

Kartläggning av palsars inre struktur med hjälp av georadarteknik, i Vissátvuopmi, Sverige



**Julia Cederbrant
Cornelia Wing**

**Degree of Bachelor of Science
with a major in Geography
15 hec**

**Department of Economy and Society, Human Geography &
Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
2019 B-1054**

Faculty of Science



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

UNIVERSITY OF GOTHENBURG
Department of Economy and Society, Human Geography &
Department of Earth Sciences
Geovetarcentrum/Earth Science Centre

Kartläggning av palsars inre struktur med hjälp av georadarteknik, i Vissátvuopmi, Sverige

**Julia Cederbrant
Cornelia Wing**

ISSN 1400-3821

**B1054
Bachelor of Science thesis
Göteborg 2019**

Mailing address
Geovetarcentrum
S 405 30 Göteborg

Address
Geovetarcentrum
Guldhedsgatan 5A

Telephone
031-786 19 56

Geovetarcentrum
Göteborg University
S-405 30 Göteborg
SWEDEN

Sammanfattning

Palsar är en unik företeelse begränsat till Arktis ytterkanter där en frusen kärna genom issegregation och tjällyftning bildar en upphöjning i torvmyrar. Palsarealen i världen krymper och EU har utsett palsar till en av de mest hotade naturmiljöerna. För att förstå kopplingen mellan palsars degradering och klimatförändringar behövs mer dokumentation av palsars inre struktur. Syftet med detta arbete är att genom georadarteknik undersöka en flakpals och en kupolpals inre struktur i Vissátvuopmi samt deras degradering. Antenner med olika MHz-frekvens kommer användas för att undersöka hur lager i två olika palsars inre struktur ser ut och med vilken frekvens de blir tydligast. Vid tidigare forskning har vanligtvis en antenn använts vilket har lett till begränsningar i tolkningen av materialens utbredning. Ur georadarundersökningen skapades radargram utifrån olika profiler i två olika tolkningssteg. Reflektorer markerades ut och tolkades utifrån tidigare forskning av palsar samt kunskap om det specifika studieområdet. I radargrammen kunde lager av snö, torv, silt med issjösediment, islinser, morän samt tjäl- och permafrostbas urskiljas men med olika upplösning beroende på antenn. Antennen med en frekvens på 800 MHz visar snö och torv på ett tydligt sätt men för att se hela palsens inre struktur är en kombination av 500 MHz och 250 MHz det bästa alternativet. Georadarundersökningen tillsammans med degraderingsmönster visade att de två undersökta palsarna befinner sig i ett moget stadium där de har börjat att kollapsa. De två palsarna har degraderats i högre grad än resterande palsar i Vissátvuopmi där flakpalsens yta har minskat något mer och snabbare än kupolpalsens. I ett klimat med ogynnsamma förutsättningar för palsbildning riskerar palsar att försvinna i framtiden.

Nyckelord: Palsar, georadar, palsdegradering, palsmyr, permafrost.

Abstract

Palsas are unique features limited to the boundaries of the Arctic, where a frozen core through ice segregation and buoyancy forces an uplift in peat mires. The area of palsas in the world is decreasing and the EU has named palsa mires one of the most threatened environments. To fully understand the connection between degradation of palsas and climate change, more documentation of the inner structure is needed. The aim of this project is to investigate the inner structure of palsas and their degradation in Vissátvuopmi through ground penetrating radar (GPR). Antennas with different MHz frequencies are used to evaluate how layers in two selected palsas appear and with which frequency they are distinguishable. Previous research has been using only one antenna which have led to limitations in the interpretation of the materials. Radargrams along several profiles on the palsas were created through the GPR investigation and interpreted in two steps. Reflectors were marked on the radargram and an interpretation was made based upon previous research and knowledge about the area. Layers of snow, peat, silty glaciolacustrine sediments, ice lenses, morain, ground frost and permafrost were visible in the radargrams depending on the resolution of the antenna. The antenna with 800 MHz showed snow and peat in a good way but to clearly see the inner structure of a palsa a combination of 500 MHz and 250 MHz is favorable. The GPR survey combined with degradational patterns showed that the two palsas are in a mature stage where they have begun to collapse. The two palsas have been degraded at a faster pace than other palsas in Vissátvuopmi where the palsa plateau have been slightly more degraded and in a faster pace than the palsa dome. In a disadvantageous climate for palsa formation, palsas are at risk of disappearing in the future.

Key words: Palsas, ground penetrating radar, degradation of palsas, palsa mire, permafrost.

Förord

Genom institutionens fokus på palsar och behovet av ökad kunskap inom området blev vi inspirerade att bidra med ytterligare en pusselbit till förståelsen av palsar. Detta intresse gjorde att vi valde att skriva denna kandidatuppsats i Geografi under vårterminen 2019 om just palsar och deras inre struktur. Arbetet började med fältarbete i en vecka där resultatet av undersökning sedan skrevs av oss båda.

Många personer, framförallt i vår klass, har varit involverade i detta arbete och givit oss värdefull återkoppling under arbetets gång. Vi vill tacka dessa personer samt Professor Sofia Thorsson som har hjälpt oss att strukturera arbetet på bästa sätt. Dessutom vill vi också tacka Professor Sofia Thorsson och Universitetslektor Jonas Lindberg för en väl genomarbetad och väldigt givande examenskurs. Vi är också tacksamma för stipendiet från Geografiska Föreningen som gjorde vår fältresa möjlig.

We would like to thank Madison Foot for the exceptional work with the GPS and for the lovely company during the week in Saarikoski.

Ett stort tack riktas också till vår biträdande handledare Professor Erik Sturkell och Andrea Håkansson för att ni har svarat på alla våra frågor om georadar och ReflexW.

Sist, men definitivt inte minst, vill vi tacka vår handledare Universitetslektor Mats Olvmo för all hjälp under fältarbetet samt stöttning under arbetets gång. Utan ditt brinnande intresse hade vi nog aldrig förstått hur spännande palsar faktiskt är!

27/5-2019

Julia Cederbrant och Cornelia Wing

Innehållsförteckning

| | |
|---|----|
| Sammanfattning | 2 |
| Förord..... | 4 |
| 1.1 Bakgrund..... | 6 |
| 1.2 Syfte och frågeställningar..... | 8 |
| 2. Kunskapsöversikt..... | 9 |
| 2.1 Förutsättningar för palsbildning | 9 |
| 2.2 Palsars livscykel..... | 11 |
| 2.3 Olika palstyper och deras inre struktur..... | 13 |
| 2.4 Palsars degradering och klimatförändringar..... | 13 |
| 3. Studieområde | 15 |
| 3.1 Vissátvuopmi | 15 |
| 4. Metod..... | 17 |
| 4.1 Georadar..... | 17 |
| 4.1.1 Tillvägagångssätt vid flakpals..... | 19 |
| 4.1.2 Tillvägagångssätt vid kupolpals | 22 |
| 4.1.3 Bearbetning av georadardata..... | 23 |
| 4.2 GPS-hantering | 25 |
| 4.3 Bearbetning i GIS | 26 |
| 5. Resultat | 27 |
| 5.1 Radargram..... | 27 |
| 5.1.1 Radargram från flakpalsen i steg ett | 27 |
| 5.1.2 Radargram från flakpalsen i steg två | 30 |
| 5.1.3 Radargram från kupolpalsen i steg ett | 34 |
| 5.1.4 Radargram från kupolpalsen i steg två | 37 |
| 5.1.5 Gemensamma mönster och motivering till tolkning | 41 |
| 5.2. Palsdegradering..... | 42 |
| 5.2.1 Bildning av termokarstsjöar och sänkor | 45 |
| 6. Diskussion..... | 46 |
| 6.1 Resultatdiskussion..... | 46 |
| 6.2 Metoddiskussion | 49 |
| 6.3 Vidare forskning | 50 |
| 7. Slutsatser | 51 |
| 8. Källförteckning..... | 52 |

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Den globala uppvärmningen som sker till följd av antropogena utsläpp av växthusgaser leder till ett förändrat klimat som får olika effekter på olika platser på jorden. Den arktiska regionen är unik i många avseenden och i klimatsammanhang skiljer den sig då den värms upp mycket snabbare än andra områden (IPCC 2007). Enligt IPCC (2014) har den arktiska regionen en temperaturhöjning som är dubbelt så hög som det globala genomsnittet vilket leder till vissa geografiskt specifika problem. Ett av dessa problem är minskningen av permafrost och det är tydligt att systemen som tillhör permafrostområden håller på att förändras, varav ett är palsformation (Biskaborn et al, 2019). En pals är en upphöjning i torvmyrar där torven isolerar en frusen iskärna som drar åt sig vatten och därmed kan växa sig större (Zuidhoff & Kolstrup, 2000).

Det finns olika typer av palsar men gemensamt för alla är att tillväxten sker under vintersäsongen och på sommaren hindrar den torra torven värme från att tränga ner i marken (Kujala, Seppälä & Holappa, 2008). Palsar är framförallt belägna i områden med diskontinuerlig permafrost och system i dessa miljöer är extra känsliga för yttre påverkan från klimatet (Pengerud, Johnsen, Cécillion & Rasse, 2013). I många områden sker degraderingen av palsar snabbt och tillväxten av nya palsar kan inte kompensera för detta, vilket leder till att palsarealen i världen krymper (Borge, Westermann, Solheim & Etzelmüller, 2017). Huruvida detta är ett resultat av ett förändrat klimat eller en del av palsars livscykel är ännu inte helt klarlagt (Länsstyrelsen Norrbotten, 2017). Smältande palsar kan komma att ha en viss påverkan på klimatförändringarna i sig då mer metan släpps ut när marken blir vattenfylld (Pengerud et al, 2013). Palsområden räknas av EU:s habitatdirektiv som en av de mest hotade bioterna och ska därför vara prioriterade att skyddas (Naturvårdsverket Skog och Mark, 2015). Vissátvuopmi, som är studieområdet för denna undersökning, är det största sammanhängande palskomplexet i Sverige men trots detta görs inga specifika åtgärder för att skydda området (Länsstyrelsen Norrbotten, 2009).

Om en individ i ett ekosystem påverkas kan en kedjereaktion startas så att den kringliggande miljön förändras (Steffen et al., 2018). Enligt IPCC (2014) har ekosystemen i Arktis redan nått en brytpunkt där vissa förändringar är irreversibla. För att förstå palsars livscykel och hur de förändras över tid behövs förutom studier av rumsliga förändringar, mer kunskap om deras inre struktur som till exempel torvmäktighet, permafrostdjup och djup på aktivt lager (Calmels, Allard & Delisle, 2007). Palsars interna struktur är dock generellt sett okänd och bygger huvudsakligen på utvärderingar av borrhov och observationer i naturliga skärningar orsakade av blockerosion (Calmels, Allard & Delisle, 2008). Det finns även få studier som beskriver hur olika palstyper kan skilja sig åt, både i inre struktur men också i degraderingsmönster. Under senare år har georadar använts i ett fåtal studier för att undersöka palsars uppbyggnad men fortsatta karteringar behövs för att förstå hur palstyper skiljer sig åt (Kohout, Bučko, Rasmus, Leppäranta & Matero, 2014; Sjöberg, Marklund, Petterson & Lyon, 2015). Vid dessa tidigare studier har dock bara en antenn använts vilket skapar större svårigheter för korrekta tolkningar än om flera antenner används. I palsområden där stora förändringar har skett är det av stor vikt att undersöka varför och hur de kan komma att påverka framtiden. Genom georadar kan man, utan att störa palsens naturliga system, få en bild av den inre strukturen hos palsar och på så vis öka förståelsen om vad som påverkar palsens degradering vilket i dagsläget saknas tillräcklig kunskap om.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med detta arbete är att kartlägga den inre strukturen hos två palsar vintertid i Vissátvuopmi med hjälp av georadartechnik. Förutom att kartlägga den inre strukturen hos en kupolpals och en flakpals så kommer även skillnader i degraderingsmönster studeras. Degraderingen kommer att analyseras utifrån minskningen av palsyta efter flygfoton samt hur sänkor och termokarstsjöar har bildats vid palsarna. Att undersöka palsar med georadar skapar förutsättningar för att se lager av snö, torv, tjäl- och permafrostbas samt morän i en pals samt ha möjlighet att urskilja ett siltlager med issjösediment. Då tidigare forskning oftast utgått från en antenn vid georadarundersökningar är också syftet med detta arbete att se om antenner med olika upplösning kan skapa en bättre helhetsbild av palsars inre struktur. För att kunna besvara syftet har dessa frågeställningar använts:

- Hur ser en flakpals och en kupolpals inre struktur ut och finns det skillnader i uppbyggnad mellan de två typerna?
- Hur har respektive pals degraderats mellan åren 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 och 2016?
- Med vilken eller vilka MHz-frekvenser syns snö, torv, tjäl- och permafrostbas samt morän i palsarna som tydligast?

2. Kunskapsöversikt

2.1 Förutsättningar för palsbildning

Palsar är små platåer i torvmyrar med en frusen kärna som genom tjällyftning och issegregation växer sig större varje vinter. De syns i de arktiska landskapen på grund av sin tydliga upphöjning gentemot det omkringliggande landskapet och att vegetationen ändras från kärrmark till mosse när palsar bildas (Zuidhoff, 2003) (Figur 1). Torvmyrar täcker mer än 10 % av markytan i Arktis och många av dessa myrar är belägna i områden med sporadisk permafrost (Sjöberg et al., 2015). För att en frusen mark ska räknas som permafrost behöver den varit frusen under minst två år i rad medan tjälen tinar under sommaren (Dobinski, 2011). Att palsar finns vid utkanterna av Arktis permafrostområden beror på att de endast bildas när årsmedeltemperaturen ligger mellan -3° och -5°C och medelårsnederbörd är under 450 millimeter (Luoto, Fronzek, Zuidhoff, 2004). Det finns en känslighet för temperaturförändringar hos palsar eftersom marktemperaturen ofta ligger runt 0°C och en något högre temperatur motverkar en frysprocess (Zuidhoff, 2003). Torvens egenskaper vid olika klimatförutsättningar utgör en vital del för palsars uppkomst då torr torv har en låg värmekonduktivitet som skyddar iskärnan från smältning under den varmare sommarsäsongen (Wramner, 1973). När torven blir blöt och fryser under vinterhalvåret leds kylan lättare ner till palsens inre om snötäcket inte är för tjockt (Seppälä, 2006). Palsars tillväxt och degradering påverkas av snö och dess fördelning över palsen men också av regn och lufttemperatur (Kohout et al., 2014). Vind är en viktig faktor kopplat till snöns fördelning över palsen eftersom när snön blåser bort från en nybildad pals kan kylan tränga ner i marken och gynna palsens tillväxt (Figur 2) (ibid).



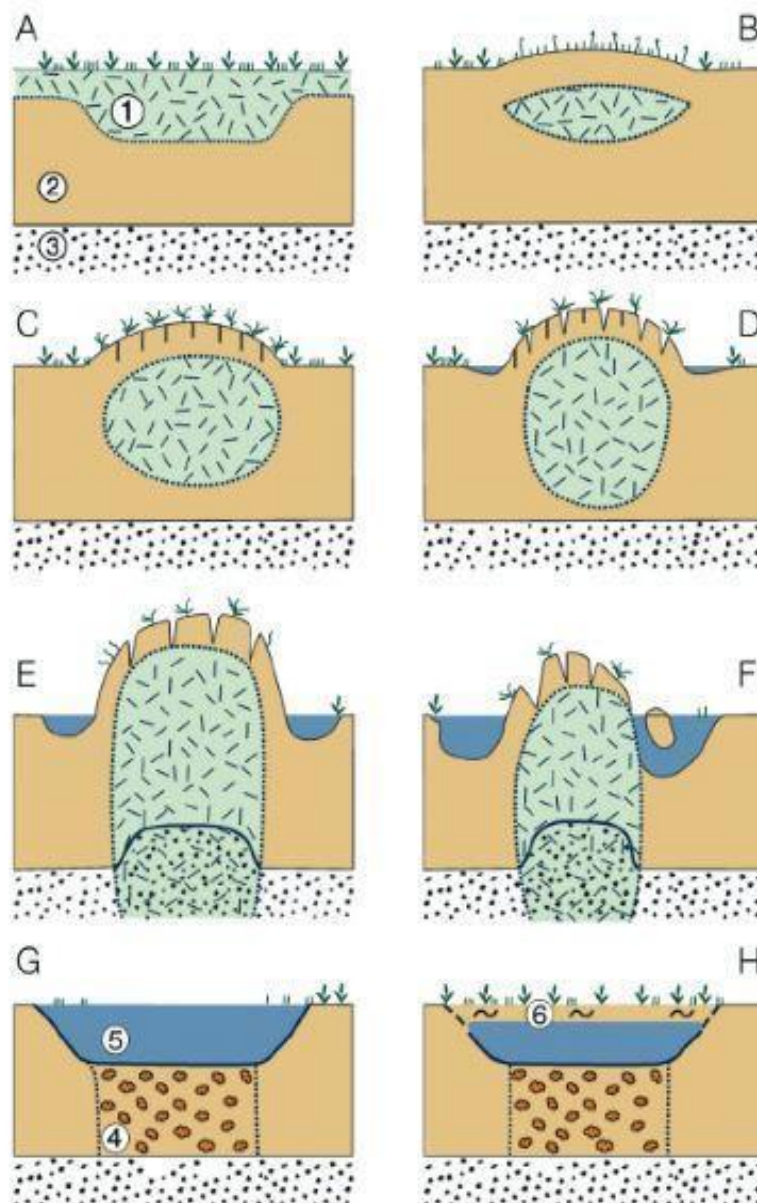
Figur 1: Drönbild över palsar i torvmarken sommartid, i Vissátvuopmi. Foto: Heather Reese

Figure 1: Drone image of palsas in peatlands in summertime, in Vissátvuopmi. Photo: Heather Reese

2.2 Palsars livscykel

Palsar påverkas av en mängd olika faktorer och ingår i ett komplext feedbacksystem (Sjöberg, 2015). Palsar utvecklas cykliskt (Seppälä, 2006) och har en livscykel på ungefär 100 år (Kohout et al., 2014). Förstadiet till en pals uppstår när snölagret på en torvmyr är ovanligt tunt vilket tillåter vinterkylan att tränga ner så pass långt i jorden att den inte hinner tina under sommarsäsongen (Figur 2A). Det behöver även vara ett tunt vegetationslager för att en ny pals ska bildas då vegetationen annars isolerar palsen från kylan (Zuidhoff, 2003). När förutsättningarna som dessa är rätt fryser porvattnet i torven och tjällyftning skapar en första upphöjning (Figur 2B) (Seppälä, 2011). Det frusna porvattnet byggs upp i palsen under flera år och denna process bildar en allt högre upphöjning (Figur 2C) (Seppälä, 2006). Efterhand når frosten ner till den underliggande mineraljorden där islinser kan skapas och palsen lyfts då ytterligare genom issegregation (Figur 2E) (Seppälä, 2011). Mineraljordens höga termiska konduktivitet gör att palsen i sitt mogna stadium löper risk att värmas underifrån och degraderas fortare om inte tillräckligt med kyla når ner i marken (Zuidhoff, 2002).

På palsen växer ofta dvärgbjörk (*Betula nana*) som trivs i den torrare miljö som bildas och växten blir högre allt eftersom palsen mognar. När den frusna kärnan i palsen växer pressas den upp mot torven och sprickor bildas (Figur 2D) (Zuidhoff, 2003). Palsars degradering sker ofta genom att sprickorna i torven blir tillräckligt stora för att värme ska kunna nå ner till iskärnan och smälta palsen. Det vanligaste är att sprickorna skapar uppdelningar i övre delen av palsen där torvblocken till slut faller ner på sidorna av palsen, vilket kallas blockerosion (Figur 2F) (Zuidhoff, 2002). Vid ett moget stadium börjar palsen få skarpa kanter där snö ofta ansamlas och hindrar vinterkylan från att tränga in samtidigt som det under sommaren skapas vattenansamlingar. Vind kan även erodera ner torven så att den isolerande förmågan sommartid minskar (Seppälä, 2003). När palsen sedan börjar att kollapsa bildas termokarstsjöar av smältvatten från palsarna, där förutsättningar för ny torv skapas (Figur 2G). Så småningom kan en ny pals bildas om de klimatologiska förutsättningarna stämmer (Figur 2H) (Seppälä, 2006).



Figur 2: En palsas livscykel. **A:** Förstadium där ytlagret är fruset. **B:** Frusen kärna täckt av ett torvlager. **C:** Palsembryo. **D:** Tillväxt av ung pals. Sprickor i torven börjar bildas. **E:** Mogen pals där frosten tränger ner till mineraljorden. **F:** Kollapsande pals. **G:** Termokarstsjö med nedbruten torv. **H:** Ny torv bildas. **1:** Fruset ytlager. **2:** Torv. **3:** Mineraljord. **4:** Nedbruten torv. **5:** Termokarstsjö. **6:** Nybildad torv. Seppälä (2006).

Figure 2: Life cycle of a palsa. **A:** Early stage where the surface layer is frozen. **B:** Frozen core covered by peat. **C:** Palsa embryo. **D:** Growth of a young palsa. Cracks in the peat begin to develop. **E:** A mature palsa where the frost reaches the mineral soil. **F:** Collapsing palsa. **G:** Thermokarstlake with decomposed peat. **H:** New peat is formed. **1:** Frozen surface layer **2:** Peat. **3:** Mineral soil. **4:** Decomposed peat. **5:** Thermokarstlake. **6:** Newly formed peat. Seppälä (2006).

2.3 Olika palstyper och deras inre struktur

Det finns flera typer av palsar som skiljer sig i storlek och form (Seppälä, 2006). Flakpalsar bildar vidsträckta plåtåer med oregelbunden form medan kupolpalsen bildar en mer eller mindre cirkulär upphöjning. Kupolpalsar är oftast betydligt högre än de kringliggande flakpalsarna (Olvmo et al., 2019). De två palstyperna har tydliga morfologiska skillnader men kan också skilja sig i sin inre struktur. Beroende på hur mycket palsarna skiljer sig inuti kan de komma att påverkas på olika sätt i sin degradering (Sjöberg et al., 2015). I en studie där georadar användes tillsammans med borrhov för att undersöka palsar låg torvbasen i genomsnitt i en flakpals cirka 0,72 meter ner i marken men som allra djupast vid 1,75 meter (ibid). I samma studie kunde permafrostbasen inte urskiljas med georadar men ett djup på permafrostbasen på ungefär 16 meters djup beräknades (ibid). I en undersökning gjord närmre Vissátvuopmi kunde permafrostbasen tydas på cirka 4 meter med hjälp av georadar (Kohout et al., 2014). Genom borrhov syntes även islinser som var upp till 20 centimeter tjocka (ibid) Permafrost finns endast under palsen och utanför den i kärmarken finns tjäle vintertid (Seppälä, 2006).

2.4 Palsars degradering och klimatförändringar

På många platser i Sverige har en minskning av palsareal kunnat ses och i en studie i Laivadalen hade den totala palsytan minskat med 50 % de senaste 50 åren, utan någon nybildning av palsar (Zuidhoff, 2003). Dock sker inte degradering i alla palsområden i Sverige och inte heller i samma takt vilket kan vara en indikator på att palsar ingår i ett komplext system som påverkas av en mängd olika klimatologiska, hydrologiska och geomorfologiska processer (Sjöberg et al., 2015). Under slutet av den lilla istiden, under 1800-talets andra hälft, fanns ett gynnsamt klimat för palsbildning i norra Sverige (Zuidhoff, 2003). I dagsläget finns en viss nybildning av palsar men denna del är ytterst marginell i förhållande till degraderingshastigheten (Länsstyrelsen Norrbotten, 2017). Nybildning av palsar är beroende av klimatologiska förutsättningar och eftersom allra norraste Sverige kommer att bli både varmare och få högre nederbörd finns relativt dåliga förutsättningar för palsbildning (Fronzek, Luoto & Carter, 2006).

Viss tidigare forskning ser en koppling mellan klimatförändringar och degradering av palsar, men för att kunna avgöra om och hur palsars degradering är kopplat till klimatförändringar behövs mer dokumentation (Zuidhoff, 2002). Redan i dagsläget har många permafrostområden och palsar i Arktisregionen börjat smälta. I en studie i Tavvavuoma, ett område nära Vissátvuopmi, visades att all permafrost här kan vara borta inom 175–260 år om man räknar med 2°C ökning i temperatur (Sjöberg et al, 2016). Med 2°C ökning i temperatur menar Sjöberg et al. (2016) att permafrosten minskar med cirka 6–8,5 centimeter i djup per år i detta område men permafrosten i många palsområden smälter snabbare än detta redan nu.

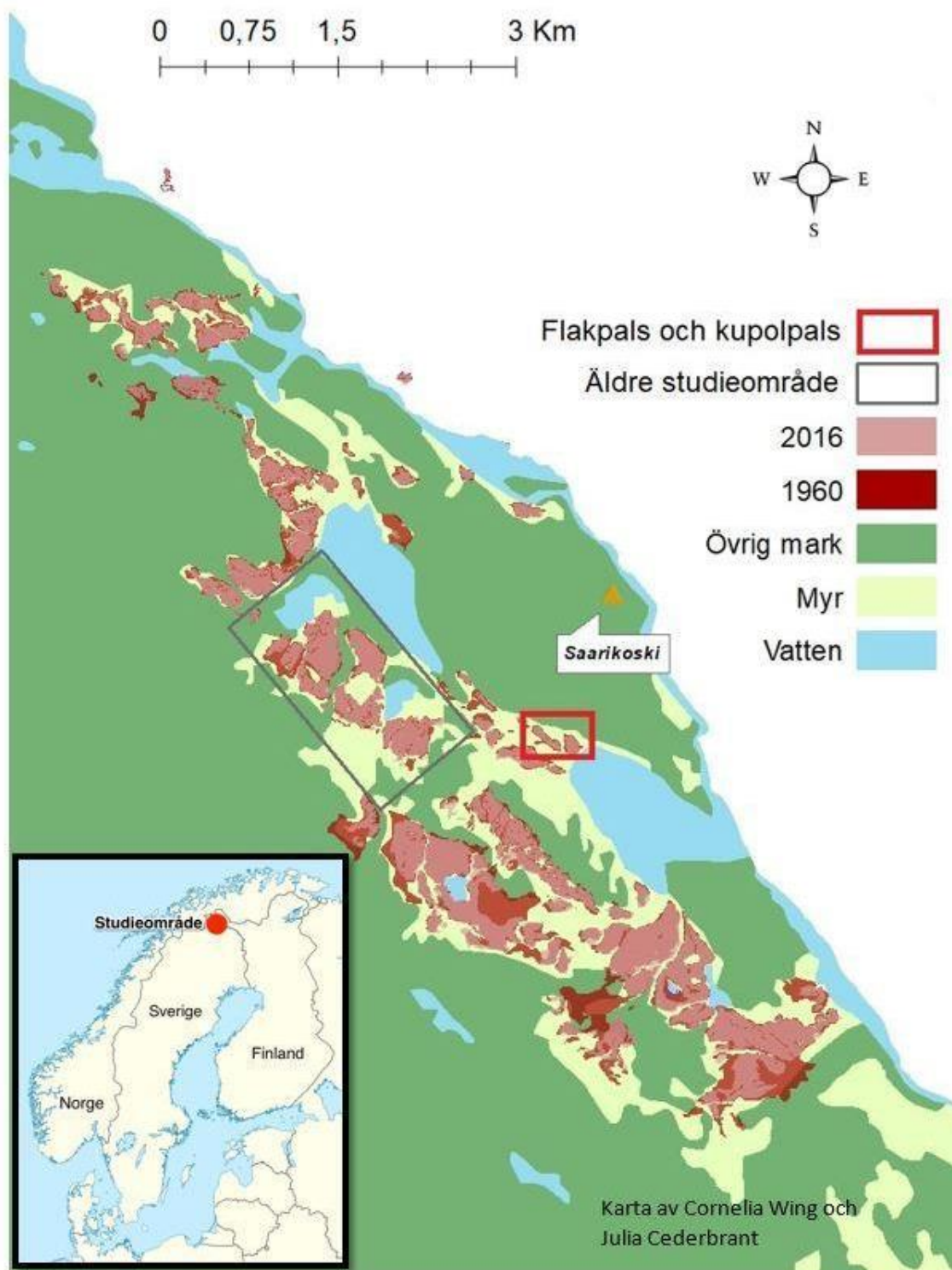
Framtida klimatförändringar med medförande global uppvärmning kan komma att amplifiera smältandet av permafrost i torvmarker. När permafrosten smälter blir torvmarker istället vattenfyllda och genom anaeroba bakterier i marken skapas metanutsläpp (Pengerud et al, 2013). Om många permafrostområden tinar samtidigt kan stora emissioner av metan leda till en pådrivning av klimatförändringarna då metan är en av de mest potenta växthusgaserna. Palsar kan alltså ha en förstärkande inverkan på den globala uppvärmningen om de smälter men har också möjligheten till en motverkande roll (Leifeld & Menichetti, 2018). Idag fungerar torvmarkerna i permafrostområdena som stora kolsänkor. För att kolet ska stanna i marken istället för att brytas ner till koldioxid som hamnar i atmosfären behöver marken marken förstätta vara syrefattig, genom att vara antingen frusen eller blöt (Ruppel, 2011).

3. Studieområde

3.1 Vissátvuopmi

Vissátvuopmi är ett myrområde beläget i norra Sverige utanför byn Saarikoski (68°48'14.3"N 21°14'43.8"E). Det finska namnet för palskomplexet är Vittankivuoma men för att vara konsekventa har det samiska namnet valts. Saarikoski ligger vid Könkämäälven längs den svensk-finska gränsen. Byn har endast ett fåtal invånare vilket gör att området har en liten direkt påverkan av mänskliga faktorer. Vissátvuopmi är det området i Sverige med högst palsareal per hektar och är ett av Sveriges största sammanhängande palskomplex (Länsstyrelsen Norrbotten, 2009). Palsmyren, på cirka 450 meter över havet, är en blandmyr med torr kärrvegetation och rismyr. Den omges av högre mestadels moräntäckta berg 500–600 meter över havet. I övrigt är området till stor del flackt med undantag från palsupphöjningar som sticker upp ur myren. Inom området finns både de vidare och mer plana flakpalsarna samt de högre domformade kupolpalsarna. Enligt en mätning av torvdjup i norra Sverige är torvmäktigheten i studieområdet mellan 0,75–1,25 meter (Franzén, 1985). Marken under torven i Vissátvuopmi utgörs av siltiga issjösediment (Olvmo et al., 2019) och under denna finns normalblockig morän (Länsstyrelsen Norrbotten, 2014). Vid en tidigare kartering i Vissátvuopmi var degraderingen av palsar mellan åren 1960 och 2016 på cirka 29 % i hela området (Figur 3).

Klimatet i Saarikoski klassificeras som Dfc enligt *Köppen-Geiger climate classification system*. Detta är ett subarktiskt klimat som kännetecknas av kalla temperaturer året om utan torrsäsong (Peel, Finlayson & McMahon, 2007). Studieområdet är snötäckt mer än 200 dagar om året, där snön vanligtvis lägger sig i oktober och smälter under maj månad (SMHI, u.å.). Årsmedeltemperaturen i området är ungefär -3°C (SMHI, 2017A) och medelnederbörden är cirka 400 mm per år (SMHI, 2017B).



Figur 3: Karta över förändringen av palsaareal i hela Vissátvuopmi mellan åren 1960 och 2016.

Figure 3: Map over the change in palsa acreage in Vissátvuopmi between the years 1960 and 2016.

4. Metod

Två olika palsar har undersökts med hjälp av georadar, en kupolpals och en flakpals. Kupolpalsen har studerats av forskare från Göteborgs universitet sedan år 1994 och var därför lämplig att använda eftersom det är ett väldokumenterat område. Flakpalsen valdes på grund av att den var den närmst belägna palsen av denna typ och därmed har den mest likartade miljön för kommande jämförelser. Området besöktes från 30/3 till 5/4 under 2019 för att genomföra våra mätningar. Utöver georadarundersökning med GPS-hantering användes en GIS-analys för att illustrera skillnaden i de två palsarnas degradering i området över tid. Till detta användes flygfoton från specifika år mellan 1955 och 2016.

4.1 Georadar

För att kunna undersöka den inre strukturen av palsar utan att förstöra dem har georadar använts, också kallat *Ground Penetrating Radar* (GPR). Denna utrustning består av en antenn där en sändare skickar ut elektromagnetiska vågor som reflekteras i marken och tas emot av en mottagare (Svenska Geotekniska Föreningen, 2006). Tiden det tar för vågen att återvända, tillsammans med materialets egenskaper, används för att räkna ut djupet vågen når. Med materialets egenskaper menas ett materials förmåga att reflektera elektromagnetisk strålning och måttet för detta kallas dielektrisk konstant. En bild i georadarns monitor, kallat radargram, skapas genom att material har olika förmåga att reflektera elektromagnetiska vågor där gränser mellan olika material ofta bildar starka reflektorer (Trafikverket, 2017). För att göra en bra tolkning av reflektorerna underlättar det om det finns kunskap om markens innehåll och stratigrafiska uppbyggnad. Det är viktigt att ha kännedom om materialens dielektriska konstant då detta avgör tiden det tar för vågen att återvända (Sjöberg et al., 2015).

I denna undersökning användes georadar för att visa den inre strukturen hos palsar samt hur denna kan skilja sig mellan palstyper. Frusen torv och mineraljord med islinser är exempel på material som finns i palskomplexet där undersökningen gjordes och båda dessa material är utmärkta att undersöka med georadar (Svenska Geotekniska Föreningen, 2006). Materialen har tydliga skillnader mellan varandra och mot andra förväntade material i marken under torven vilket kan underlätta tolkningen av reflektorer. Antenner med 800 MHz-, en 500 MHz- och en 250 MHz-frekvens användes till vår undersökning och dessa är tillverkade av Malå Geoscience AB (Figur 4). Användandet av olika antenner förväntas ge möjlighet att se

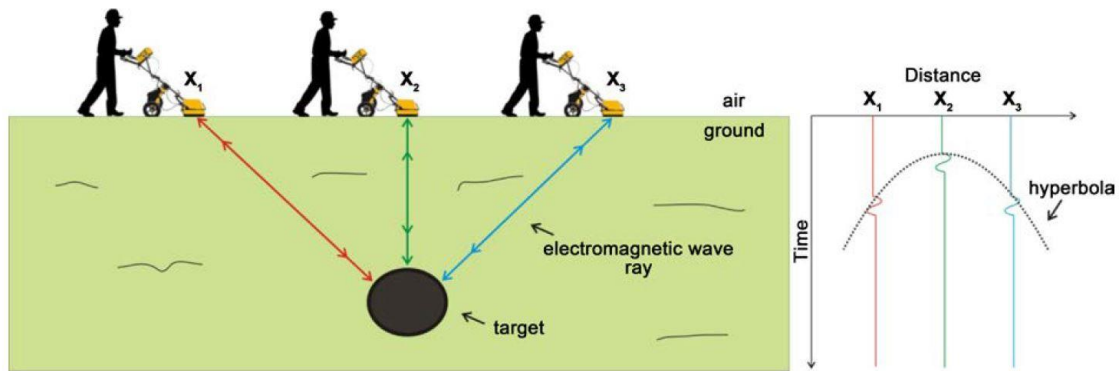
markens lagerföljd med olika hög upplösning då frekvenserna penetrerar olika djupt. Detta är något som inte tidigare har gjorts och kommer därför varit en del av målet med detta arbete. Om en antenn har låg MHz-frekvens når den djupt ner i marken men har begränsad upplösning. En antenn med högre MHz-frekvens når inte lika djupt men har högre upplösning (Figur 4) (ibid).



Figur 4: Bild på de använda antennerna. 800 MHz till vänster, 500 MHz i mitten samt 250 MHz till höger. Foto: Julia Cederbrant.

Figure 4: Picture of the used antennas. 800 MHz to the left, 500 MHz in the middle and 250 MHz to the right. Photo: Julia Cederbrant.

För att kunna tyda reflektorer som syns på radargrammen måste dessa identifieras och förstås. Streck och former bildas i radargrammet vid punkter och lager där permittiviteten skiljer sig och visas som kontraster mot varandra (Kohout et al, 2014). De material som har undersökts är snö, torv, mineraljordar samt tjäle och permafrost. Dessa material syns på olika sätt i de olika radargrammen beroende på vilken antenn som använts. Hyperboler bildas i ett radargram när ett material skiljer sig från kringliggande material samt har en vertikal utbredning (Figur 5) (Poluha, Porsani, Almeida, dos Santos & Allen, 2017). Detta gäller exempelvis block i marken (Conyers, 2015). Fyra profiler har valts ut, där två är från flakpalsen och två från kupolpalsen. Dessa valdes baserat på kvalitet och tydlighet samt att de låg på olika delar av de två palsarna. Fördelen med detta val av profiler var att vi fick en spridning på profilerna där olika sidor av palsarna visas. Radargram från alla tre antenner på samma profil användes för att skapa ett helhetsresultat av en profil. Radargrammet från 250 MHz-antennen används till att se djupare fenomen som moränens övre gräns medan torvens tjocklek kan ses bättre med 500 MHz och 800 MHz.



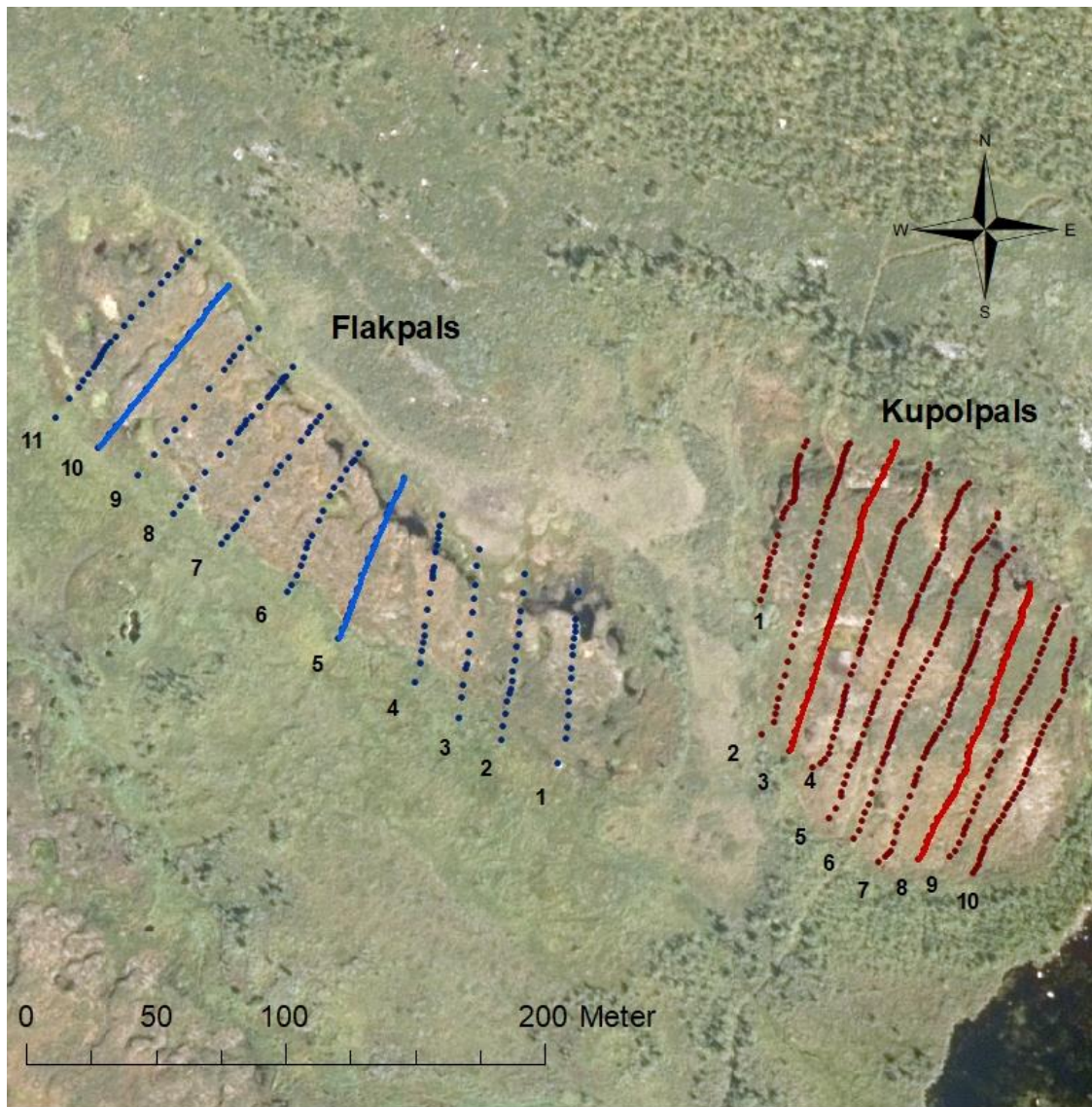
Figur 5: Bilden visar hur elektromagnetiska vågor når ett föremål med vertikal utbredning och en annan dielektrisk konstant än den omgivande marken. På grund av detta skapas en hyperbol på radargrammet.

Figure 5: The image shows how electromagnetic waves reaches a vertically expanded object with a different dielectric constant than the surrounding ground. Due to this, a hyperbola is created on the radargram (Poluha et al., 2017).

4.1.1 Tillvägagångssätt vid flakpals

Flakpalsens storlek och avlånga utbredning var det som låg till grund för antal profiler. För att kunna markera ut profiler behövde palsens yttre gränser definieras. Flakpalsens höjdskillnader är små och därför baserades gränssdragningen här främst på vegetation.

Dvärgbjörk (*Betula nana*) trivs exempelvis inte i blöta marker och växer därför framförallt uppe på palsarna (Zuidhoff, 2003). Olika grästyper och större björkar växer i de sänkor som finns mellan palsarna då dessa är mer vattentåliga. Även om snölagret var tjockt kunde viss vegetation urskiljas genom snön. När de yttre gränserna för palsen var fastställda markerades profiler med 20 meters avstånd vilket resulterade i totalt elva profiler längs med palsen i nordlig riktning (Figur 6).



Teckenförklaring

- Kupolpals profil 3
- Kupolpals profil 8
- Flakpals profil 5
- Flakpals profil 10
- GPS-punkter för kupolpals
- GPS-punkter för flakpals

Karta av
Julia Cederbrant och
Cornelia Wing

Figur 6: Karta över profiler med tillhörande GPS-punkter vid de två studerade palsarna. Helt dragna linjer representerar de utvalda profilerna som presenteras i detta arbete.

Figure 6: Map over profiles with the related GPS-data at the two studied palsas. Solid lines represent the chosen profiles which are presented in this work.

I fält märktes profilen ut med flaggor och för att få ett mer lätthanterligt underlag så plattades snön till längs med profilen med hjälp av snöskor (Figur 7). Bearbetningen av snön gjorde att antennen inte gled eller välte på grund av de ojämnheter som fanns i den naturliga snöytan. Först drogs 800 MHz-antennen manuellt över profil 1 med hjälp av ett rep för att därefter gå över varje profil i nordöstlig riktning (Figur 7). Denna process upprepades med de andra två antennerna. Valet att gå i samma riktning gjordes för att underlätta den kommande bearbetningen av data. För varje antennbyte kalibrerades mätjulet om, vilket innebär att mätjulet ställs in efter både antennen och underlaget. Kalibreringen avgör hur många pulser per meter antennen kommer skicka ut vid ett visst underlag. Georadarn ställdes in på att samla in information var femte centimeter längs med hela profilen. Då profilerna inte var särskilt långa användes en relativt tät insamling då en tätare insamling av datapunkter ökar upplösningen (Samet, Çelik, Tural, Şengönü, Özkan, Damcı, 2017). Som referensram har en liknande undersökning använts där data samlades in var tionde centimeter (Kohout et al., 2014).



Figur 7: En profil utmarkerad med flaggor och tillplattad med hjälp av snöskor för att göra underlaget bättre för antennen att glida på. Foto: Madison Foot

Figure 7: A profile marked with flags and flattened by the help of snowshoes to create a better surface for the antenna to slide on. Photo: Madison Foot

4.1.2 Tillvägagångssätt vid kupolpals

Då kupolpalsen var något mindre än flakpalsen fanns en ambition att göra profilerna med 10 meters mellanrum. Då profilerna på denna pals var långa var det svårt att se vilken flagga som hörde till vilken profil och avståndet ökades till 15 meter vilket resulterade i 10 profiler över hela palsen. Gränsdragningen på kupolpalsen baserades i den norra änden på topografiska skillnader eftersom det finns en tydlig brant vid palsens slut. I den södra delen är palsen flackare och därför användes vegetation för att skilja pals från kärrmark. På kupolpalsen användes en snöskoter på vissa delar för att jämna till snön och där det var för brant för att köra plattades snön till med snöskor. På kupolpalsen användes antennen med 250 MHz-frekvens först då tyngden från denna ytterligare plattade till snön i profilen och fick mät hjulet att rulla jämnt. Vissa profiler med 250 MHz kördes med skoter då underlaget samt tyngden från just denna antenn möjliggjorde detta medan 500- och 800-antennen drogs manuellt som tidigare. 800 MHz-antennen användes endast vid varannan profil då denna var svårkörd och en tillräckligt bra bild av området kunde skapas trots detta. Med 800 MHz-antennen samlades data in varannan centimeter istället för var femte då underlaget samt antennens storlek gjorde att mät hjulet inte fungerade som det skulle. Mät hjulet var något för stort för 800 MHz-antennen vilket försvårade användandet av denna antenn på båda palsarna (Figur 8).



Figur 8: Bild som visar hur det ser ut när en 800 MHz-antenn används. Foto: Madison Foot

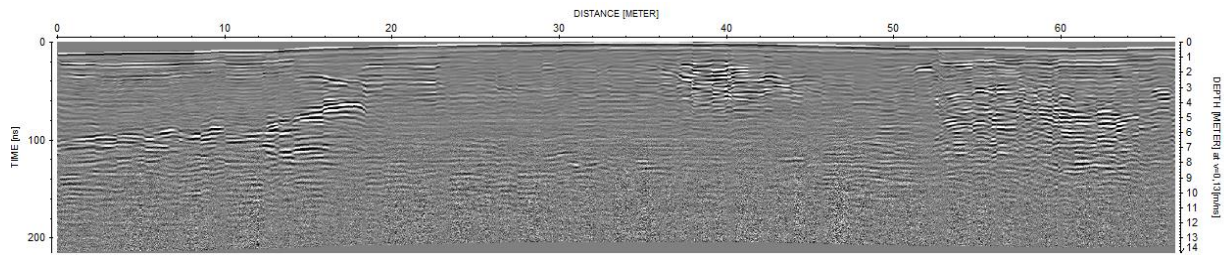
Figure 8: Picture showing what it looks like when the 800 MHz antenna is used. Photo: Madison Foot

4.1.3 Bearbetning av georadardata

För att bearbeta georadardatan, både för att förbättra visualiseringen och för att höjdkorrigera radargrammet, användes programmet ReflexW. En höjdkorrektion krävs när topografin inte är helt jämn vilket var fallet på palsarna. För att kunna höjdkorrigera radargrammen behövdes avståndet mellan punkterna i varje profil samt höjden vid varje GPS-punkt (se 4.2).

Höjdskillnaden mellan punkterna beräknades genom att subtrahera höjden av en punkt med den lägsta höjden i en profil. Detta gjordes för varje profil och utefter ordningen av hur punkterna låg i profilens riktning. För att höjdkorrektionen skulle stämma med georadardatan behövde beräkningarna ibland börja från sista punkten istället för första då ungefär varannan profil var mätt i motsatt riktning från hur georadarn kördes. I detta läge fanns en fil med en kolumn med avstånd mellan punkterna och en kolumn med höjdskillnaden mellan varje punkt. Vidare delades höjdskillnaden med hastigheten för mediet vilken vi bestämde till 0,13 m/ns. Hastigheten baserades på en avvägning mellan de olika hastigheterna för is, torv och permafrost från tidigare forskning (Thomsom, Osinski & Pollard, 2012; Moorman, Robinson & Burgess, 2003; Schennen & Tronicke, 2015).

Meterskalan som senare används i radargrammen är direkt kopplad till hastigheten då programmet använder sig av tiden det tar för en signal att återkomma för att avgöra avståndet. Detta exporterades till en textfil med två kolumner där den ena kolumnen beskriver avståndet mellan punkterna och den andra kolumnen innefattar höjdskillnaden delat med materialets hastighet i m/ns. Längden på radargrammen mättes av mätjulet vilket inte fungerade optimalt på underlaget och justerades därför i efterhand baserat på den första och sista GPS-punkten i varje profil. Sedan ändrades starttiden med verktyget *move start time* för att få bort den första reflektionen, alltså luftvågen. Det som är relevant för detta arbete är markens struktur och luftvågen tas bort för att få en mer korrekt meterskala på radargrammen. För att bearbeta och förtydliga datan i programmet användes två 1D-filter: *subtract-mean* (*dewow*) och *energy decay* samt i slutet verktyget *static correction* för en höjdkorrektion. Detta resulterade i radargram i gråskala (Figur 9).



Figur 9: Ett radargram endast bearbetat i Reflex W. Starkare linjer på radargrammet är vad vi i rapporten kallar reflektorer.

Figure 9: A radargram only processed in Reflex W. Stronger lines in the radargram is what we refer to as reflectors in the report.

4.1.4 Tolkning av radargram

För att kunna urskilja fenomen på varierande djup i palsens inre struktur användes radargram från de olika antennerna. Gränser mellan olika material samt fenomen i marken kan ses som starka reflektorer genom skillnader i dielektrisk konstant. Reflektorer tillsammans med kunskap om marken användes för att identifiera olika material och deras utbredning.

Utgångspunkten för tolkningen var att först identifiera starka reflektorer utan att ändra radargrammen till samma meterskala i djupled. Reflektorerna visualiserades med pilar utan att dessa tolkades som ett visst material. Sedan användes radargram omgjorda till samma meterskala för att kunna jämföra vad som framkom med de olika antennerna och för att kunna överföra samtliga synliga reflektorer till ett gemensamt radargram, en kompositbild.

4.2 GPS-hantering

GPS-punkter användes för att kunna visualisera profilerna (Figur 6) och för att kunna höjdkorrigera data från georadarmätningen. Mätpunkterna fördelades på ett sådant sätt längs profilerna att de skulle identifiera förändringar i höjd. Det innebar att om en sektion längs profilen ansågs jämn så togs ett fåtal punkter medan ett större antal mätningar vid mer kuperad terräng med avsikt att visa dessa ojämnheter. Då GPS:en (Trimble R10) från Trimtec AB med fältdator och mätstång hade en noggrannhet på centimeternivå valde vi att använda denna istället för ett avvägningsinstrument. Ett avvägningsinstrument hade kunnat ge oss en exakthet på millimeternivå av palsarnas höjdskillnader men då GPS:en hade fördelen att också ge koordinater för varje mätpunkt var denna att föredra. Både avvägningsinstrument och GPS:en begränsas att ge exakta mätpunkter för höjd när snön är för djup eller is är i vägen för att nå marken. Då endast relativa höjdskillnader var intressant för höjdkorrigering av radargram har detta dock mindre betydelse för vårt arbete. GPS-punkterna samlades in baserat på profilerna som var utmarkerade för georadarundersökningen. Totalt skapades 687 GPS-punkter, varav 187 var på flakpalsen och 500 på kupolpalsen. Kupolpalsen har större variation i höjd och därför behövdes fler punkter.

GPS-punkterna exporterades till formatet *shape-fil* då detta är kompatibelt med GIS-program.

4.3 Bearbetning i GIS

GIS har använts för att illustrera var profilerna markerades, undersökningens lokalisering samt vid karteringen av palsarnas ytförändring över tid. Karteringen utgick från flygfoton omfattande en 70-årsperiod med fotograferingstidpunkter vid åren 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 och 2016 (Tabell 1). Karteringen användes för att kunna analysera var och hur mycket palsarna har degraderats eller vuxit för att kunna göra jämförelser mellan palstyperna. GIS-analysen har även varit ett bra komplement till georadarundersökningen då attribut hos palsarna har syns genom båda metoderna och kunnat bekräftas. ArcMap 10.6 användes för GIS-analysen. Vissa av flygbilderna var inte kopplade till något koordinatsystem och därför behövde de georefereras. Data som användes för karteringen av de två palsarna hämtades från institutionens tidigare insamlade och bearbetade flygbilder (Tabell 1).

Tabell 1: Information om flygbilderna som använts för att förstå de skillnader som kan ha påverkat jämförelsen.

Table 1: Information about the aerial photos used to understand differences that could have affected the comparison.

| Registreringsdatum | Täckningsområde | Källa | Bildskala | PCA (m) | Filmtyp |
|--------------------|-----------------|--------------|------------|---------|--------------------|
| 1955 Juli 28 | 1, 2, 3 | Lantmäteriet | 1: 29 000* | 0,64 | Pankromatisk (S/V) |
| 1959 Juli 20 | 3 | Lantmäteriet | 1:30 000* | 0,68 | Pankromatisk (S/V) |
| 1963 Augusti 1 | 1, 2, 3 | Lantmäteriet | 1: 30 000* | 0,49 | Pankromatisk (S/V) |
| 1983 Juni 28 | 1 | Lantmäteriet | 1: 15 000* | 0,61 | Pankromatisk (S/V) |
| 1994 Juli 28 | 1, 2, 3 | Lantmäteriet | 1: 30 000* | 0,99 | Pankromatisk (S/V) |
| 2010 Augusti 18 | 1, 2, 3 | Lantmäteriet | ND | 0,5 | Digital IR-färg |
| 2016 Augusti 18 | 1, 2, 3 | Lantmäteriet | ND | 0,5 | Digital RGB |

För att kartera palsarna skapades polygoner där polygonens begränsning markerades längs med palsens ytterkanter med foton från olika år som bakgrund. Genom att beräkna arean med funktionen *“calculate geometry”* kunde även ytarealen bestämmas och på så vis kunde den procentuella degraderingen mellan olika år beräknas (Figur 18A, 18B). Sänkor i palsen klipptes ut då detta kan vara ett tecken på degradering och det ansågs viktigt att inte endast visa kantdegraderingen. De var bara de tydligaste sänkorna på palsarna som klipptes ut även om vissa andra sänkor kan ses men med för vaga gränser för att klippas ut. Några få områden på palsarna visade viss tillväxt men denna klipptes bort då det ej är troligt att nybildning av palsar har skett. Troligtvis var tillväxten endast en felkälla utifrån att flygfotona hade olika kvalitet och upplösning vilket gör karteringarna olika beroende på år. Dessutom georefererades majoriteten av flygfotona vilket kan leda till en viss förskjutning som ser ut som en ensidig tillväxt.

5. Resultat

I denna del kommer radargram från de tre antennerna presenteras, sammansatta efter 4 profiler, i två olika tolkningssteg. Reflektorer som syns på radargrammen kommer att beskrivas och därefter följer en tolkning av vilka material dessa representerar. Därefter presenteras en GIS-analys av palsarnas degradering mellan åren 1955 och 2016.

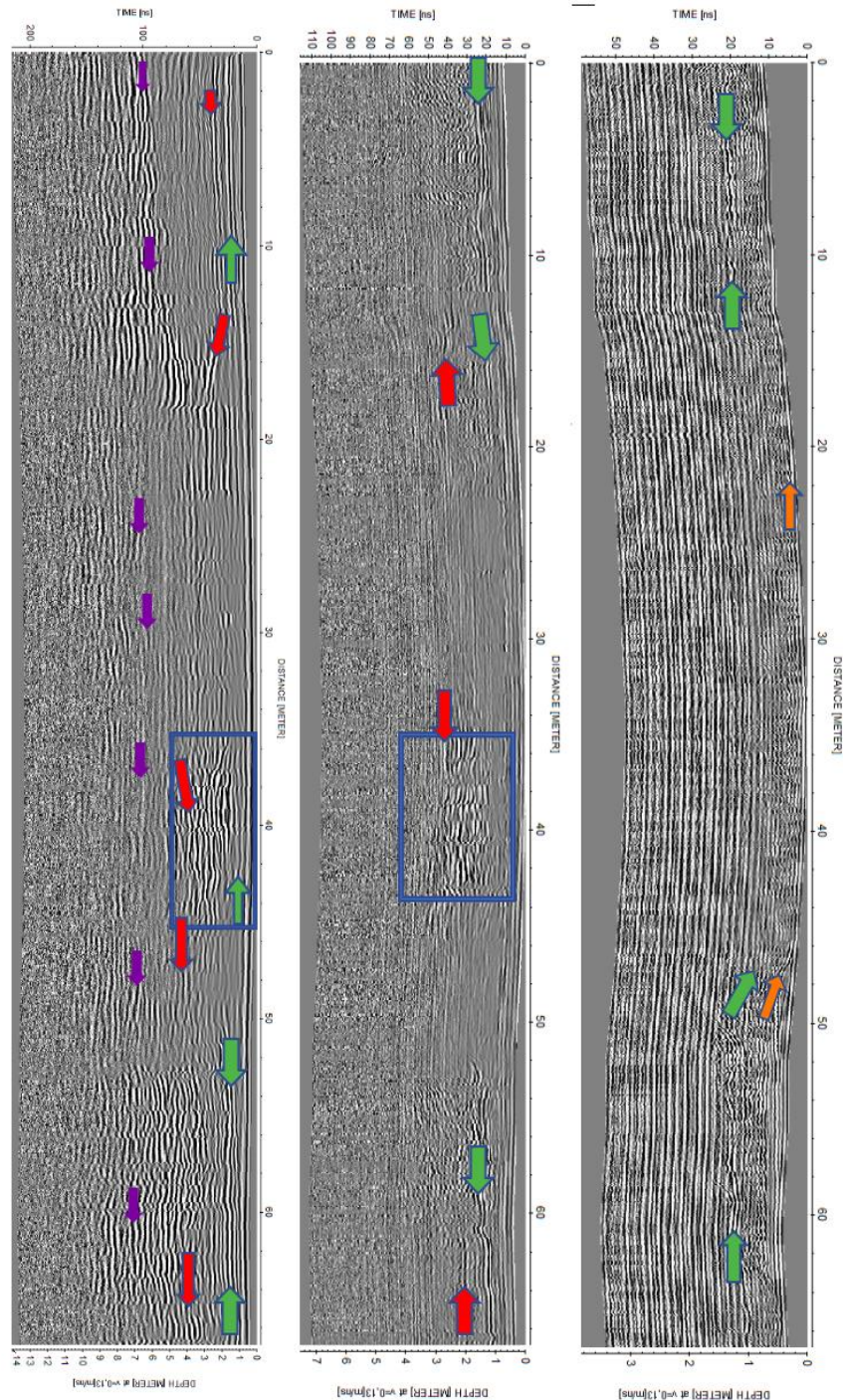
5.1 Radargram

Radargram i steg ett presenteras i sin grundform där meterskalan är olika beroende på antennens räckvidd. Pilar markerar de reflektorer som ansetts vara de starkaste i det specifika radargrammet och färgkodningen är vad som skulle kunna vara motsvarande reflektor i de olika radargrammen. I radargram i steg två har starka reflektorer markerats med linjer istället för pilar. Här har radargrammen ändrats så att alla har samma skala i djupled. Detta har gjorts för att visualisera hur linjerna i radargrammen från olika antenner ligger i förhållande till varandra även om antennerna har olika lång räckvidd ner i marken. Sedan har alla linjer sammanställts i en kompositbild vilket hade blivit missvisande utan skaländringen. I denna bild har de olika marklagren färglagts för att illustrera utbredningen av alla material. De djup som anges för olika lager är räknade från markytan och därför är det viktigt att notera ytans placering i förhållande till meterskalan. Profilerna som dragits över båda palsarna har ibland inkluderat både kärrmark och pals och därför skrivs palsens gränser, baserat på flygfoton, i radargrammen ut. Där kärrmark finns med i radargrammet räknas palsens början vara på vänster sida och slutet på höger sida. Palsens längd refereras till den horisontella meterskalan.

5.1.1 Radargram från flakpalsen i steg ett

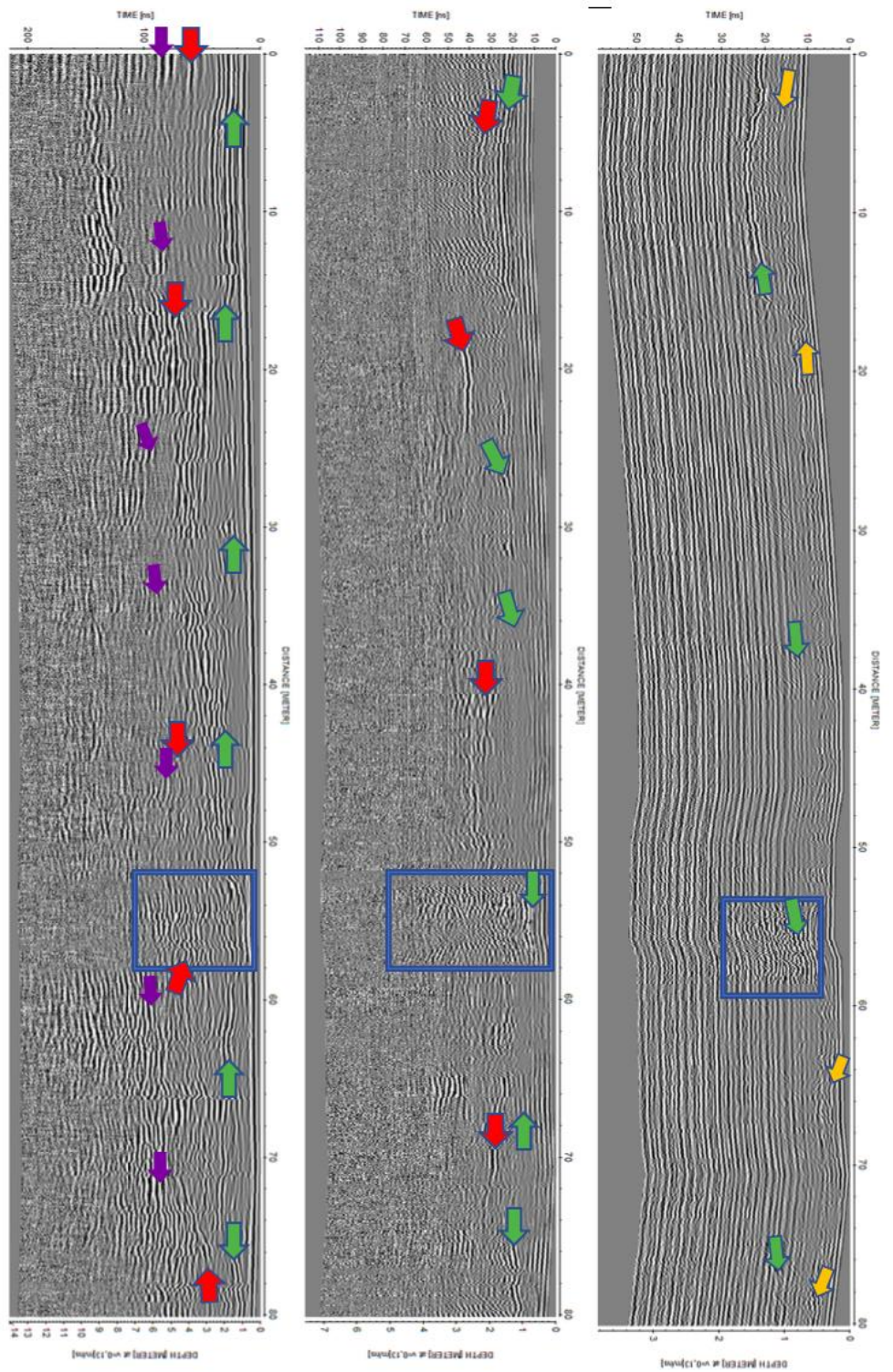
På 800 MHz-radargrammen syns två tydliga reflektorer, en precis uppe vid ytan (Figur 10, Figur 11, gul pil) och en någon meter ner (Figur 10, Figur 11, grön pil). Reflektorn illustrerad med gul pil är närmare ytan uppe på palsen och något djupare ute vid kanterna där myren börjar (Figur 10, Figur 11). De reflektorer i flakpalsens radargram som representeras av gröna pilar ligger mellan 1-2 meter ner i marken och går i en relativt jämn linje som varierar med ytans höjdskillnader (Figur 10, Figur 11). Reflektorena illustrerade med röda pilar är närmre ytan vid flakpalsens kanter och går djupare ner i marken i mitten av palsen. Lila linjer är reflektorer som går relativt rakt genom palsen på ungefär samma djup och dessa framträder i

250 MHz-radargrammen (Figur 10, Figur 11). De blåa rektanglarna visar områden med tydliga kluster av reflektorer som återfinns i mer än en frekvens (Figur 10, figur 11). Gränserna för pulsar är svåra att avgöra exakt men utifrån flygbilder tolkas flakpalsen börja på profil 5 vid 9 meter och slutar vid cirka 49 meter. Flakpalsen börjar cirka 10 meter in på vänster sida på profil 10 och slutar ungefär på 77 meter.



Figur 10: Flakpals profil 5. Notera att de ej är i samma skala. 800 MHz ligger överst, följt av 500 MHz i mitten och 250 MHz längst ner.

Figure 10: Palsa plateau profile 5. Note that they are not in scale. 800 MHz on the top, 500 MHz in the middle and 250 MHz at the bottom.

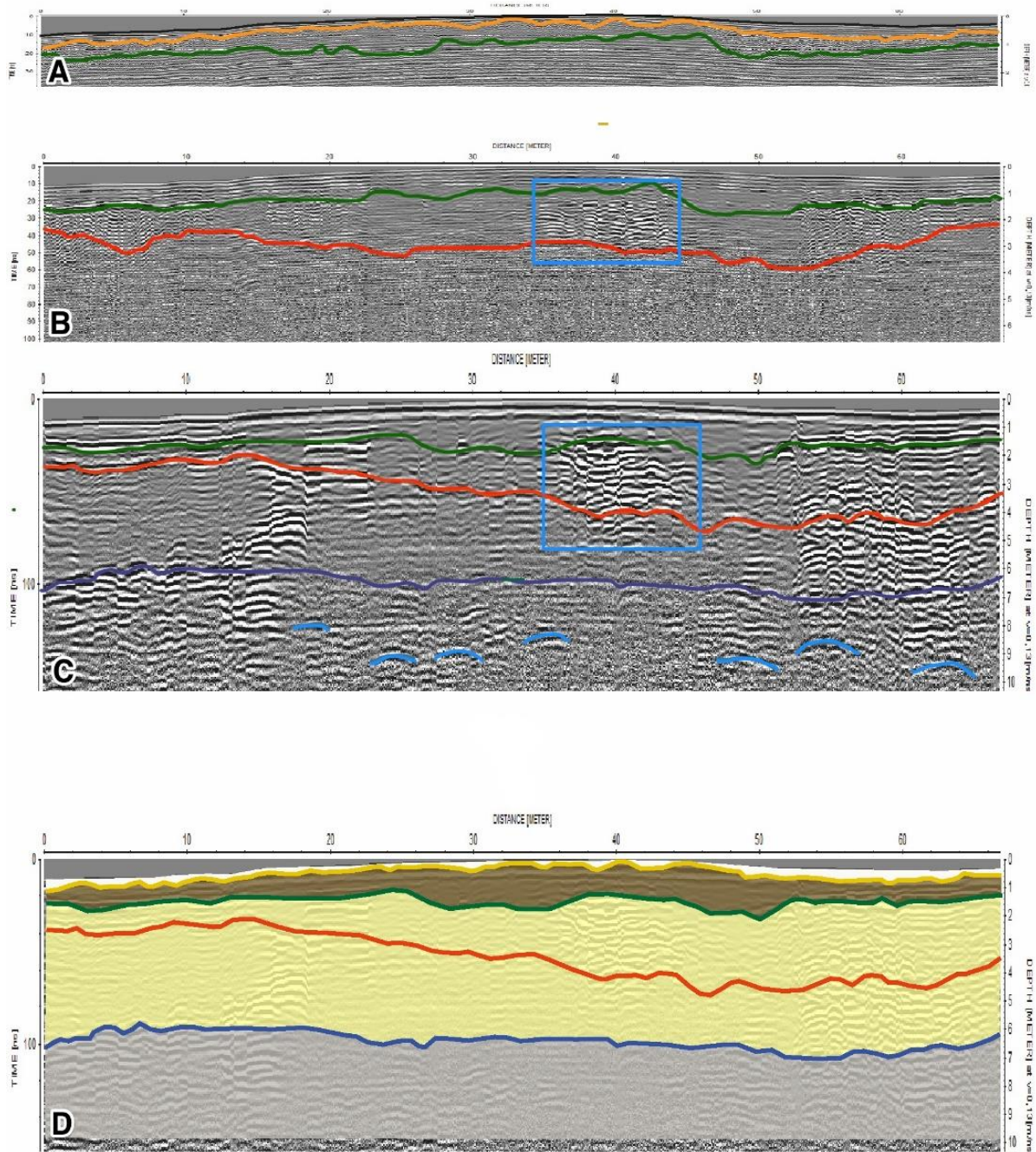


Figur 11 : Flakpals profil 10. Notera att de ej är i samma skala. 800 MHz ligger överst, följt av 500 MHz i mitten och 250 MHz längst ner.

Figure 11 : Palsa plateau profil 10. Note that they are not in scale. 800 MHz on the top, 500 MHz in the middle and 250 MHz at the bottom.

5.1.2 Radargram från flakpalsen i steg två

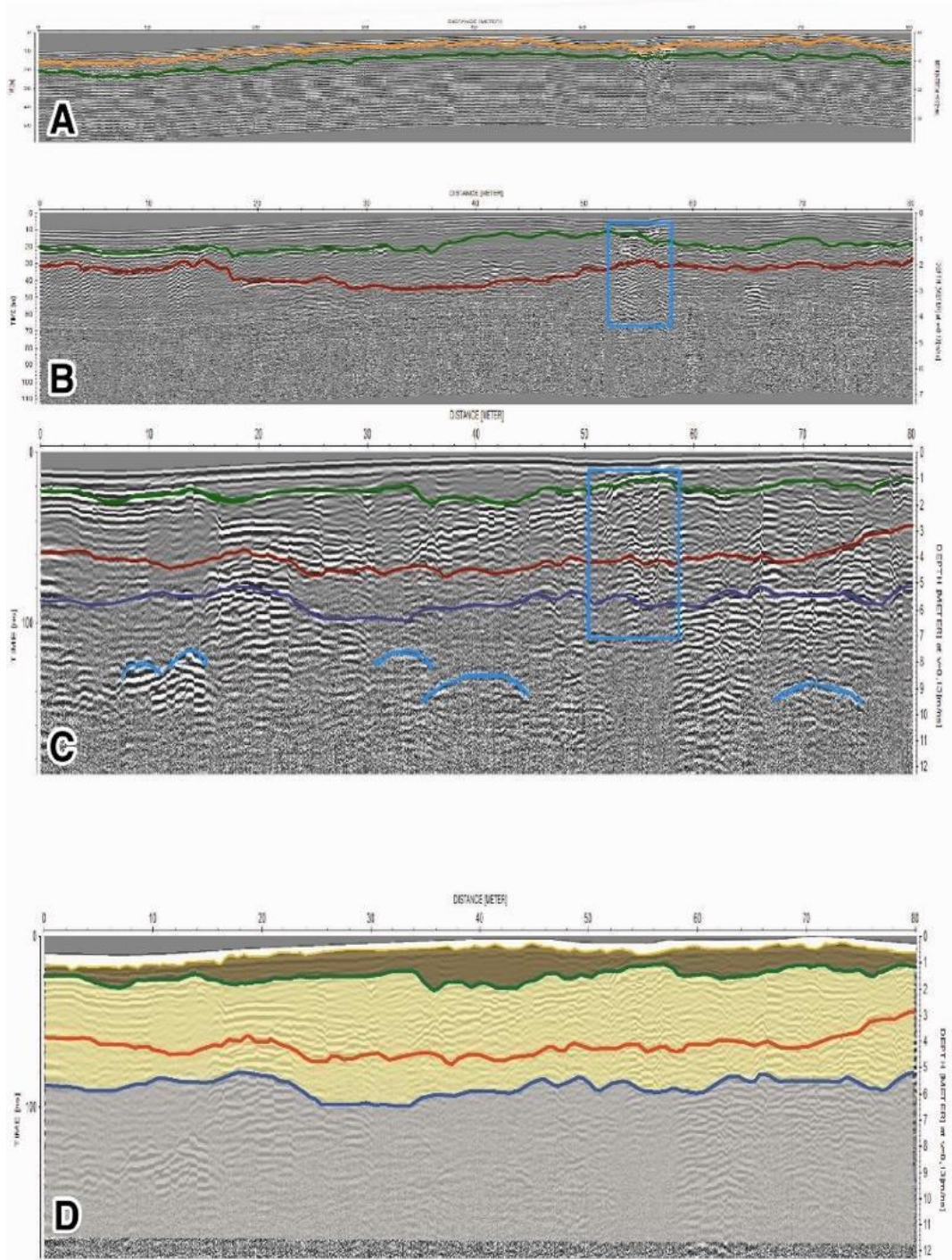
I de första radargrammen (Figur 12) visas profil 5 på flakpalsen. Radargrammet från 800 MHz-antennen (Figur 12A) kan användas för att urskilja snöns underkant (Figur 12A, gul linje) samt torvens undre gräns (Figur 12A, grön linje). Detta gör att torvens utbredning och variation i tjocklek kan ses i radargrammet. Den röda linjen tolkas vara tjäl- och permafrostbasen (Figur 12B, Figur 12C). Den är som djupast under palsen där permafrost kan förväntas medan den är grundare på kanterna där den antas motsvara årets tjälningdjup. Tjäl- och permafrostbasen varierar mellan 1,5 och 5 meter i profil 5 och syns bara i radargrammen från 500 MHz- och 250 MHz-antennen. Den övre gränsen för det som tolkats som morän går som en rak linje med vissa större block synliga (Figur 12C, lila linje och blåa hyperboler). Denna syns endast vid 250 MHz och ligger mellan 5–7 meters djup. I kompositbilden (Figur 12D) illustreras utbredningen av lagret som tolkats vara issjösediment.



Figur 12: Radargram över profil 5 på flakpalsen med olika antenner; **A**: 800 MHz överst, **B**: 500 MHz i mitten och **C**: 250 MHz näst längst ner. **D**: en kompositbild som visar alla lager. Färgade linjer visar olika reflektorer, notera att storleken är olika med skalan den samma. Blåa rektanglar visar områden med tydliga reflektorer som återfinns i mer än ett radargram.

Figure 12: Radargram over profile 5 on the palsa plateau with different antennas; **A**: 800 MHz on the top, **B**: 500 MHz in the middle and **C**: 250 MHz second from the bottom. **D**: a composite image showing all layers. Colored lines show different reflectors, note that the size is different, but the scale is the same. Blue rectangles show areas with strong reflectors.

I det andra radargrammet (Figur 13) visas profil 10 på flakpalsen. I radargrammet baserat på 800 MHz-antennen går det att urskilja snöns samt torvens nedre gräns (Figur 13A, gul respektive grön linje). Vid 500 MHz blir även tjäl- och permafrostbasen synlig och den är även i denna profil något grundare vid kanterna än i mitten av palsen (Figur 13B, röd linje). Tjäl- och permafrostbas återfinns även vid 250 MHz på ett djup mellan 1,5–4 meter. Vid 250 MHz går även moränjorden att urskilja och precis som i profil 5 förekommer här stora block vars reflektorer visas som hyperboler i radargrammen (Figur 13C, lila linje och ljusblåa hyperboler). Moränlagret ligger på 5–6 meters djup i denna profil. Kompositbilden visar djupet på lagret av de finkorniga issjösediment som återfinns mellan torven och moränen (Figur 13D)

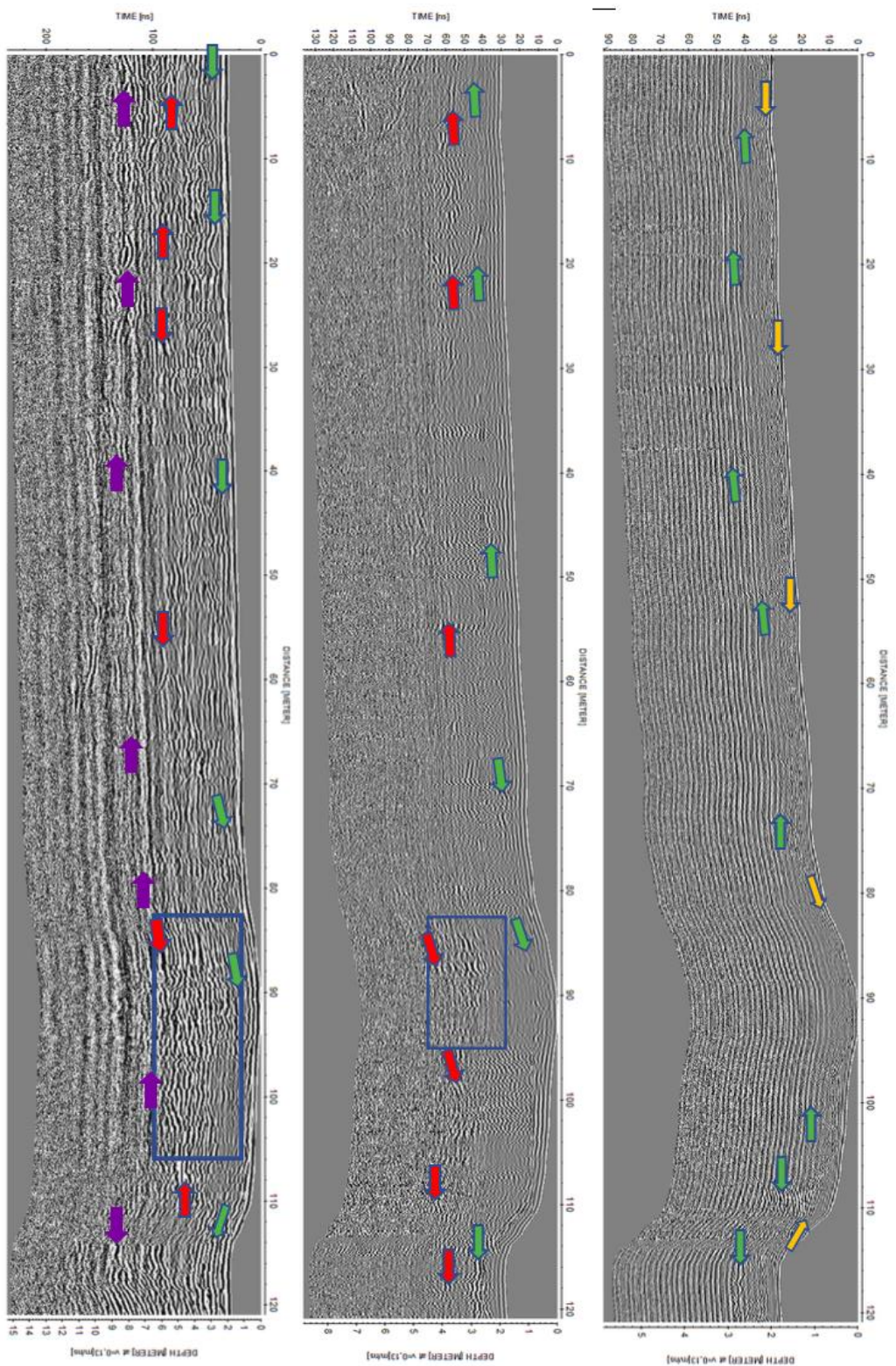


Figur 13: Radargram över profil 10 på flakpalsen med olika antenner; **A**: 800 MHz överst, **B**: 500 MHz i mitten och **C**: 250 MHz näst längst ner. **D**: en kompositbild som visar alla lager. Färgade linjer visar olika reflektorer, notera att storleken är olika med skalan den samma. Blåa rektanglar visar områden med tydliga reflektorer som återfinns i mer än ett radargram.

Figure 13: Radargram over profile 10 on the palsa plateau with different antennas; **A**: 800 MHz on the top, **B**: 500 MHz in the middle and **C**: 250 MHz second from the bottom. **D**: a composite image showing all layers. Colored lines show different reflectors, note that the size is different, but the scale is the same. Blue rectangles show areas with strong reflectors.

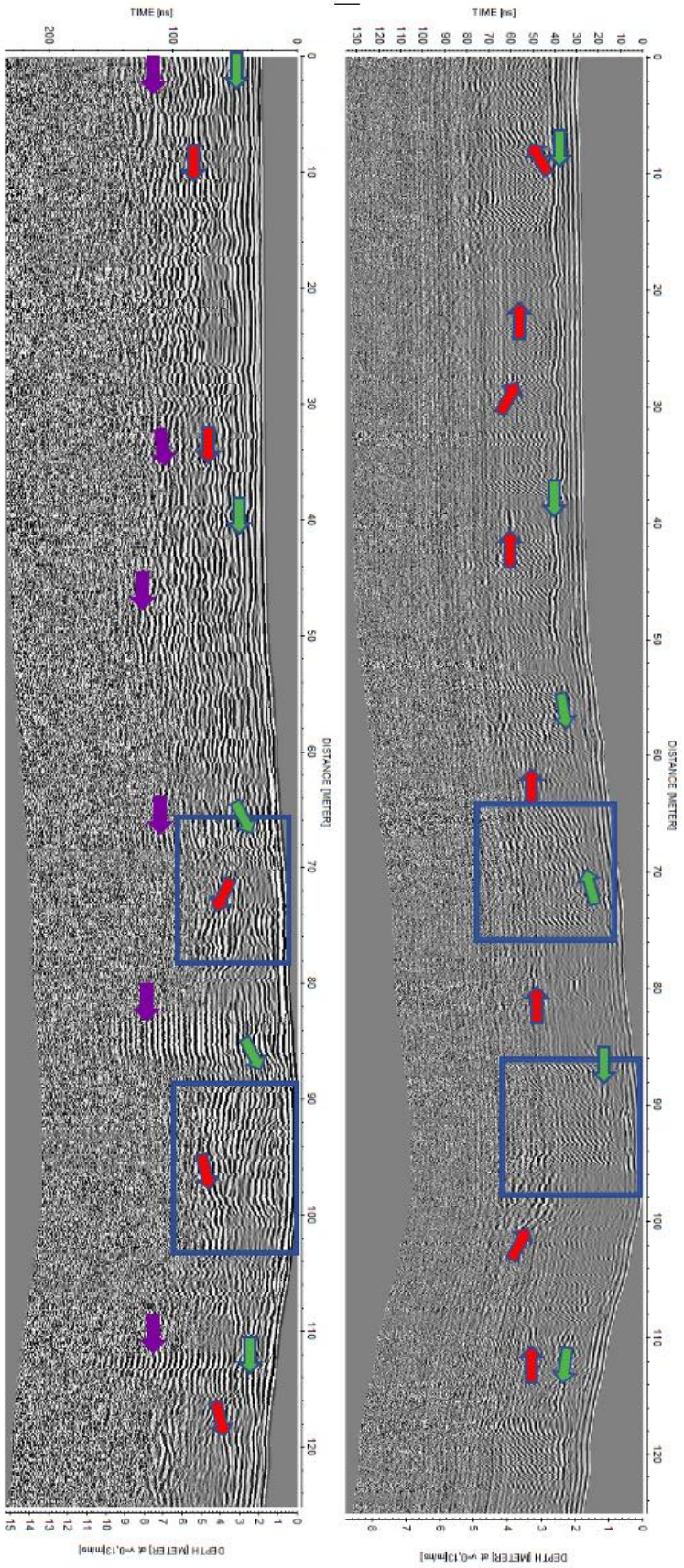
5.1.3 Radargram från kupolpalsen i steg ett

Reflektorn visualiserad med gula pilar vid 800 MHz syns endast på det ena radargrammet på kupolpalsen och går några decimeter under markytan (Figur 14). De gröna pilarna visar reflektorer som stiger mot ytan vid palsens upphöjning och ligger på ett djup av 1-2 meter (Figur 14, Figur 15). Reflektorn utritad med röda pilar varierar mycket i djup där den följer en trend av att gå upp mot ytan i palsens kanter och vara djupare under palsens mitt. Denna reflektor kunde ses både med 500 MHz-antennen och 250 MHz-antennen (Figur 14, Figur 15, röd pil). Reflektorn markerad med lila pilar går som en relativt rak linje genom profilerna men går något djupare på kupolpalsen än på flakpalsen. Denna reflektor återfinns på radargrammen som är gjord efter 250 MHz-antennen (Figur 14, Figur 15, lila pil). Kluster av starka reflektorer som visualiseras av de blå rektanglarna finns under palsens upphöjning (Figur 14, Figur 15). Ingen av profilerna på kupolpalsen har kärmark med i radargrammens början och det finns inte heller i slutet på profil 8. På profil 3 börjar kärmarken synas vid 117 meter vilket då representerar palsens yttre gräns.



Figur 14: Kuppelpals profil 8. Notera att de ej är i samma skala. 800 MHz ligger överst, följt av 500 MHz i mitten och 250 MHz längst ner.

Figure 14: Palsa dome profile 8. Note that they are not in scale. 800 MHz on the top, 500 MHz in the middle and 250 MHz at the bottom.

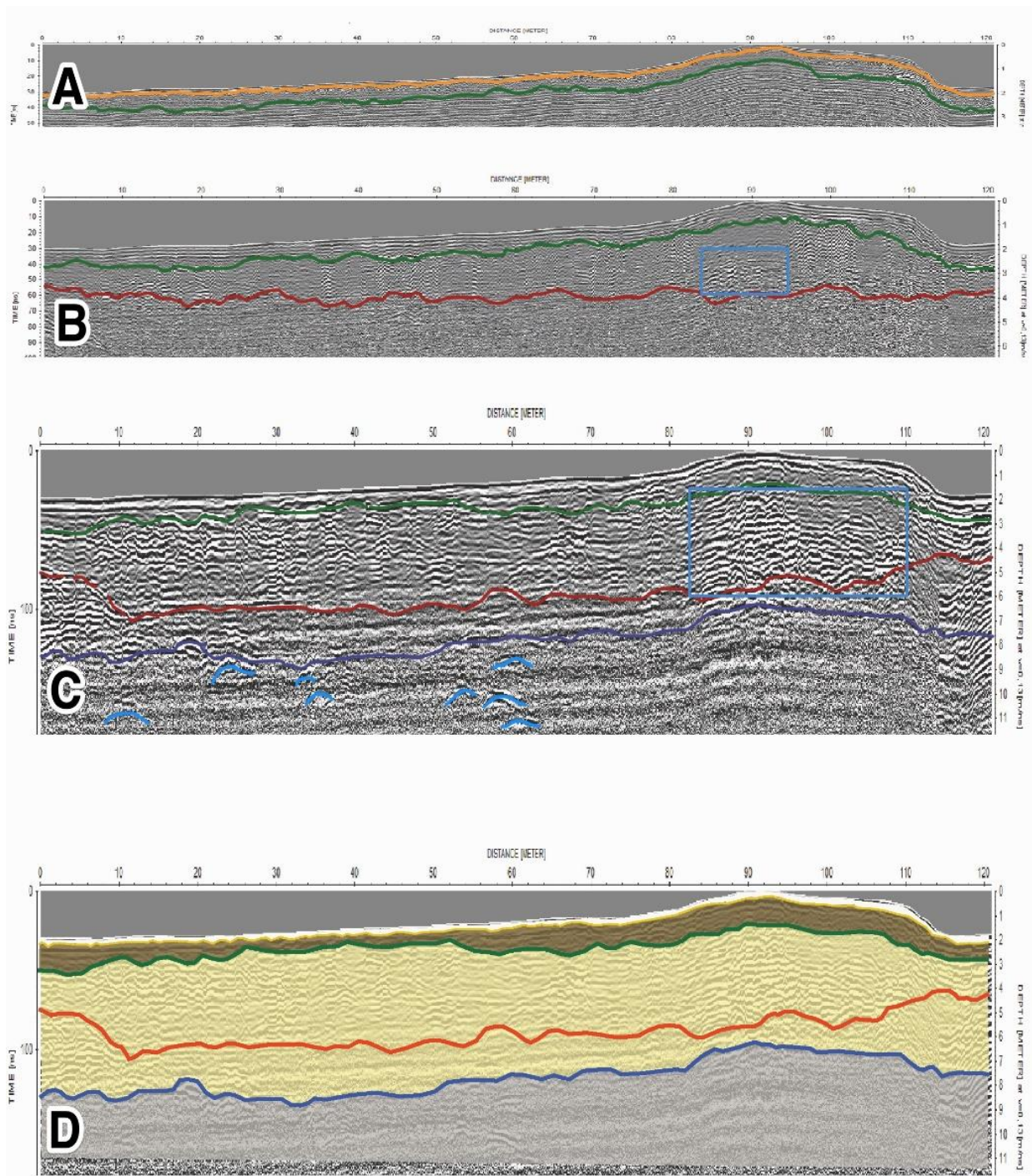


Figur 15: Kuppelpals profil 3. Notera att de ej är i samma skala. 500 MHz överst och 250 MHz längst ner. 800 MHz saknas på grund av svårigheter med antennen.

Figure 15: Palsa dome profile 3. Note that they are not in scale. 500 MHz at the top and 250 MHz at the bottom. 800 MHz is missing due to difficulties with the antenna.

5.1.4 Radargram från kupolpalsen i steg två

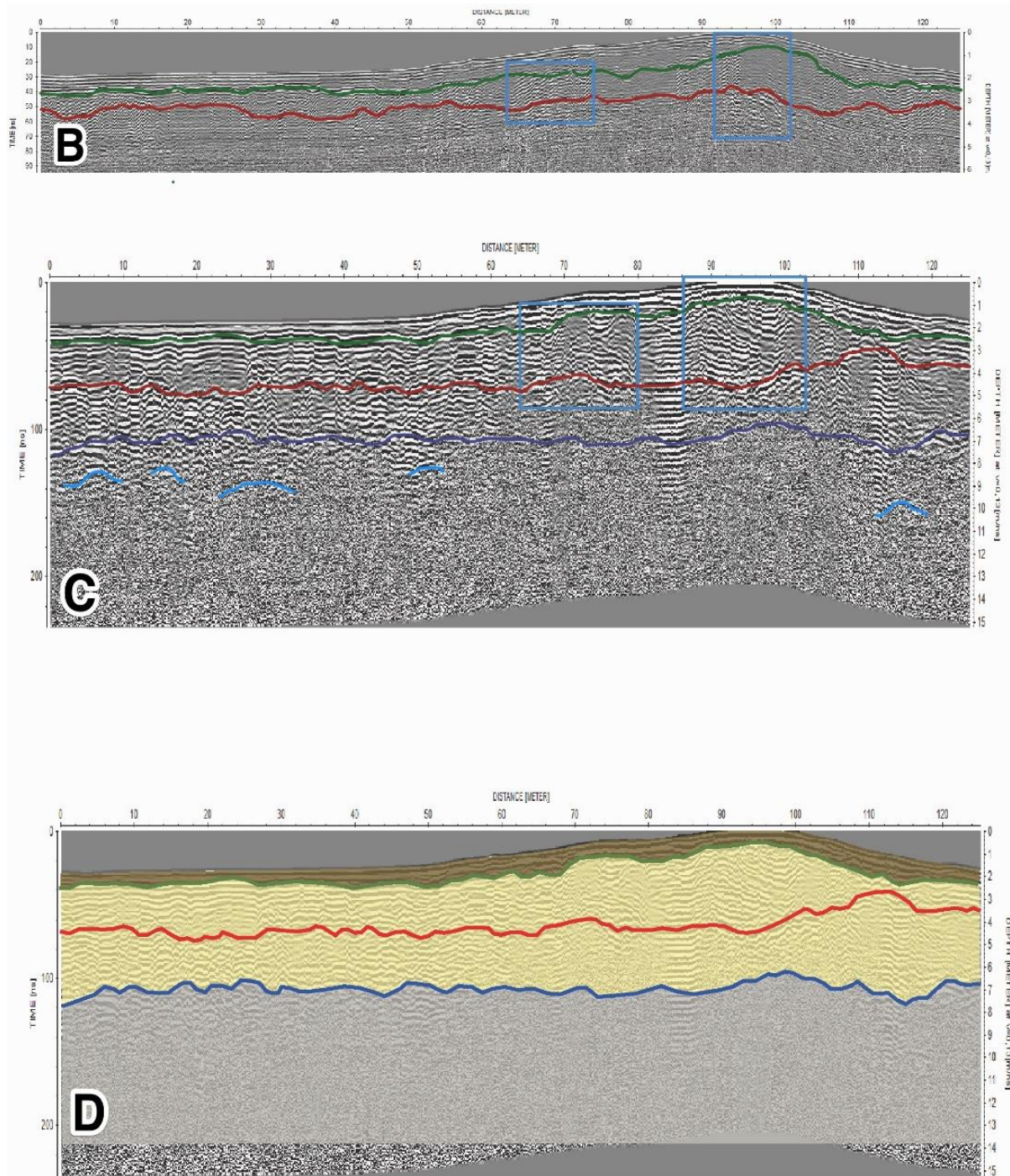
I radargrammet över profil 8 på kupolpalsen (Figur 16) tolkas den gula linjen som snöns undre gräns där djupet varierar över palsen men är som störst cirka 40 cm. Torvens tjocklek skiftar längs profilen och den undre gränsen framträder vid alla frekvenser (Figur 16, grön linje). Permafrostbasen och tjäldjupet, illustrerat med en röd linje, skiljer något i djup mellan 500 MHz- och 250 MHz-antennen men är på båda radargrammen som djupast under palsens upphöjning och tunnare ut vid palsens kanter (Figur 16B, 16C, röd linje). Tjäl- och permafrostbasens djup varierar mellan 1,5–6 meter över palsen. Moränlagret ligger precis under permafrostbasen och är mellan 6 och 8 meters djup med hyperboler vilka tolkas som block (Figur 16, lila linje, blåa hyperboler). Moränen följer palsens upphöjning och visar en uppträngning där palsen är som högst. Ett tydligt kluster av reflektorer syns vid palsens högsta punkt och detta tolkas vara islinser då dessa ligger i palsens frusna kärna (16B, 16C, blå rektanglar). I kompositbilden (Figur 16D, gult fält) kan siltjorden med issjösediment tolkas under torven och över moränen.



Figur 16: Radargram över profil 8 på kupolpalsen med olika antenner; **A**: 800 MHz överst, **B**: 500 MHz i mitten och **C**: 250 MHz näst längst ner. **D**: en kompositbild som visar alla lager. Färgade linjer visar olika reflektorer, notera att storleken är olika med skalan den samma. Blåa rektanglar visar områden med tydliga reflektorer som återfinns i mer än ett radargram.

Figure 16: Radargram over profile 8 on the palsa dome with different antennas; **A**: 800 MHz on the top, **B**: 500 MHz in the middle and **C**: 250 MHz second from the bottom. **D**: a composite image showing all layers. Colored lines show different reflectors, note that the size is different, but the scale is the same. Blue rectangles show areas with strong reflectors.

Det fjärde radargrammet (Figur 17) visar profil 3 över kupolpalsen. I radargrammet gjort med 500 MHz syns torvens undre gräns (Figur 17B, grön linje) samt tjäl- och permafrostbasen (Figur 17, röd linje). Den röda linjen som representerar permafrostbasen syns även i radargrammet från 250 MHz och återfinns på 2-5 meters djup (Figur 17B, 17C). Mellan de blå rektanglarna som visar islinser finns tydliga reflektorer som går långt ner i marken. Dessa tolkas i detta fall ej som islinser utan som ett resultat av markförändringar i form av en stig (Figur 17C). Moränlagret är endast synligt i 250 MHz-radargrammet och syns som en tydlig reflektor 6-8 meter ner i marken (Figur 17C, lila linje). Siltjorden med issjösediment är som närmast marken vid palsens upphöjning och också som djupast i denna del av profilen (Figur 17D, gult fält).



Figur 17: Radargram över profil 3 på kupolpalsen med olika antenner; **B**: 500 MHz överst och **C**: 250 MHz näst längst ner. **D**: en kompositbild som visar alla lager. Färgade linjer visar olika reflektorer, notera att storleken är olika med skalan den samma. Blå rektanglar visar områden med tydliga reflektorer som återfinns i mer än ett radargram. 800 MHz saknas på grund av svårigheter med antennen på underlaget.

Figure 17: Radargram over profile 3 on the palsa dome with different antennas; **B**: 500 MHz on the top and **C**: 250 MHz second from the bottom. **D**: a composite image showing all layers. Colored lines show different reflectors, note that the size is different, but the scale is the same. Blue rectangles show areas with strong reflectors. 800 MHz is missing due to difficulties with the antenna.

5.1.5 Gemensamma mönster och motivering till tolkning

Gemensamt för alla radargram är att den gula linjen tolkats som snöns underkant då den stämmer överens med observationer gjorda på plats där snödjupet är djupare utanför palsarna än ovanpå dem (Kader & Knezevic, 2019). Dessutom är snöns reflektorer relativt raka och regelbundna vilket stämmer överens med att snön faller i lager och att det bildas horisontella islager. Torvens undre gräns representeras av den gröna linjen och detta är baserat på reflektorer som följer ett relativt jämnt mönster samt djupet och tjockleken som sedan tidigare är känt att vara omkring en meter (Franzén, 1985). Detta stämmer överens med det som syns på radargrammen där torven ofta är cirka en meter djup, dock blir den upp mot två meter på vissa ställen.

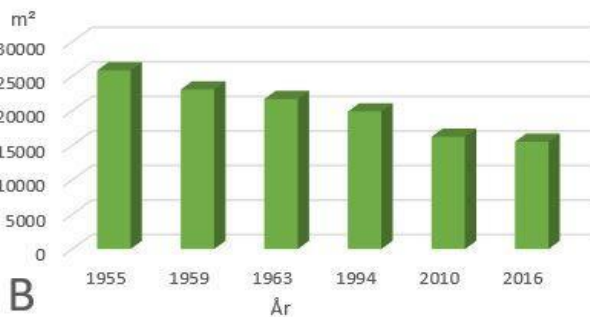
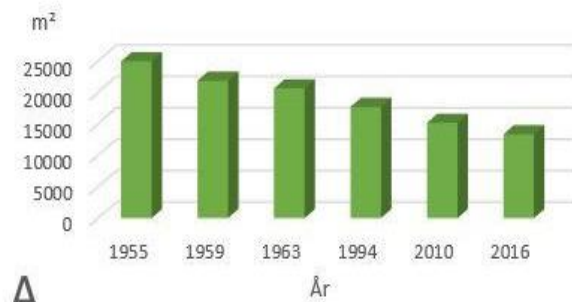
Tjäldjup och permafrostbas representeras av den röda linjen och har tolkats vara permafrost under palsen och tjäle vid palsens ytterkanter. Denna linje är baserad på starka reflektorer som ofta har gått lite djupare under palsen men sen gått närmre markytan vid palsens ytterkanter där reflektorn förmodligen är vinterns tjälbas.

Siltjord med issjösediment tolkas vara området mellan torvens nedre gräns och moränens övre gräns utefter tidigare kunskap om lagerföljden under torven (Olvmo et al., 2019). Det stämmer också överens med relativt svaga reflektorer i detta lager då siltjord med issjösediment har en låg reflekterande förmåga som gör att materialet syns sämre på ett radargram (Moorman, Robinson & Burgess, 2003).

Moränens gräns visualiseras med den lila linjen och är baserad på djupet men också den blockiga strukturen där större block syns som hyperboler, markerade med ljusblå färg. De ljusblå rektanglarna är områden där reflektorerna blir starkare och formas i kluster samt syns vid mer än en frekvens. Islinser av tillräcklig storlek ger starka reflektorer på grund dess höga reflekterande förmåga (Thomson, Osinski & Pollard, 2012). Dessa reflektorer tolkas även vara islinsler baserat på att de ligger i den frusna kärnan vid palsens upphöjning, över den tolkade permafrostbasen, och är en del i hur en pals växer sig större.

5.2. Palsdegradering

Degradering kan ses genom förändringar både i palsens inre struktur och i yttre gränser. Gällande yta så har flakpalsen och kupolpalsen minskat i storlek sedan år 1955 och mellanrummet mellan de två palsarna har blivit större. Flakpalsen har minskat med cirka 46 % (Figur 18A) och kupolpalsen har minskat med cirka 40 % mellan åren 1955 och 2016 (Figur 18B). Flakpalsen har degraderats relativt jämnt runtom hela palsen medan kupolpalsen främst har degraderats i den nordvästliga spetsen (Figur 19). Den totala palsarean har minskat hos båda palsarna vid varje karterat år men i olika takt (Figur 18A, Figur 18B). En likhet mellan flakpalsen och kupolpalsen är att den högsta förändringshastigheten per år var mellan åren 1955 och 1959 och den minsta förändringen var mellan 1963 och 1994 (Tabell 2, Tabell 3). Den genomsnittliga förändringen per år över hela perioden var högre hos flakpalsen än hos kupolpalsen (Tabell 2, Tabell 3).



Figur 18 **(A)**: Flakpalsens minskning i palsyta (m²) mellan åren 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 och 2016. **(B)**: Kupolpalsens minskning mellan åren 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 och 2016.

Figure 18 **(A)**: The palsa acreage (m²) decrease of the palsa plateau between the years 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 and 2016. **(B)**: The decrease of the palsa dome between the years 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 and 2016.

Tabell 2: Tabell över förändringshastigheten hos flakpalsen.

Table 2: Table over the rate of change at the palsa plateau.

| Period | Genomsnittsförändring per år i % |
|-----------|----------------------------------|
| 1955-1959 | -3,24 |
| 1959-1963 | -1,42 |
| 1963-1994 | -0,49 |
| 1994-2010 | -0,95 |
| 2010-2016 | -2,12 |
| | |
| 1955-2016 | -1,01 |

Tabell 3: Tabell över förändringshastigheten hos kupolpalsen.

Table 3: Table over the rate of change at the palsa dome.

| Period | Genomsnittsförändring per år i % |
|-----------|----------------------------------|
| 1955-1959 | -2,79 |
| 1959-1963 | -1,52 |
| 1963-1994 | -0,28 |
| 1994-2010 | -1,26 |
| 2010-2016 | -0,74 |
| | |
| 1955-2016 | -0,83 |



Teckenförklaring

- Palsar 2016
- Palsar 2010
- Palsar 1994
- Palsar 1963
- Palsar 1959
- Palsar 1955

0 50 100 200 Meter

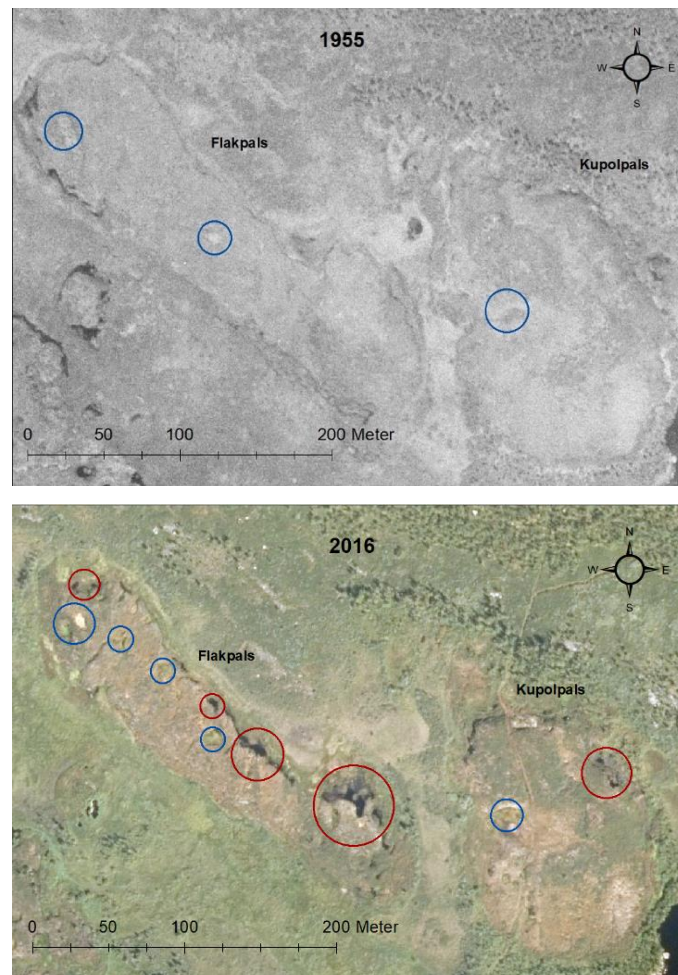
Karta av
Julia Cederbrant &
Cornelia Wing

Figur 19: Karta över minskningen i palsyta mellan åren 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 och 2016 på båda palsarna.

Figure 19: Map over the decrease in palsa acreage between the years 1955, 1959, 1963, 1994, 2010 and 2016 on both palsas.

5.2.1 Bildning av termokarstsjöar och sänkor

Sänkor och termokarstsjöar är ytterligare sätt att se palsars degradering där sänkor är degradering i höjddled och termokarstsjöar är degradering i form av permafrostsmältning. Termokarstsjöar har bildats på den nordöstliga sidan av båda palsarna men fler sjöar har bildats på flakpalsen (Figur 20). På flygbilden från år 1955 syntes inga termokarstsjöar på någon av palsarna. Termokarstsjön på kupolpalsen var den som bildats mest nyligen då denna inte syntes på flygbilden år 2010 och har bildats mellan åren 2010 och 2016. På flakpalsen syns ett flertal sänkor på palsen (Figur 20) men dessa går ej att se lika tydligt på kupolpalsen. Endast sänkor med tydliga gränser visualiserades i degraderingskartan (Figur 18) men fler sänkor kunde anas på flygbilderna (Figur 20). Sänkan på kupolpalsen är ett exempel på detta då den har otydliga gränser men skiljer sig från omgivande palsmark. Endast tre sänkor syns på flygfotot från 1955, övriga verkar ha bildats senare.



Figur 20: Karta över termokarstsjöar (röda cirklar) samt några av de tydligaste sänkorna (blå cirklar) på palsarna vid år 1955 och 2016.

Figure 20: Map over thermokarst lakes (red circles) and some of the most visible depressions (blue circles) on the palsas in the year of 1955 and 2016.

6. Diskussion

6.1 Resultatdiskussion

Med georadarteknik har vi kunnat identifiera lager av snö, torv, tjäl- och permafrost och morän i palsen. Med hjälp av olika antenner har en bra bild av olika lager kunnat återges med hög upplösning ner till cirka 11 meter. Jämfört med tidigare studier där endast en antenn har använts (Kohout et al. 2014; Sjöberg et al. 2015) ger denna möjlighet till en mer säker tolkning av palsens inre struktur. I arbetet har fyra profiler valts ut för presentation, med andra profiler hade jämförelser mellan de olika palstyperna kunnat se annorlunda ut.

Tjäl- och permafrostbasen varierade i djup både inom samt mellan profiler och syntes på radargrammen från 250 MHz- och 500 MHz-antennerna. Det finns en tendens till att permafrostbasen på kupolpalsens går något djupare än på flakpalsen vilket skulle kunna vara en anledning till att kupolpalsar är något högre än flakpalsar. Detta då en större utbredning av permafrost i mineraljorden leder till mer issegregation och därmed en högre upphöjning ur palsen (Seppälä, 2011). En likhet mellan samtliga profiler var att djupet på tjäl- och permafrostbasen var som störst där palsen var som högst och att den sedan blev grundare i palsens ytterkanter. Att avgöra den exakta gränsen för permafrost och tjäle är svårt utan att använda sommarkarta när tjälen är upptinad. Dock går det att argumentera för att all frusen mark utanför palsens yttergränser är tjäle som tinar under sommarsäsongen (Seppälä, 2006). Tjälen är relativt djup på de undersökta profilerna (Figur 12, Figur 13, Figur 16, Figur 17) men då kärrets blötare egenskaper gynnar sommarvärmens förmåga att penetrera djupare än vad den kan göra på den torrare palsen skulle den hinna tinas sommartid. Siltjorden med issjösediment tolkas vara ett något tjockare lager på kupolpalsen än på flakpalsen. Att permafrostbasen når ner till siltjorden på samtliga profiler tyder på att båda palsarna är i ett moget stadium (ibid) och riskerar att tinas upp underifrån (Zuidhoff, 2002). Vid profil 3 på kupolpalsen (Figur 17D) syntes en uppträngning av siltjorden vid palsens topp vilket tyder på att issegregation sker i palsen och gör att palsen blir högre. Detta sätter press på torvlagret och gör att torven kommer spricka upp ytterligare i framtiden (Figur 2). När torven spricker kan värme tränga ner i palsen och den degraderas då även ovanifrån.

Moränen syns som en uppträngning under palsens topp vid profil 8 på kupolpalsen (Figur 16) vilket kan få samma effekt som siltjordens uppträngning på profil 3. Detta är ett naturligt steg

i palsens livscykel och ett tecken på att kärnan har vuxit under många år (Seppälä, 2006). Moränen kunde endast tydas med 250 MHz-antennen då den ligger djupt ner i marken. Hade bara 800 MHz och 500 MHz använts hade moränens övre gräns inte kunnat tydas. Ifall endast 500 MHz och 250 MHz använts hade någon uppskattning om torvens övre lager eller snödjupet inte kunnat göras. Genom att använda flera antenner där två eller fler visar samma reflektorer på samma djup skapas en mer trovärdig uppfattning om materialens utbredning i marken. Då attribut i marken blir tydliga med olika antenner skapas en bättre helhetsbild med hjälp av en sammanvägning. Dock bör det nämnas att det inte bara är upplösningen som spelar roll i val av antenn utan även hur väl de fungerar på det valda underlaget. I denna undersökning var antennen med 800 MHz inte optimal då den gav likvärdig information som 500 MHz-antennen men fungerade betydligt sämre på underlaget.

Torvens bas tolkades på radargrammen i andra steget, både på flakpalsen och kupolpalsen, att vara mellan några decimeter till två meters djup vilket kan anses rimligt utifrån tidigare forskning som fått liknande resultat (Kohout et al, 2014). Snölagret var som tydligast med 800 MHz-antennen och var som djupast en halvmeter. Både vid kupolpalsen och flakpalsen fanns det mer snö utanför palsens topp och ut mot kärnmarken. Troligen ansamlas mer snö vid palsens kanter eftersom upphöjningen ger en större zon av lä (Kader & Knezevic, 2019).

Starka kluster av reflektorer i profilerna har tolkats som islinser i den frusna kärnan hos palsarna. I tidigare undersökningar med georadar har islinser varit svåra att se på grund av antennens begränsade upplösning men de har dokumenterats vara upp till 20 centimeter stora med borrhov (Kohout et al, 2014). Genom användandet av flera olika antenner kunde islinser tolkas på grund av deras tjocklek och dielektriska konstant. Kombinationen av flera antenners radargram skapade förutsättningar för denna undersökning att få en bra helhetsbild över palsarnas inre struktur som hade varit betydligt svårare att få med endast en antenn. Antennerna har haft olika bra upplösning på varierande djup vilket har gjort att vissa fenomen blir tydligare med en antenn. För att kunna urskilja alla lager i en pals behövs dock en sammanvägd bild av radargram från olika antenner. Att jämföra profiler mellan flygfoton och radargram samt ha kunskap om området gav ytterligare information om vad som kan tolkas i radargrammen. Exempelvis finns reflektorer på radargrammet vid profil 3 på kupolpalsen (Figur 17) som sammanfaller med en stig vi kan se på flygfotot från 2016 (Figur 20). Denna stig syntes inte under fältstudien på grund av snöns tjocklek och därför hade dessa reflektorer kunnat misstolkas utan kunskap om palsens utseende.

När det kommer till degraderingen av palsarna syns vissa skillnader mellan flakpalsen och kupolpalsen även om de båda följer en nedåtgående trend i palsarea. Flakpalsen verkar degraderas mer jämnt runt hela palsen medan kupolpalsen framförallt har degraderats vid sin spets (Figur 19). Det har bildats ett allt större avstånd mellan palsarna sedan 1950-talet där de nästan gick samman. På både flakpalsen och kupolpalsen har termokarstsjöar bildats i nordostlig riktning. Detta skulle kunna bero på att det är ett större snölager i denna riktning och att termokarstsjöar har bildats där palsen har börjat kollapsa (Zuidhoff, 2003). På flakpalsen har det både bildats fler termokarstsjöar och fler sänkor än på kupolpalsen vilket tyder på att den förstnämnda har degraderats i högre grad. Att flakpalsen har degraderats snabbare syns också genom att genomsnittsförändringen per år är högre hos flakpalsen (Tabell 2, Tabell 3) samt att storleken har minskat med 46 % mellan åren 1955 och 2016 medan storleken av kupolpalsen bara har minskat med 40 % (Figur 18A, Figur 18B).

Minskningen av palsareal hos dessa två palsar är högre än minskningen som har skett i hela palskomplexet (Figur 3). Jämförelser mellan olika stora studieområden kan bli felaktiga om detaljeringsgraden på karteringen har varit högre i det mindre området. Karteringar är alltid subjektiva och man behöver hålla sig kritisk till den totala minskningens exakthet. Det finns dock en tendens att flakpalsen och kupolpalsen har degraderats i större grad jämfört med hela palskomplexet oavsett detaljnivå på karteringen då även tidigare studier har visat denna tendens (Mora & Thelin, 2018)

Genom georadarundersökningen tolkades palsarna vara i ett moget stadium baserat på permafrostens utbredning i mineraljorden. Tillsammans med degraderingskartan indikeras att palsarna är i ett sent moget stadium där de har börjat kollapsa. Zuidhoff (2003) visade genom datering av palsar i Laivadalen att dessa verkar ha bildats för drygt 100 år, någon gång kort efter lilla istidens slut. Dessa palsar befinner sig, precis som de i Vissátvuopmi i ett moget stadium, och detta skulle kunna tyda på att de bildades under samma period. Klimatet för palsbildning var fördelaktigt under 1800-talets senare hälft och har under 1900-talet blivit mindre gynnsamt (ibid). Den degradering vi har kunnat utläsa kan därför ses som ett resultat av palsars cykliska utveckling men där palsar inte kunnat nybildas i samma utsträckning sedan 1900-talets början och de som bildats då har nu börjat kollapsa (Zuidhoff, 2003). Med tre samverkande negativa faktorer: palsar i ett cykliskt slutskede, klimatförändringarnas allt mer ogynnsamma förutsättningar och låg grad av nybildning kommer en nedåtgående trend

fortsätta. Detta skulle kunna resultera i palsars försvinnande inom en relativt snar framtid om klimatet inte blir mer gynnsamt för nybildning av palsar.

6.2 Metoddiskussion

En av de största svårigheterna gällande georadarundersökningen var det varierande underlaget och att dessa gav olika förutsättningar för de olika antennerna. Snötypen varierade under fältarbetet vilket kan ha påverkat insamlingen av data. Beslutet att trampa sönder skaren gjordes eftersom detta gav ett så likt underlag som möjligt längs med hela profilen samt att antennen med mät hjul inte gled i sidled. Det är viktigt att mät hjulet inte glider eftersom det då inte kan mäta avståndet på ett korrekt sätt och då inte heller skjuter ut pulser med rätt avstånd. Ytterligare en svårighet kopplat till underlaget var att antennerna var svårhanterliga i de branta sluttningarna på kupolpalsens nordliga sida. Detta var framförallt ett problem med 800 MHz-antennen då den välte omkull även vid små lutningar och fick stora svårigheter vid sluttningarna. En bidragande orsak till detta problem var också att mät hjulet var för stort i förhållande till antennens storlek och tyngd. Underlagets stora variation skapade också problem vid kalibrering då det tio meter långa kalibreringsunderlaget inte kan bli exakt samma som underlaget vid alla profiler. Exempelvis stack vegetationen upp genom snön på toppen av kupolpalsen vilket ger en annan friktion för hjulet än snö.

Att välja en hastighet och att använda samma hastighet för alla lager i palsen kan göra att meterskalan på radargrammen inte blir helt korrekt. Ytterligare en felkälla vid bearbetningen av radargrammen är vilka reflektorer som valts ut för att visa ett material. Det är viktigt att notera att meterskalan på radargrammen kan ha en viss felmarginal då den är ett direkt resultat av den valda hastigheten. Hastigheten för detta arbete bestämdes utifrån tidigare forskning samt kunskap om marken men hade kunnat vara mer exakt om ett borrhov gjordes tillsammans med beräkningar av de olika marklagrens dielektriska konstant.

Alla insamlade radargram bearbetades och fyra stycken valdes ut. Detta gjordes baserat på deras spridning över palsarna, att de inte hade några försvårande moment såsom branta sluttningar samt att de var representativa och tydliga. Hade andra profiler valts hade djuper på exempelvis permafrostbasen kunnat skilja sig något men överlag fanns liknande trender över alla profiler på respektive pals. Som tidigare nämnt är det inte det exakta djupet som är mest

relevant utan snarare att kunna se utbredningen av olika lager vilket vi kan genom dessa profiler.

Ett GIS-relaterat problem vid kartering av palsar är hur man avgör var palsens yttre gräns går. Hur gränsen tolkas kan bero på bildens kvalitet, färgsättning och upplösning (Tabell 1). Dessa parametrar skiljer sig mellan nya och gamla foton och därmed kan karteringen skilja sig mellan olika år. För beräkning av palsars degradering spelar det även roll om man räknar med sprickor och termokarstsjöar i arealen eller inte. Georeferering har alltid betydelse för hur väl resultatet stämmer överens både med verkligheten samt andra flygfoton. Om georefereringen är dåligt tillämpad är det svårt att jämföra resultat mellan olika år.

6.3 Vidare forskning

För att få en bättre helhetsbild av palsarnas degradering hade höjddata kunnat användas kompletterande till palsarealens minskning. Lasermätningar från flera år hade kunnat användas för att se förändringar i höjd men i dagsläget finns endast data från 2010. Degradering i form av erosion alternativt inre smältning hade genom skillnader i höjd mellan olika år kunnat bli synliga. För att kunna urskilja tjäle från permafrost hade det varit fördelaktigt att göra en liknande georadarundersökning sommartid när tjälen tinat helt. En vidareutveckling av denna undersökning hade kunnat vara att använda alla profilers olika lagerdjup för att interpolera hela palsens inre struktur. För att kunna dra bättre slutsatser om skillnader mellan flakpalsar och kupolpalsar i både inre struktur och degradering bör fler palsar av båda sorter undersökas med ett flertal antenner som i denna undersökning.

7. Slutsatser

Genom georadarundersökningen kunde snölager, torvlager, större islinser, siltjord, tjäl- och permafrostbas samt morän urskiljas i palsars inre. Skillnader mellan de olika palstyperna var svåra att tolka men permafrosten tenderar att vara något djupare på kupolpalsen. Dessutom hade denna pals tydligare upphöjning i siltjorden på en profil och i moränen på den andra. Snödjupet var som tydligast med 800 MHz-antennen. Torvens bas, kluster av islinser samt tjäl- och permafrostbasen syntes på både 500 MHz-antennen och 250 MHz-antennen och en kombination av dessa är att föredra för att undersöka palsars inre struktur. Moränlagret syntes dock bara när 250 MHz användes. I en kompositbild kunde lagret av silt med issjösediment urskiljas mellan torven och moränen. Att använda flera antenner vid en georadarundersökning över palsar är en fördelaktig metod ifall samtliga lager i marken ska identifieras med hög upplösning vilket i tidigare forskning inte har gjorts. Trovärdigheten för identifieringen av material blir högre eftersom olika frekvenser kan bekräfta materialens utbredning. Baserat på permafrostens omfattning vid georadarundersökningen samt degraderingsmönstret tolkades palsarna vara i ett moget stadium och på väg att kollapsa. Termokarstsjöar, vilket också är ett tecken på degradering har på båda palsarna bildats på den nordöstra sidan, men fler termokarstsjöar och sänkor har bildats vid flakpalsen. Kupolpalsens storleksminskning har framförallt skett i den nordöstra spetsen medan flakpalsen minskat runt om hela palsen mellan de specifika åren 1955 - 2016. Flakpalsens yta har minskat mer än kupolpalsens yta och den genomsnittliga förändringshastigheten per år är högre hos flakpalsen. Dessutom är degraderingshastigheten högre på de bägge undersökta palsarna än i hela palsmyrkomplexet. Både de undersökta palsarna och många andra palsar i Sverige är i dagsläget i ett moget stadium där de degraderas och nybildningen av palsar är ytterst liten på grund av det rådande klimatet. Ett vidare ogynnsamt klimat för palsbildning gör att palsar i Vissátvuopmi riskerar att försvinna i framtiden.

8. Källförteckning

- Biskaborn, B.K., Smith, S. L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletsy, D.... Lantuit, H. (2019). Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, *10*(264)
- Borge, A. F., Westermann, S., Solheim, I., and Etzelmüller, B. (2017). Strong degradation of palsas and peat plateaus in northern Norway during the last 60 years. *The Cryosphere*, *11*, 1-16
- Calmels, F., Allard, M., Delisle, G. (2007). Development and decay of a lithalsa in Northern Québec: A geomorphological history. *Geomorphology*, *97*, 287-299.
- Calmels, F., Delisle, G., Allard, M. (2008). Internal structure and the thermal and hydrological regime of a typical lithalsa: significance for permafrost growth and decay. *Canadian Journal of Earth Sciences*, *45*, 31-43.
- Dobinski, W. (2011). Permafrost. *Earth- Science Reviews*, *3-4*(138), 158-169
- Conyers, L.B. (2015) Analysis and interpretation of GPR datasets for integrated archeological mapping. *Near Surface Geophysics*, *13*
- Franzén, L. (1985). *Peat in Sweden - A method to calculate the resources*. (Doctoral thesis, Gothenburg Studies in Earth Sciences). Göteborg: Acta Universitatis Gothoburgensis.
- IPCC. Anisimov, O.A., D.G. Vaughan, T.V. Callaghan, C. Furgal, H. Marchant, T.D. Prowse, H. Vilhjálmsón and J.E. Walsh, 2007: Polar regions (Arctic and Antarctic). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 653-685.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
- Kader, K., Knezevic, B. (2019). *Snödjupsfördelningen och snödensitetens påverkan på palsdegradationen i Vissátvuopmi, Saarikoski, Lappland*. (Kandidatuppsats) Göteborg: Institutionen för Geovetenskaper, Göteborgs universitet.
- Kohout, T., Bučko, M., Rasmus, K., Leppäranta, M., Matero, I. (2014). Non-Invasive

- Geophysical Investigation and Thermodynamic Analysis of a Palsa in Lapland, Northwest Finland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 25, 45–52
- Kujala, K., Seppälä, M. & Holappa, L. (2008). Physical Properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology*, 52(3)
- Leifeld, J., Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications*, 1(9)
- Luoto, M., Fronzek, S., Zuidhoff, F.S., 2004. Spatial modelling of palsa mires in relation to climate in northern Europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 1373–1387.
- Länsstyrelsen Norrbotten (2014). *Kartering av Sveriges palsmyrar*. Luleå: Länsstyrelsen
- Länsstyrelsen Norrbotten (2017). *Inledande dokumentation inom övervakningsprogram för Sveriges palsmyrar*. Luleå: Länsstyrelsen
- Moorman, B., Robinson, S., Burgess, M. (2007). Imaging near-surface permafrost structure and characteristics with Ground-Penetrating Radar. *Permafrost and Periglacial Processes*, 32
- Mora, S., Thelin, M. (2018). *Nederbördens, temperaturens och snödjupets påverkan på palsdegradationen i Vittankivuoma, Saarikoski, Lappland*. (Kandidatuppsats) Göteborg: Institutionen för Geovetenskaper, Göteborgs universitet.
- Naturvårdsverket (2015). *Skog och Mark- Om tillståndet i svensk landmiljö*. Stockholm: Naturvårdsverket
- Olvmo, M., Holmer, B., Reese, H., Thorsson, S. (2019). *Palsa degradation in the Vissatvoupmi palsa complex, northern Sweden between 1955 and 2016 – the role of different climatic drivers*. Manuscript.
- Peel, M., Finlayson, N., T, McMahon. (2007). Updated Worldmap of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Pengerud, A., Johnsen, L., Cécillion, L., Rasse, D. (2013). Permafrost Distribution Drives Soil Organic Matter Stability in a Subarctic Palsa Peatland. *Ecosystems*, 16(6)
- Poluha, B., Porsani, J.L., Almeida, E.R., dos Santos, V.R.N., Allen, S.J. (2017). Depth Estimates of Buried Utility Systems Using the GPR Method: Studies at the IAG/USP Geophysics Test Site. *International Journal of Geosciences*, 8, 726-742
- Ruppel, C. (2011) Methane Hydrates and Contemporary Climate Change. *Nature Education Knowledge* 3(10)
- Samet, R., Çelik, E., Tural, S., Şengönü, E., Özkan, M., Damcı, E. (2017). Using interpolation techniques to determine the optimal profile interval in ground-penetrating radar applications. *Journal of Applied Geophysics*, 140, 54-167.

- Schennen, S., Tronicke, J. (2015). The potential of common-offset GPR surveying in complex permafrost environments: an example from Northern Siberia. *IEEE*
- Seppälä, M. (2006). Palsa mires in Finland. In *Finland - land of mires*. Helsinki: Finnish Environment Institute
- Seppälä, M. (2003). Surface abrasion of palsas by wind action in Finnish Lapland. *Geomorphology*. 52, 141-148
- Seppälä, M. (2011) Synthesis of studies of palsa formation underlining the importance of local environmental and physical characteristics. *Quaternary Research*, 75, 366-370
- Sjöberg, Y., Marklund, P., Pettersson, R., Lyon, S. (2015) Geophysical mapping of palsa peatland permafrost. *The Cryosphere*, 9, 465–478.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Timothy, L., Folke, C., Liverman, D.... Schellnhuber, H. (2018) Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *PNAS*, 115(33)
- Svenska Geotekniska Föreningen (2006) *Georadar - metodblad*. Fjärås: Svenska Geotekniska Föreningen
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) (2017A). *Normal årsmedelnederbörd*. Hämtad 2019-05-13 från: <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/temperatur/normal-arsmedeltemperatur-1.3973>
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) (2017B). *Normal uppmätt årsnederbörd, medelvärde 1961-1990*. Hämtad 2019-05-13 från: <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/nederbord/normal-uppmatt-arsnederbord-medelvarde-1961-1990-1.4160>
- Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut (SMHI) (u.å) *Snö*. Hämtad 2019-05-13 från: <http://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/sno>
- Thomson, L., Osinski, G., Pollard, W. (2012) The dielectric permittivity of terrestrial ground ice formations: Considerations for planetary exploration using ground-penetrating radar. *Journal of Geophysical Research*. 117
- Trafikverket (2017) *Ground Penetrating Radar Introduction to GPR, and positioning of GPR data*. Borlänge: Trafikverket
- Wramner, P., 1973. *Palsmyrar i Taavavuoma, Lapland* (Palsa bogs in Taavavuoma, Swedish Lapland). Göteborgs Universitet
- Zuidhoff, F., Kolstrup, E. (2000) Changes in palsa distribution in reaction to climate change

in Laivadalen, northern Sweden, especially 1960-1997. *Permafrost and Periglacial Processes*, 11(1)

Zuidhoff, F. (2002). Recent decay of a single palsa in relation to weather conditions between 1996 and 2000 in Laivadalen, Northern Sweden. *Geografiska Annaler: Series A Physical Geography*, 84(2)

Zuidhoff, F. (2003). *Palsa Growth and Decay in Northern Sweden – climatic and environmental controls*. (Doctoral thesis, Uppsala Faculty of Science and Technology). Uppsala: Acta Universitatis Uppsaliensis.