utvecklingen har intresset ökat för att undersöka autonoma maskiners möjlighet att bidra till hållbara, effektiva och ekonomiska skötselåtgärder inom skogsbruket. Utveckling av nya autonoma maskinsystem ställer samtidigt nya krav på information och beslutsunderlag för att kunna fatta rätt beslut och uppnå optimala resultat. Vid markberedning och plantering med autonoma maskiner måste maskinen ha tillgång till information om markens struktur och egenskaper för att välja lämplig planteringspunkt.

Markradar är en teknik som genom att sända ut elektromagnetiska pulser används för att identifiera vad som finns i marken, vilket gör tekniken intressant att använda inom skogsbruket för att upptäcka stenar, block och andra markegenskaper. I dagsläget saknas kunskap om markradarns potential i nordiska förhållanden och hur olika omständigheter påverkar markradarns resultat.

I den här rapporten utvecklades en metod för att skapa referensdata som senare kan användas för att utvärdera markradarteknik i syfte att öka kunskapen om markradar inom skogsbruket. Referensdatat skapades genom en kombination av bildbehandling, georeferering och datorstödd design. Rapporten resulterade i tredimensionella modeller av olika markprofiler som kan användas som underlag för att undersöka markradarns möjlighet att detektera stenar och block i marken. Modellerna kan också användas för att utvärdera olika typer av radartekniker, såsom flygburen markradar, och är användbara för framtida forskning där kunskap om markens egenskaper är nödvändig.

Nyckelord: Markradar, bildanalys, georeferering

Abstract

As a result of technological advancements, there is growing interest in exploring the potential of autonomous machines to contribute to sustainable, efficient, and economic forest management. The development of new autonomous machine systems simultaneously places new demands on information and decision-making processes to make the right choices and achieve optimal outcomes. During site preparation and planting with autonomous machines, access to information about the structure and characteristics of the soil is crucial for selecting suitable planting spots.

Ground-penetrating radar is a technology that uses electromagnetic pulses to investigate subsurface materials, making it intriguing for forestry applications to detect rocks, obstacles, and other characteristics of the soil. Currently, knowledge is lacking regarding the potential of ground-penetrating radar in Nordic conditions and how different conditions affect its performance.

This report presents a method for creating reference data that can be used to evaluate ground-penetrating radar technology to increase the knowledge of radar within forestry. The reference data was generated through a combination of image processing, georeferencing, and computer-aided design. The report resulted in three-dimensional models of various ground profiles that can serve as a basis for investigating the ability to detect rocks and obstacles in the soil by radar. These models can also be used to assess other types of radar technologies, such as airborne ground-penetrating radar, and can contribute to future research where knowledge of soil characteristics is essential.

Keywords: Ground penetrating radar, image analysis, georeferencing

Innehållsförteckning

Tabellförteckning.....	5
Figurförteckning.....	6
1. Introduktion	7
1.1 Bakgrund.....	7
1.2 Markradar.....	8
1.3 Markradar inom skogsbruket	8
1.4 Syfte	9
2. Metod.....	10
2.1 Geografisk placering	10
2.2 Utveckling av referensdata	13
3. Resultat	17
3.1 Kalkylblad med geografisk information	17
3.2 3D-modeller.....	17
3.3 Mätosäkerhet	18
4. Diskussion	20
4.1 Utvärdering av metoden.....	20
4.2 Felkällor och osäkerhet.....	21
4.3 Förbättringsområden.....	22
4.4 Implikationer av metoden.....	23
4.5 Framtida studier	24
4.6 Slutsats	25
Referenser.....	26
Tack 28	

Tabellförteckning

Tabell 1. Sammanställning av gravarnas innehåll. Varje grav innehåller en eller flera jordarter samt ett visst antal block och/eller stenar.	11
---	----

Figurförteckning

Figur 1. Kartbild över testområdets geografiska position, 772218.35,7096811.52 SWEREF 99 TM.	10
Figur 2. Satellitbild över marklaboratoriet på testområdet i Sävar. Varje grav har ett nummer samt en färgad konturlinje som beskriver gravens innehåll enligt Tabell 1.	11
Figur 3. Bilder från lager 1 och lager 2 i grav nummer 4. Till vänster i bild syns lager 1 med block (ca 500 mm i diameter) och till höger i bild syns lager 2 med sten (90-200 mm i diameter). Foto: Skogforsk.	12
Figur 4. Till vänster bild från grav 2 utan georeferering. Till höger bild från grav 2 som georefererats genom att relatera kända geografiska positioner av stenar (gult), hörnpunkter (grönt) samt grundvattenrör och dräneringsbrunn (rött) till motsvarande plats i bilden	14
Figur 5. Bild från grav 2 där stenar som mätts in i fält och använts som referenspunkter visas i gult. Stenar som i efterhand har tilldelats geografisk position via GIS i blått.	15
Figur 6. Sammanställning av information från grav 2. Varje kolumn innehåller geografisk information om objektets position. X-,Y-koordinat angivet enligt SWEREF 99 TM, Z-koordinat angiven som avstånd från marknivå i meter.	17
Figur 7. 3D-modell av grav 2. Modellen visar stenar, block, grundvattenrör, dräneringsbrunn och gravens ytterlinjer.	18
Figur 8. 3D-modell över samtliga tio gravar. Teckenförklaringen till vänster i figuren beskriver vilka fyllnadsmaterial som finns i gravarna. Storleken på blocken varierar mellan 200–500 mm i diameter och storleken på stenarna varierar mellan 90–200 mm i diameter.	18
Figur 9. Fågelperspektiv över grav 6 till vänster, grav 2 till höger. Figuren visar avvikelser i det horisontella planet mellan de modellerade stenarnas position och stenarnas faktiska position i fält. Standardavvikelse för grav 6 och 2 mättes till 87 respektive 68 mm.	19

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Under perioden 2017–2021 slutavverkades i genomsnitt 251 000 hektar skogsmark i Sverige med efterföljande krav på återväxt enligt lag (Skogsstyrelsen 2022). Den vanligaste metoden för att förnygra skogsmarken i Sverige och uppnå godkänd återväxt är genom markberedning och plantering (Skogsstyrelsen 2022). Andelen skogsmark som har markberetts har under de senaste åren utgjort cirka 90 % av den totala förnygringsarealen (Martinsson 2022). Samtidigt rapporterar flera arbetsgivare att det har blivit allt svårare att hitta arbetskraft till markberedning och den fysiskt krävande manuella planteringen (Forsmark & Johannesson 2020).

Svårigheterna att rekrytera personal, tillsammans med ett ökat intresse för utveckling av skogsvårdsteknik, har lett till ny teknikutveckling inom skogsbruket. Målet är att öka produktiviteten och kvaliteten genom bland annat fjärrstyrd och automatiserad skogsvård. I dagsläget pågår pilotprojekt där markberedning och plantering sker autonomt med hjälp av självkörande maskiner (Hansson et al. 2024). När arbetet utförs autonomt ökar behovet av information om den omgivande miljön. Maskinerna behöver information om terräng och markens egenskaper för att avgöra var det är lämpligt att markbereda och plantera.

För att möjliggöra optimal förnygring med autonoma maskiner krävs ny teknik som med hög precision kan detektera markens egenskaper vid markberednings- och planteringsstillfället. För närvarande saknas det enkla och effektiva verktyg inom skogsbruket för att bedöma skogsmarkens beskaffenhet när det gäller block- och stenförekomst, textur och bärighet. Teknik för snabb och korrekt bedömning av var det finns stenar kan hjälpa till att förbättra precisionen vid maskinell plantering, då stenträffar har stor betydelse för produktiviteten vid maskinell plantering (Ersson et al. 2018).

1.2 Markradar

Markradar är en etablerad teknik som används för att ta reda på vad som finns under marken, idag främst i samband med nybyggnation och arkeologiska tillämpningar. Metoden används för att detektera och visualisera strukturer under markytan genom att sända ut elektromagnetiska pulser. Med hjälp av en markradarsändare skickas elektromagnetisk energi via en antenn ner i marken. Beroende på vilken typ av objekt energin träffar kan den antingen reflekteras, brytas eller spridas. En mottagarantenn används för att detektera de variationer som uppstår då den utsända energin träffar olika ytor och objekt. Det kan exempelvis handla om större stenar, block, hållar, sprickor och hålrum. De ekon som mottagarantennen detekterar visualiseras som bågar i ett radargram. Markradarns nedträngningsdjup beror på markens förmåga att transportera elektriska laddningar samt markradarns egenskaper och inställningar. Massiva torra material som granit, kalksten och betong samt torra sandiga jordar har större nedträngningsförmåga jämfört med leriga jordar och material med hög elektrisk konduktivitet (Andersson & Johannesson 2019).

1.3 Markradar inom skogsbruket

Markradar och dess potential att bedöma skogliga parametrar har under de senaste 20 åren blivit ett vanligare forskningsområde. De två områden som har undersökts är geologisk kartläggning av markstruktur och kartläggning av trädens rotsystem (Lorenzo et al. 2010). I en studie för att mäta skogsmarks blockighet och stenförekomst utförd av Skogforsk fann man att markradar innehar potential att skilja mellan större strukturer i marken. I radargrammen från markradarmätningar på olika marktyper kunde hållar, större stenblock och skillnader i skogsmarkens vatteninnehåll urskiljas. Studien visar även att dagens markradarutrustning och de inställningar som användes vid försöket inte har möjlighet att urskilja stenar mindre än 40 mm (Andersson & Johannesson 2019). I en studie där man undersökte markradars potential att mäta jorddjup i stenig skogsmark drogs slutsatsen att markradar skattar jorddjupet med högre precision jämfört med traditionella metoder där jordsond används (Sucre et al. 2011). Det ger således säkrare uppgifter om ståndorten vilket kan användas vid val av trädslag och skogsskötselmetoder. Vid inventering av jorddjup i stenig skogsmark visade studien dessutom att markradarmätning var 70 % mer kostnads- och tidseffektivt jämfört med att använda jordsond (Sucre et al. 2011).

I dagsläget sker bedömningen av planteringspunkter och förutsättningarna för en lyckad förnygring utifrån faktorer ovan mark. Kunskap om markens egenskaper,

såsom jorddjup, avstånd till grundvattenytan och blockighet, är bristfällig vid markberedning och plantering. En bättre förståelse av skogsmarkens egenskaper skulle ge bättre beslutsunderlag vid val av skogsskötselåtgärder och markberedningsmetoder, vilket i sin tur skulle möjliggöra effektivare arbete och högre kvalitet i utförandet (Andersson & Johannesson 2019). För närvarande finns endast manuella metoder för att uppskatta förekomsten av block i marken. Denna metod ger inte information om blockens storleksfördelning eller variation under markytan. För autonom markberedning och plantering innebär det en risk för stenträff, vilket medför att markberedningsaggregatet inte kan markbereda och sätta en planta. Detta innebär också att markskador kan uppstå samtidigt som produktiviteten sjunker. Genom ökad kunskap om markens förhållanden under markytan kan mer optimala planteringspunkter väljas med hänsyn till plantans överlevnad och tillväxt (Hansson et al. 2024).

Under år 2021 initierade Skogforsk ett projekt för att etablera ett marklaboratorium med känd variation i marktextur, stenförekomst och blockighet. Projektets syfte var att under kontrollerade förhållanden kunna testa och utvärdera markradarteknik för tillämpningar inom skogsbruket. Skogforsk identifierade flera centrala frågor som behövde undersökas, såsom den minsta detekterbara storleken på stenar samt teknikens funktionalitet på finkorniga och fuktiga marktyper.

1.4 Syfte

Syftet med detta arbete är att utveckla en metod för att skapa referensdata som kan användas till att utvärdera markradarteknik. Målet är att utifrån digitala bilder ta fram tredimensionella modeller som beskriver markprofiler med kända markegenskaper. Genom att modellera markens sammansättning, blockighet och stenstorlek kan informationen användas som referensdata vid utvärdering av radarteknik. Modellerna ska bidra till framtida forskning där kunskap om markens underliggande förhållanden är nödvändig.

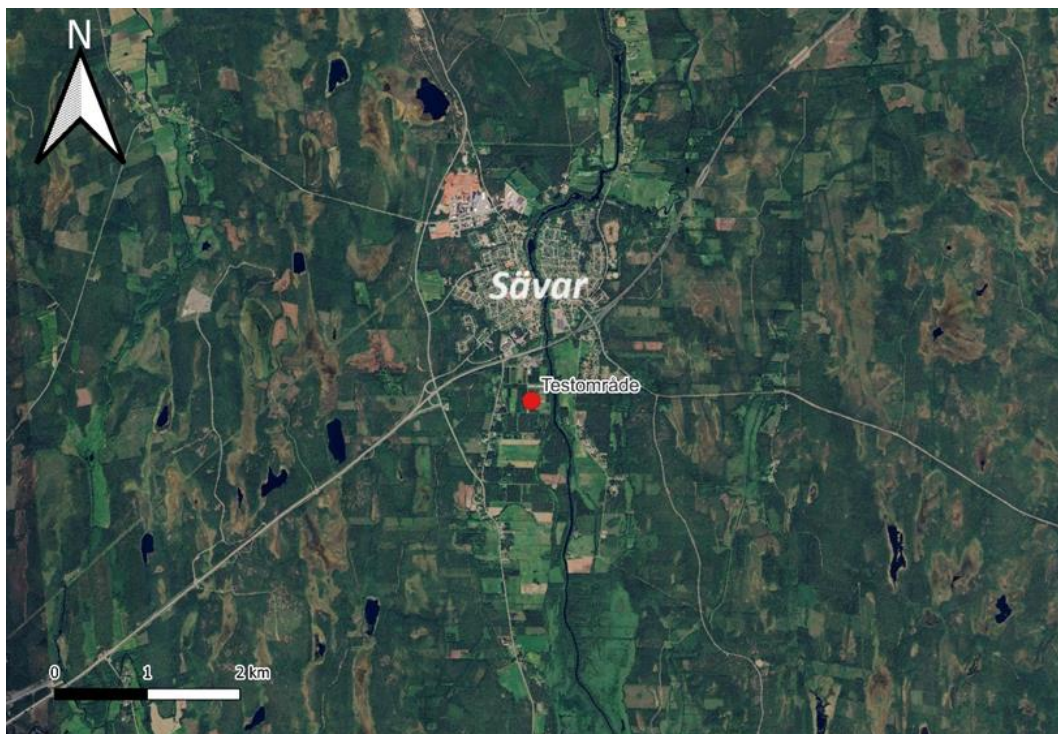
Kandidatuppsatsen fokuserar på att utveckla en metod som svarar på följande frågeställningar:

- Hur kan digitala bilder tagna med vidvinkelobjektiv behandlas för att korrigera linjeförvrängningar?
- Hur kan fältmätta referenspunkter användas för att tilldela digitala bilder geografisk information?
- Hur kan tredimensionella modeller som beskriver markegenskaper skapas?

2. Metod

2.1 Geografisk placering

För att skapa ett testområde för utvärdering av markradarteknik valdes en plats där markens sammansättning och egenskaper noggrant kunde dokumenteras. Testområdet är lokaliserat på Skogforsks fastighet i Sävar, Umeå kommun (Figur 1).



Figur 1. Kartbild över testområdets geografiska position, 772218.35,7096811.52 SWEREF 99 TM.

År 2021 anlades tio gravar på testområdet med dimensionerna $10 \times 2 \times 1,5$ m (Figur 2).



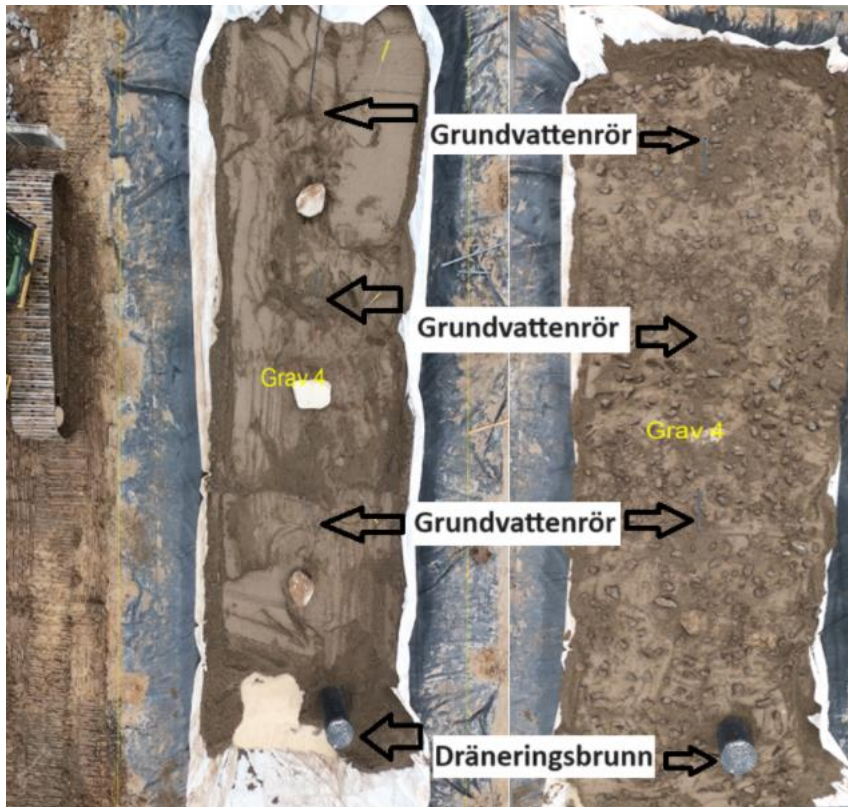
Figur 2. Satellitbild över marklaboratoriet på testområdet i Sävar. Varje grav har ett nummer samt en färgad konturlinje som beskriver gravens innehåll enligt Tabell 1.

Gravarna fylldes till marknivå med olika jordarter, block och stenar. Kornstorleksfördelning valdes för att efterlikna olika marktyper som är representativa för den svenska skogsmarken. Varje grav fylldes med ett eller två lager i varierande tjocklek av olika sammansättningar enligt Tabell 1.

Tabell 1. Sammanställning av gravarnas innehåll. Varje grav innehåller en eller flera jordarter samt ett visst antal block och/eller stenar.

Gravnummer	Innehåll		
	Jordart	Antal block (200–500 mm diameter)	Antal stenar (90–200 mm diameter)
9	Morän	10	0
10	Morän	45	0
5	Morän	3	319
8	Sand	6	0
3	Sand	48	0
4	Sand	3	523
6	Mjåla	6	0
7	Mjåla	64	0
2	Mjåla	3	312
1	Mix	0	0

I samband med att gravarna fylldes med material togs digitala bilder av varje lager för att dokumentera innehållet (Figur 3).



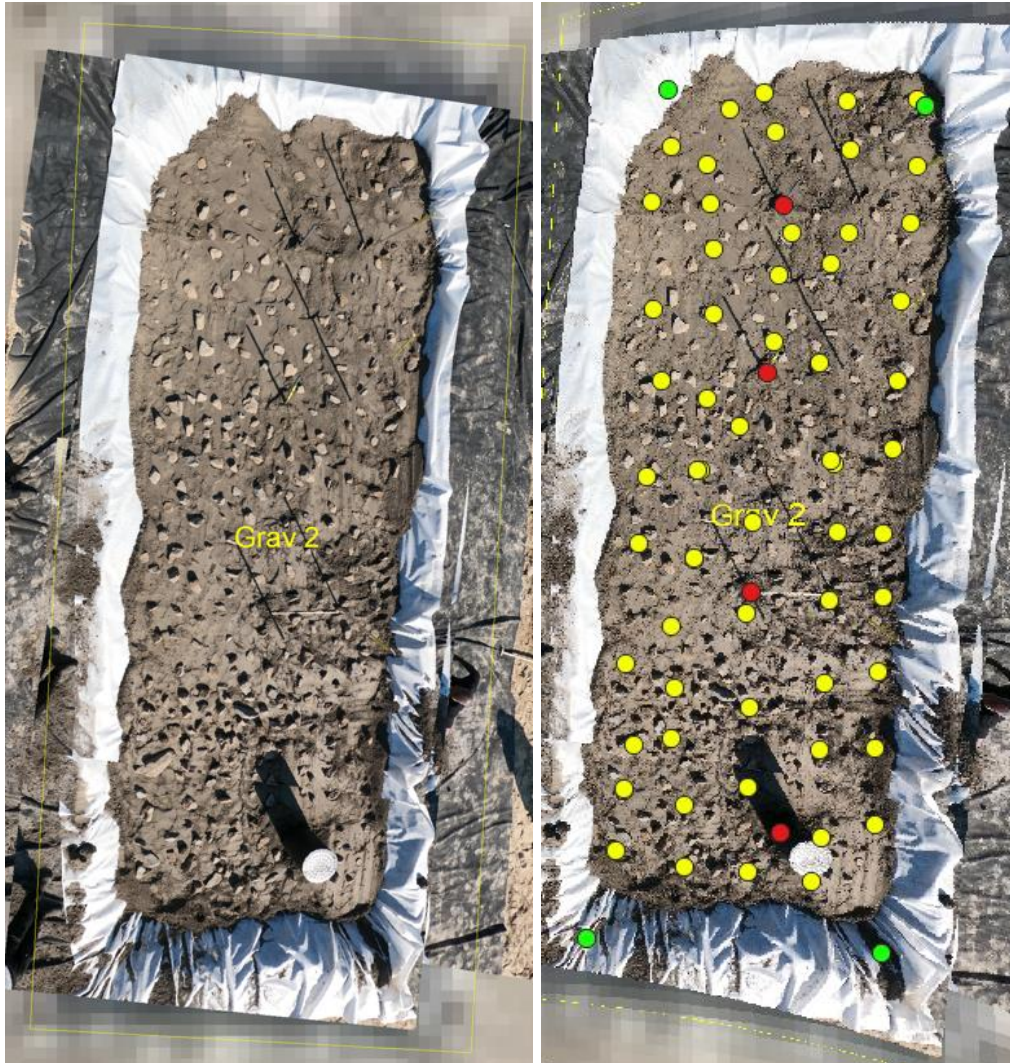
Figur 3. Bilder från lager 1 och lager 2 i grav nummer 4. Till vänster i bild syns lager 1 med block (ca 500 mm i diameter) och till höger i bild syns lager 2 med sten (90-200 mm i diameter). Foto: Skogforsk.

I varje grav fastställdes den geografiska positionen för hörnpunkter, grundvattenrör, dräneringsbrunn samt vissa av de större blocken och stenarna. Utsättningen genomfördes med globalt navigationssystem (GNSS) och relativ bärvågsmätning i realtid (RTK) för att säkerställa hög noggrannhet i mätningarna. En GNSS-mottagare är ett instrument som används för att ta emot och bearbeta signaler från ett eller flera globala navigationssystem och utifrån dessa signaler bestämma exakt position för en punkt (Lantmäteriet u.å.). Nätverks-RTK innebär att ett nätverk av referensstationer används för att möjliggöra positionering med mätosäkerhet på centimeternivå (Lantmäteriet u.å.). Syftet med mätningarna var att fastställa referenspunkter som senare kan användas för att korrekt placera bilden på jordytan.

2.2 Utveckling av referensdata

För att skapa referensdata för utvärdering av markradar utvecklades en ny arbetsmetodik. Arbetet utgick från tillgänglig information i form av digitala bilder av gravarna samt koordinatsatta referenspunkter från fältmätningar. De digitala bilderna saknade geografisk information samt togs med ett vidvinkelobjektiv, vilket kan leda till linsförvrängningar närmast kanterna av bilden där raka linjer kan bli böjda och objekt kan se förvrängda ut.

Ett första steg i arbetet blev att korrigera linsförvrängningar och ge bilderna korrekt geografisk position. Detta åstadkoms genom att använda geografiska informationssystem (GIS) för att georeferera bilderna med hjälp av de GNSS-koordinater som samlades in vid anläggningen av gravarna. GIS är en teknik för insamling, lagring, analys och presentation av geografisk information. Genom att använda programvaran QGIS kunde bilderna kopplas till specifika geografiska platser. Georeferering innebär att geografiska koordinater associeras med en punkt i bilden. Genom att relatera objekt i bilden till de geografiska positionerna som mättes ut vid varje grav med GNSS kunde bilderna justeras för att motverka de förvrängningar som vidvinkelobjektivet gett upphov till. Desto fler geografiska koordinater som kopplades till objekt i bilden, desto högre noggrannhet kunde uppnås vid placeringen av bilden på jordytan. De fältmäta punkterna fungerade som referensram för att korrigera förvrängningar i bilderna, såsom böjda linjer. Eftersom varje bild hade minst åtta referenspunkter kunde en transformationstyp som tar hänsyn till krökningar och förvrängningar användas. Transformationstypen tillåter bilden att tänjas olika mycket i olika riktningar för att på bästa sätt stämma överens med referenspunkterna (Figur 4).



Figur 4. Till vänster bild från grav 2 utan georeferering. Till höger bild från grav 2 som georefererats genom att relatera kända geografiska referenspunkter av stenar (gult), hörnpunkter (grönt) samt grundvattenrör och dräneringsbrunn (rött) till motsvarande plats i bilden

När bilderna hade placerats på korrekt geografisk position med hjälp av referenspunkter kunde den geografiska positionen för återstående stenar och block fastställas med hjälp av QGIS (Figur 5).



Figur 5. Bild från grav 2 där stenar som mätts in i fält och använts som referenspunkter visas i gult. Stenar som i efterhand har tilldelats geografisk position via GIS visas i blått.

Vid inmätning av objekt i fält samt vid koordinatsättning i QGIS användes referenssystemet SWEREF 99 TM. SWEREF 99 TM är ett specifikt referenssystem som används i Sverige för att definiera positioner på jordytan.

Genom QGIS inbyggda verktyg "fältkalkylator" kunde koordinaterna för respektive sten och block genereras och sparas i attributtabeller. När samtliga stenar och block hade tilldelats geografisk position sammanställdes informationen i ett kalkylblad. Information om positionen för stenar, block, grundvattenrör, dräneringsrör och hörnpunkter angavs med koordinater (x,y,z). Resultaten från kalkylarket presenteras i Figur 6. För att ange det vertikala läget hos objekten beskrevs positionen genom att ange avståndet från marknivån i meter. Eftersom bilderna saknade referenspunkter för att beskriva den vertikala positionen hämtades information om objektens höjdsposition från konstruktionsritningar. Ritningar har alltid avvikelser från verkligheten, vilket kräver kompletterande information i efterhand. För att öka noggrannheten kring objektens avstånd från marknivån användes en metod där rillorna på dräneringsröret utnyttjades. Mellan varje rilla finns ett avstånd på 4 cm. Genom att observera bilderna (Figur 3) och räkna antalet rillor kunde djupet för olika objekt beräknas.

För att visualisera resultatet från kalkylbladet användes datorstödd design. Computer-Aided Design (CAD) innebär att datorer används för att skapa och modifiera modeller i två- och tredimensionella rum. Kalkylbladet med information om respektive objekts geografiska position användes som underlag i CAD för att skapa och visualisera gravarna. I programvaran AutoCAD skapades gravarnas ytterlinjer, hörnpunkter, grundvattenrör, dräneringsbrunnar, stenar och block genom att ange objektens geografiska lägen och dimensioner. För stenar och block representerar koordinaterna objektets centrumpunkt. Storleken för stenar och block visualiserades genom att använda en schablonstorlek på en sfär för alla objekt i samma storleksklass enligt önskemål från Skogforsk. Resultaten från modellerna presenteras i Figur 7 och Figur 8. Metoden upprepades för samtliga tio gravar.

För att kontrollera hur väl modellerna överensstämmer med verkligheten jämfördes positionen för de modellerade stenarna med positionen för de stenar som blivit inmätta med GNSS i fält. Genom att jämföra positionen i det horisontella planet för respektive sten kunde metodens avvikelse visualiseras i Figur 9. Med hjälp av mätverktyg i QGIS mättes avståndet mellan de modellerade punkterna och de inmätta GNSS-punkterna och medelavstånd samt standardavvikelse beräknades. På grund av tidsbrist beräknades mätosäkerheten endast för två av gravarna. De två gravar som användes för att beräkna mätosäkerheten valdes subjektivt ut eftersom de ansågs utgöra ett representativt urval.

3. Resultat

3.1 Kalkylblad med geografisk information

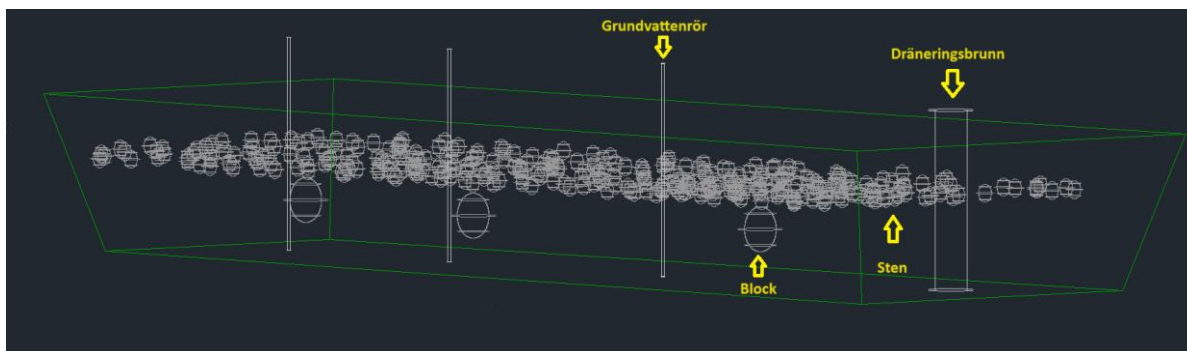
I Figur 6 presenteras resultatet av kalkylbladet för grav 2. Geografisk position för dräneringsbrunn, grundvattenrör, hörn samt sten och block återfinns i respektive kolumn. Liknande kalkylblad skapades för samtliga tio gravar.

Lager 1 block 200-500 mm diameter X,Y,Z	Lager 2 stenar 90-200 mm diameter X,Y,Z	Dräneringsbrunn 400 mm diameter X,Y,Z	Grundvattenrör 40 mm diameter X,Y,Z	Hörn marknivå X,Y	Hörn botten X,Y,Z	Fyllning Silt
772212.095,7096828.928,-0.880	772212.768,7096830.863,-0.520	772212.778,7096821.457,0.2	772212.37,7096824.69,0.5	772214.114,7096819.833	772211.57,7096830.74,-1.4	
772211.463,7096826.178,-0.880	772213.097,7096831.120,-0.520		772212.60,7096827.62,0.5	772210.179,7096820.040	772214.19,7096830.66,-1.4	
772211.769,7096822.858,-0.880	772212.581,7096831.381,-0.520		772212.81,7096829.86,0.5	772211.256,7096831.396	772213.81,7096820.38,-1.4	
	772213.478,7096831.375,-0.520			772214.701,7096831.191	772210.64,7096820.74,-1.4	
	772213.826,7096831.351,-0.520					
	772214.558,7096831.249,-0.520					
	772214.133,7096831.153,-0.520					
	772213.878,7096831.161,-0.520					
	772214.056,7096830.868,-0.520					
	772214.350,7096830.802,-0.520					
	772213.804,7096830.728,-0.520					
	772214.256,7096830.503,-0.520					
	772214.295,7096830.276,-0.520					
	772213.277,7096830.511,-0.520					
	772212.987,7096830.487,-0.520					
	772212.411,7096830.624,-0.520					
	772212.315,7096830.961,-0.520					
	772212.057,7096831.233,-0.520					
	772212.010,7096830.728,-0.520					

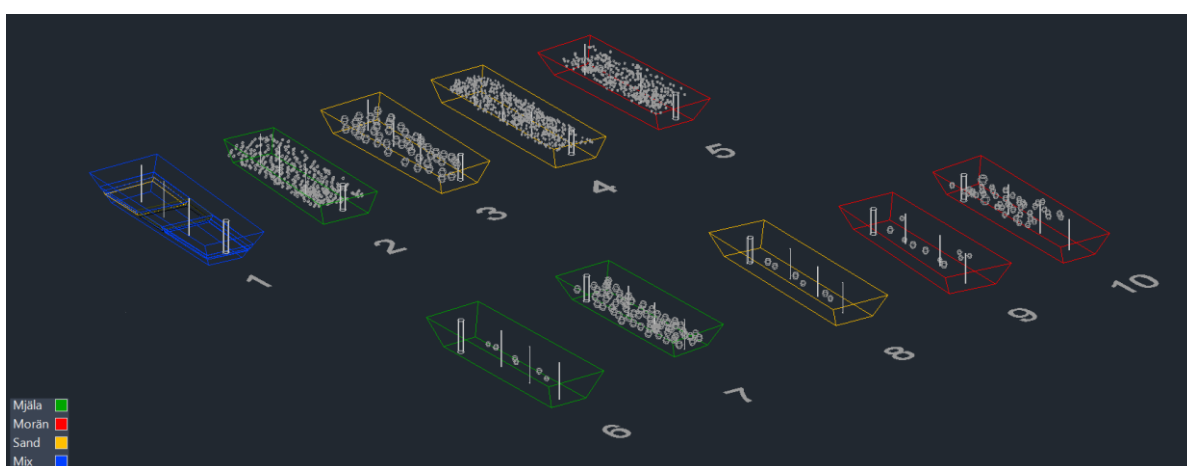
Figur 6. Sammanställning av information från grav 2. Varje kolumn innehåller geografisk information om objektets position. X-,Y-koordinat angivet enligt SWEREF 99 TM, Z-koordinat angiven som avstånd från marknivå i meter.

3.2 3D-modeller

3D-modell över grav 2 presenteras i Figur 7. Stenar och block visualiseras genom en sfär med schablonstorlek på 160 respektive 400 mm i diameter. Liknande modeller skapades för samtliga tio gravar (Figur 8).



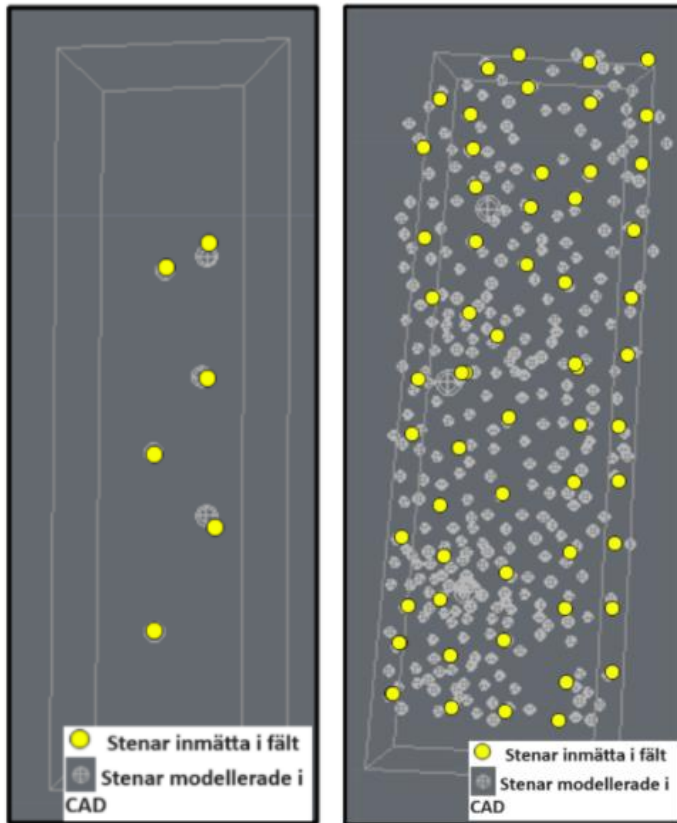
Figur 7. 3D-modell av grav 2. Modellen visar stenar, block, grundvattenrör, dräneringsbrunn och gravens ytterlinjer.



Figur 8. 3D-modell över samtliga tio gravar. Teckenförklaringen till vänster i figuren beskriver vilka fyllnadsmaterial som finns i gravarna. Schablonstorleken på blocken varierar mellan 200–500 mm i diameter och schablonstorleken på stenarna varierar mellan 90–200 mm i diameter.

3.3 Mätosäkerhet

I Figur 9 presenteras metodens mätosäkerhet för två av gravarna. Figuren visar avståndet i det horisontella planet mellan modellerade stenar och stenar inmätta i fält för grav 6 och 2. Medelavståndet beräknades till 110 ± 87 mm i grav 6 och 120 ± 68 mm i grav 2.



Figur 9. Fågelperspektiv över grav 6 till vänster, grav 2 till höger. Figuren visar avvikelsen i det horisontella planet mellan de modellerade stenarnas position och stenarnas faktiska position i fält. Avvikelsen beräknades till 110 ± 87 mm i grav 6 och 120 ± 68 mm i grav 2.

4. Diskussion

4.1 Utvärdering av metoden

I detta arbete utarbetades en metod med syfte att skapa referensdata som kan användas för att utvärdera markradarteknik. För att svara på frågeställningarna utvecklades en metod som kan delas upp i tre huvudsakliga steg. I det första steget användes referenspunkter för att georeferera och transformera de digitala bilderna. Detta steg innebar att korrigera de största förvrängningarna som vidvinkelobjektivet gett upphov till, samtidigt som bilden tilldelades geografisk information. I det andra steget användes bilderna för att punktmarkera och inhämta koordinater för samtliga stenar och block i respektive grav. Informationen om alla stenar och blocks position sammanställdes i sedan i ett kalkylblad. I det sista steget användes kalkylbladet som underlag för att skapa de tredimensionella modeller som utgör referensdatat, vilket var målet med arbetet.

Markradar inom det svenska skogsbruket är ett relativt nytt forskningsområde där det saknas tidigare studier och metoder för att utvärdera radar tekniken. Målet med rapporten är att i samarbete med Skogforsk öka kunskapen om markradar genom att ta fram en metod som genererar referensdata som kan användas inom radarforskningen. Vid uppstart av arbetet fanns en vision om hur resultatet från de tredimensionella modellerna skulle se ut, men det saknades ett tydligt arbetssätt. Arbetsprocessen har därför bestått av en iterativ metod som tillåter ständiga förbättringar och justering baserat på tidigare resultat och återkoppling. Metodutvecklingen har baserats på en arbetsmetodik där arbetet kontinuerligt har testats, förbättrats och gjorts om till dess att arbetet uppnått godtagbart resultat. Eftersom arbetet är utfört i samarbete med Skogforsk har arbetet anpassats för att uppfylla de specifikationer och krav på exempelvis noggrannhet som Skogforsk har önskat. I detta fall hade Skogforsk en tolerans på 200 mm vilket innebär att resultatet ligger inom de krav som ställts. Metoden utgår även från specifika förutsättningar där digitala bilder och fältmätta referenspunkter måste finnas tillgängliga. Vid användning av metoden bör därför hänsyn tas till de specifika förutsättningar och krav som finns.

Tillförlitligheten på referensdatat varierar till följd av ingångsdatats varierande kvalitet. Kvaliteten på ingångsdatat har varierat mellan respektive grav beroende på antalet referenspunkter som mätts ut vid anläggning av varje grav, samt kvaliteten på de digitala bilderna. För att mäta tillförlitligheten på referensdatat beräknades medelavståndet och standardavvikelsen som metoden gav upphov till för två av gravarna. Gravarna valdes subjektivt ut för att uppskatta en representativ mätosäkerhet. Avvikelsen beräknades till 110 ± 87 mm i grav 6 och 120 ± 68 mm i grav 2. Kontrollen av referensdatats precision utfördes endast i två gravar vilket innebär att avvikelsen i resterande gravar är okänd. Eftersom samma metod har använts för alla gravar är det sannolikt att avvikelsen för resterande gravar ligger i samma storleksordning.

Av de två gravar som använts för att beräkna mätosäkerheten har grav 6 lägst medelavstånd mellan de modellerade stenarna och de fältmätta stenarna. I grav 6 ligger referenspunkterna centrerade i mitten av bilden, till skillnad från grav 2 där referenspunkterna är jämnt utspridda över hela bilden. Enligt teorin ger fler referenspunkter som är jämnt utspridda över hela området en högre säkerhet (Understanding Raster Georeferencing 2018) vilket skulle kunna förklara den lägre standardavvikelsen i grav 2. Hur många stenar och block som koordinatsattes varierar mellan gravarna. I vissa gravar koordinatsattes alla stenar medan andra helt saknar koordinater för stenar och block. Anledningen till variationen beror på bristfälligt ingångsdata där vissa mätningar ej utfördes i fält. Detta innebär att noggrannheten på referensdata varierar mellan gravarna.

4.2 Felkällor och osäkerhet

Vid bearbetningen av ingångsdatat och framtagandet av referensdata har olika felkällor noterats som kan påverka resultatet och dess tillförlitlighet. En felkälla som bidragit med svårigheter i projektet är vidvinkelobjektivet som användes för att fota gravarnas olika lager. Kamerans böjda lins ger upphov till att bilderna blir förvrängda och att avstånden och skalan inte stämmer överens med verkligheten. Bilderna är också tagna från olika höjd och vinkel, varierande mellan 3 - 7 meter, vilket medför att graden av förvrängning varierar. Högre höjd och lägre vinkel ger upphov till mer förvrängning och innebär således att bilderna blir svårare att para ihop med de koordinatsatta referenspunkter som använts för att georeferera bilderna. I de gravar där fler koordinatsatta referenspunkter funnits tillgängliga har georefereringen utförts med högre noggrannhet än i de gravar med färre referenspunkter. Säkerheten i det framtagna referensdatat, alltså koordinaterna för de modellerade stenarna och blocken, beror därför på hur mycket bilderna har förvrängts och antalet referenspunkter som funnits tillgängliga.

En annan felkälla är att vissa bilder har varit avklippta och därför saknat referenspunkter, vilket resulterade i färre antal användbara referenspunkter för georeferering. En konsekvens av detta är att bildernas skalnlighet och överensstämmelse med verkligheten påverkas negativt (Understanding Raster Georeferencing 2018). Dessutom har bildernas kvalitet med avseende på upplösning och skuggning påverkat möjligheten att korrekt identifiera och skilja på objekt. Vid utmärkingen av stenar och block kan skuggor och strukturer i gravarnas fyllnadsmaterial misstagits för att vara stenar eller block och således gett upphov till fel i referensdatat.

Eftersom stenarna och blockens vertikala position inte kunde anges med hjälp av referenspunkter hämtades information om djupet från konstruktionsritningar. Dessa mått kontrollerades också genom att studera gravfoton och räkna antalet synliga rillor på dräneringsbrunnarna. Med vetskap om att avståndet mellan rillorna är 40 mm kunde djupet för de olika lagren uppskattas.

De framtagna 3D-modellerna beskriver storleken på stenar och block enligt en schablon. Schablonstorleken säger inget specifikt om storleken eller geometrin på enskilda objekt. Eftersom modellerna är skapade genom bilder tagna med fågelperspektiv saknas viss information om stenarnas form, i synnerhet de sidor som är vända mot underlaget. I metoden har en schablon för storlek och form som ligger nära stenarnas medeldiameter använts för att förenkla stenarnas geometri. När alla objekt presenteras med samma storlek kan modellerna inte längre användas som referensdata där noggrannheten kring geometrin på enskilda objekt måste kännas till. Syftet med arbetet är bland annat att skapa referensdata där markradar utvärderas för att undersöka minsta detekterbara sten. Som en konsekvens av detta blir det svårt att utvärdera vilken som är den minsta detekterbara storleken eftersom 3D-modellerna saknar information om enskilda stenars storlek. Ett sätt att öka modellernas noggrannhet är genom att visualisera varje sten och block genom att ange objektens hörnpunkter. Genom att använda fler punkter för att beskriva objekten kan en mer representativ modell skapas. Ökad noggrannhet av modellerna och referensdatat skulle på så vis möjliggöra utvärdering av markradar med högre upplösning.

4.3 Förbättringsområden

Under arbetets gång har olika förbättringsområden identifierats. Resultatets tillförlitlighet och metodens effektivitet hade kunnat utvecklas vidare genom att vidta ett antal åtgärder. Det främsta förbättringsområdet hade varit att framställa foton av högre kvalitet genom att exempelvis använda en kamera utan vidvinkelobjektiv. Ett alternativ hade varit att använda en drönare för att fota

gravarnas lager och utifrån dessa bilder skapa skalenliga ortofoton över gravarna. Ortofoton kan skapas av minst fem flygfoton som sedan sätts ihop till ett skalenligt foto utan lutning och förskjutning. Genom att skapa ortofoton hade effekten där det ser ut som att höga objekt som dräneringsbrunnarna och dräneringsrören ligger längs marken kunnat undvikas (Habib et al. 2007). Det hade möjliggjort högre noggrannhet vid georefereringen och koordinatsättning av stenar och block.

För att underlätta georefereringen av bilderna hade fler koordinatsatta referenspunkter ökat säkerheten i referensdatat och 3D-modellernas utseende (Understanding Raster Georeferencing 2018). Exempelvis hade gravarnas hörnpunkter både i det översta lagret och i botten kunnat markeras och koordinatsättas. Dessa punkter hade varit värdefulla för att erhålla högre noggrannhet vid både georefereringen och 3D-modelleringen i CAD. I samband med att referenspunkter för hörnpunkter mättes ut skulle hörnstolpar eller liknande markering kunna ha använts för att synliggöra exakt vart hörnkoordinaten är placerad.

Som nämnt tidigare orsakade bildernas varierande kvalitet och upplösning att möjligheten att identifiera och markera stenar och block försvårades. En möjlig metod för att undvika det problemet hade kunnat vara att markera stenar och block som använts med sprayfärg. Då hade även koordinatsatta stenar kunnat markeras med en speciell färg för att förtydliga vilken referenspunkt som tillhörde vilken sten.

För att erhålla så hög precision som möjligt i referensdatat hade det bästa varit att koordinatsätta alla stenar och block i respektive grav med tredimensionella x-,y-,z-koordinater i samband med att gravarna anlades. Det hade inneburit att man visste exakt plats på alla objekt i tre dimensioner. Denna metod skulle däremot kräva mycket och tidskrävande manuellt arbete i fält och mycket väntetid för anlita entreprenör vilket således innebär högre kostnader. Ett sådant tillvägagångssätt hade kunnat innebära att man först koordinatsätter gravarnas hörnpunkter och yttermått samt noterar djup i meter för respektive koordinatpunkt. Därefter koordinatsätts även dräneringsbrunn och grundvattenrör samt djup noteras. Dessa koordinater och mått tillsammans med koordinaterna för alla stenar och block skulle sedan kunna sammanställas direkt i en textfil som slutligen kan importeras som punktmoln till ett CAD-program för att visualiseras som tredimensionella bilder.

4.4 Implikationer av metoden

I samband med att referensdata används för att utvärdera markradarteknik ökar

förståelsen för vilka markegenskaper som kan detekteras med radarteknik. Referensdatat ligger till grund för att undersöka under vilka förhållanden tekniken kan användas för att hitta sten och objekt under marken. Om metoden är ekonomiskt lönsam skulle den kunna appliceras på autonoma maskiner avsedda för markberedning och plantering för att öka effektiviteten. Möjligheten att prediktera stenar leder till att planteringsröret placeras där det inte finns sten. Stenträff har stor betydelse för produktiviteten vid maskinell plantering och skulle därmed leda till en mer effektiv plantering (Ersson et al. 2018).

Ett annat sätt som referensdatat kan användas för att utvärdera radarteknik är inom flygburen radar av mark. Flygburen radar har tidigare använts för markkartering av markfuktighet inom jordbruket (Wu & Lambot 2022). Med validering från referensdata finns potential för flygburen markkartering att användas inom skogsbruket för att öka kunskapen om markens egenskaper. En metod där flygburen markkartering används för att optimera skötselåtgärder skulle redan nu kunna användas eftersom det kan appliceras på dagens maskinsystem. Det skulle ge bättre underlag för att välja och använda föryngringsmetoder som är anpassade efter traktens egenskaper.

En anledning till att validera markradarteknik är att öka upplösningen på terrängbeskrivningen som används vid föryngring och andra skötselåtgärder. Utifrån terrängbeskrivningen görs maskin- och metodval som är lämpliga för terrängen. Vid markberedning är blockkvot en faktor som beskriver hur många större stenar och block det finns mellan markens ytskikt och ned till 20 cm djup. Med en jordsond görs systematiska eller slumpmässiga mätningar för att klassificera blockkvoten genom att beräkna antalet nedstick mot hinder dividerat med totala antalet nedstick (Berg 1982). Jordsond är ett enkelt verktyg för att uppskatta andelen stenar och block, men ger ingen information om rumslig variation, storlek eller djup till stenar eller berggrund. Det kan därför vara motiverat att utveckla markradartekniken med hjälp av referensdata för att utveckla nya metoder för terrängbeskrivningar med mer information.

4.5 Framtida studier

För att markkartering med markradar ska bli användbart inom det svenska skogsbruket krävs att datainsamlingen är ekonomiskt lönsam och tekniskt möjlig. Studier som utreder huruvida markradarteknik kan leda till att skogsmarkens potential utnyttjas mer effektivt än aktuellt. Om tekniken visar sig ha produktionshöjande effekter som bidrar till ett mer rationellt och lönsamt skogsbruk innebär det sannolikt stora möjligheter för att vidareutveckla och anpassa tekniken till skogliga sammanhang.

Vilka behov som finns inom skogsbruket är också avgörande för vidareutvecklingen av markradarteknik. Eftersom trendutvecklingen inom dagens skogsbruk pekar mot att fjärranalys kommer bli en vanligare inventeringsmetod i framtiden, är det sannolikt att även flygburen markradar kan komma att användas för datainsamling kopplad till skogsmarkens egenskaper. Studier som utreder skillnaderna mellan datainsamling med flygburen och ytgående markradar är således ett aktuellt forskningsområde som kräver vidare studier.

Vilka krav som ställs på referensdatats upplösning vid utvärdering av markradarteknik kommer sannolikt att förändras i takt med att tekniken utvecklas och anpassas för skogliga ändamål. Vid behov av högre upplösning i referensdatat skulle denna studie kunna återupprepas genom att ta hänsyn till de felkällor och förbättringsområden som har noterats under arbetets gång. Referensdatat som har tagits fram med den metod som utvecklats i detta arbete skulle då också kunna jämföras med alternativa metoder som fotogrammetri eller generering av ortofoton för mer precis koordinatsättning av stenar och block.

4.6 Slutsats

I denna studie utvecklades en metod för att skapa referensdata som är nödvändig för markradarforskning och validering av markradarmätningar där kännedom om marken behövs. Metoden resulterade i textfiler och 3D-modeller som beskriver geografisk position för stenar och block i Skogforsks marklabb beläget i Sävar utanför Umeå. Under arbetets gång identifierades ett antal felkällor och förbättringsområden som bör tas i beaktning vid användning av denna metod. Huruvida metoden är kostnads- och tidseffektiv behöver utredas i framtida studier där alternativa metoder används. Vid användning av metoden bör arbetet alltid utgå ifrån vilka krav som finns på referensdatas kvalitet. I detta arbete utarbetades en metod för att uppnå specifika önskemål kring noggrannhet och visualisering. Den metodik som använts kan enkelt justeras eller utvecklas för att kunna användas till projekt med andra kravspecifikationer.

Referenser

- Andersson, M. & Johannesson, T. (2019). Mätning av skogsmarkens blockkvot med markradar. [Measurement of boulder fraction in forest land by ground radar]. Skogforsk Arbetsrapport. 1016-2019. https://www.skogforsk.se/cd_20190701103727/contentassets/179a68f96dc94f5b87ab4f54c1ae7a59/arbetsrapport-1016-2019.pdf (Hämtad 2024-05-15).
- Berg, S. (1982). *Terrängtypsschema för skogsarbete*. Forskningsstift. Skogsarbeten. <https://www.skogforsk.se/contentassets/dd0282d1b35c4fe88f210b088f02b486/terrangtypschema.pdf> (Hämtad 2024-05-15).
- Ersson, B.T., Laine, T. & Saksa, T. (2018). Mechanized Tree Planting in Sweden and Finland: Current State and Key Factors for Future Growth. *Forests*, 9 (7), 370. <https://doi.org/10.3390/f9070370> (Hämtad 2024-05-16).
- Forsmark, V. & Johannesson, T. (2020). Skogsvårdsföretagens rekrytering. [Forestry company recruitment]. Skogforsk Arbetsrapport 1039-2020. https://www.skogforsk.se/cd_20200213104712/contentassets/5a02e26f45644279b7a4651f98c8c8dbf/arbetsrapport-1039-2020.pdf (Hämtad 2024-05-15).
- Lantmäteriet (u.å). *GPS och satellitpositionering*. <https://www.lantmateriet.se/sv/geodata/gps-geodesi-och-swepos/GPS-och-satellitpositionering/> (Hämtad 2024-05-16).
- Habib, A.F., Kim, E.-M. & Kim, C.-J. (2007). New Methodologies for True Orthophoto Generation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73 (1), 25–36. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.1.25> (Hämtad 2024-05-16).
- Hansson, L.J., Sten, G., Rossander, M., Lideskog, H., Manner, J., Van Westendorp, R., Li, S., Eriksson, A., Wallner, A., Rönnqvist, M., Flisberg, P., Edlund, B., Möller, B. & Karlberg, M. (2024). Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 15 (2), 263. <https://doi.org/10.3390/f15020263> (Hämtad 2024-05-16).
- Lorenzo, H., Pérez-Gracia, V., Novo, A. & Armesto, J. (2010). Forestry applications of ground-penetrating radar. *Forest Systems*, 19 (1), 5–17. <https://doi.org/10.5424/fs/2010191-01163> (Hämtad 2024-05-16).
- Martinsson, M. (2022). Återväxternas kvalitet 2021-2022. Skogsstyrelsen. <https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/statistik/statistikfaktablad/jo0311-statistikfaktablad-atervaxternas-kvalitet-2022.pdf> (Hämtad 2024-05-15).
- Skogsstyrelsen (2022). *Avverkningsstatistik*. <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/statistik-efter-amne/avverkning/> (Hämtad 2024-05-15).
- Sucre, E.B., Tuttle, J.W. & Fox, T.R. (2011). The Use of Ground-Penetrating Radar to Accurately Estimate Soil Depth in Rocky Forest Soils. *Forest Science*, 57 (1), 59–66. <https://doi.org/10.1093/forestscience/57.1.59> (Hämtad 2024-05-16).
- Understanding Raster Georeferencing (2018). Esri. <https://www.esri.com/about/newsroom/arcuser/understanding-raster-georeferencing/> (Hämtad 2024-05-15).
- Wu, K. & Lambot, S. (2022). Digital Soil Mapping Using Drone-Borne Ground-Penetrating Radar. I: Di Mauro, A., Scozzari, A., & Soldovieri, F. (red.) *Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management*. Springer International

Publishing. 417–436. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_17 (Hämtad 2024-05-16).

Tack

Vi vill rikta ett tack till våra handledare Linnea Hansson och Henrik Persson som har bidragit med kunskap och vägledning genom arbetet. Vi vill även rikta ett tack till Mikael Andersson och Anders Rowell på Skogforsk som har bidragit med idéer och hjälp då vi stött på problem.

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- <https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316>.

JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.