

# Camp Century radarundersøgelser

Nanna B. Karlsson, William T. Colgan  
& Signe Bech Andersen

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER  
FOR DANMARK OG GRØNLAND,  
ENERGI-, FORSYNINGS- OG KLIMAMINISTERIET

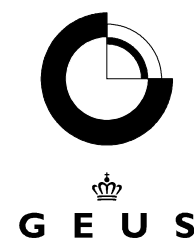


**G E U S**

# Camp Century radarundersøgelser

Nanna B. Karlsson, William T. Colgan  
& Signe Bech Andersen

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER  
FOR DANMARK OG GRØNLAND,  
KLIMA-, ENERGI- OG FORSYNINGSMINISTERIET



# **Camp Century radarundersøgelser**

GEUS Teknisk notat

Nanna B. Karlsson, seniorforsker

William T. Colgan, seniorforsker

Signe B. Andersen, statsgeolog

## Forord

Dette notat indeholder en kort beskrivelse af kortlægningen med radar udført i forbindelse med "Camp Century undersøgelses- og overvågningsprogrammet" samt en opsummering af resultaterne af dataanalysen. Arbejdet blev udført af De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) i 2017 og 2018. Notatet tjener som en oversigt over og supplement til den engelsksprogede videnskabelige artikel "*Ice-penetrating radar survey of the subsurface debris field at Camp Century, Greenland*" indsendt til tidsskriftet Cold Regions Science og Technology i efteråret 2018.

# Introduktion

I 2016 udkom en videnskabelig artikel, der peger på, at klimaforandringer i Grønland inden for dette århundrede muligvis kan frigøre efterladenskaber fra den nedlagte amerikanske Camp Century-base. Camp Century blev anlagt i 1960'erne langt inde på Indlandsisen, hvor der på det tidspunkt ikke forekom afsmeltning. Det var antagelsen dengang, at ophobet sne-fald ville betyde, at Camp Century ville forblive nedgravet i Grønlands indlandsis. På nuværende tidspunkt ligger størstedelen af efterladenskaberne i dybder mellem 30 og 65 m. Klimaforandringer bevirker, at der nu forekommer afsmeltning ved Camp Century, og ifølge modelberegninger fra ovennævnte artikel vil der fra omkring udgangen af dette århundrede smelte mere is over Camp Century, end der dannes ny is som følge af nedbør.

Til vurdering af de klimamæssige aspekter af Camp Century-problematikken er følgende undersøgelses- og overvågningsprogram blevet påbegyndt:

1. Kortlægning af Camp Century-området for at få øget kendskab til udbredelsen og positionen af efterladenskaberne.
2. Overvågning af afsmeltning og snefald i Camp Century-området.
3. Udvikling af model som anvender målinger foretaget ved Camp Century til at give et bedre estimat af, hvornår udsivning af kontamineret smeltevand kan blive en realitet.

Dette notat beskæftiger sig med resultaterne fra kortlægningen af området i 2017, en kortlægning der blev udført ved hjælp af radartechnik. Resultaterne af kortlægningen vil i tilgift til at give indsigt i udbredelsen og positionen af efterladenskaberne blive anvendt i det efterfølgende arbejde med at modellere smeltevandsnedsivning i området.

## Dataindsamling 2017

"Camp Century undersøgelses- og overvågningsprogrammet" blev igangsat med en omfattende feltsæson i sommeren 2017. Et hold på seks personer blev transporteret fra Thule-basen med fly til den oprindelige Camp Century-lokalitet. I løbet af to uger arbejdede holdet fra en midlertidig teltlejr med at indsamle målinger i området.

Følgende målinger blev foretaget i området:

- To borer af firn<sup>1</sup>-kerner på hhv. 73 m og 62 m dybde og efterfølgende måling af temperatur med termistorstreng.
- 80 km radarlinjer med frekvens på 250 MHz eller 100 MHz Malå (250 MHz med en lukket antenne, 100 MHz med en slange-antenne).
- Etablering af vejrstation og dermed tilhørende vejrmålinger inklusive temperatur, vind, solindstrålingsbalance og afsmeltning.

---

<sup>1</sup> Firn er gammel sne, der endnu ikke er blevet omdannet til is. Overgangen fra firn til is sker typisk i adskillige hundrede meters dybde.

Målingerne fra vejrstationen kan tilgås via projektets hjemmeside [www.campcenturymate.dk](http://www.campcenturymate.dk). Radardata vil blive gjort tilgængelige samme sted, når den videnskabelige artikel er publiceret forventelig i foråret 2019.

# Radardata: Metode, processing og analyse

Her beskrives kort den teoretiske baggrund for anvendelse af radarmålinger over is og sne, samt hvordan radardata er blevet processeret og analyseret.

## Metode

Radar er baseret på udsendelse og modtagelse af elektromagnetiske bølger. Indenfor visse radarbølgefrekvenser er sne og is 'gennemsigtige', dvs. at et radarsignal kan trænge igennem sne og is, indtil signalet har mistet al energi. Hver gang signalet møder en overflade af en anden beskaffenhed (dvs. med forskellige elektriske egenskaber) bliver en del af signalet reflekteret. Denne refleksion kan måles af en radarmodtager. Tidsforskellen mellem udsendelse af radarsignalet og modtagelsen af det reflekterede signal kan bruges til at bestemme dybden af det reflekterende lag. En præcis bestemmelse af dybden afhænger af fornøden viden om hastigheden af radarsignalet gennem det medie, det passerer. For målinger gennem sne og firn kan hastigheden bestemmes ved hjælp af viden om firnens densitet (tæthed, se Fig. A1 i appendix). Udover dybden kan enkelte andre oplysninger om et reflekterende lag opnås fra radarmålingerne. For eksempel kan der skelnes mellem et lag, der består af flydende materiale, og lag der består af sne eller is.

I Camp Century-projektet brugtes en radarantenne, der kombinerer afsender og modtager i én enhed. Radarantennen blev trukket over overfladen af sneen af en operatør på ski (se Fig.1 nedenfor). Selve målingerne var planlagt som linjer i en tæt gitter-struktur i nord-syd og øst-vest orientering. I området hvor Camp Century stationen mentes at være begravet var afstanden mellem radarlinjerne 50 m eller mindre. Geografiske koordinater for data blev indsamlet samtidigt med radardata med en usikkerhed på ca. 3 m.

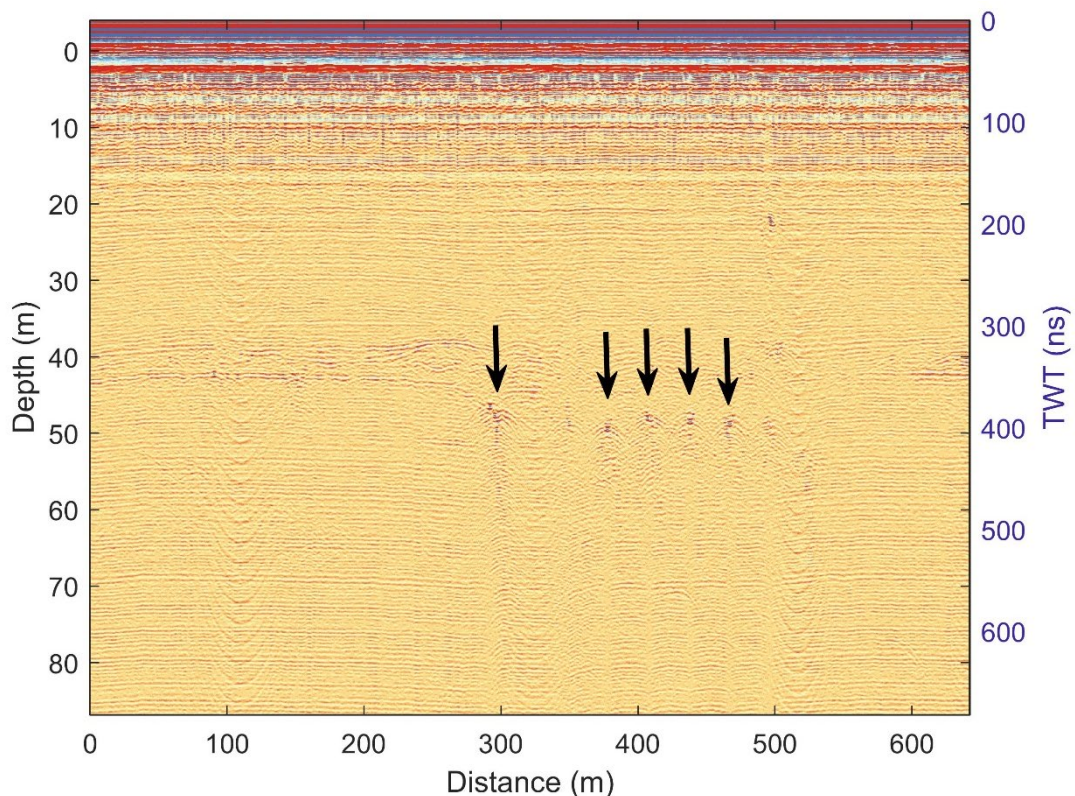


Figur 1: Radarantennen trukket på ski over sneoverfladen

## Processering og analyse

Efter dataindsamling blev radardata processeret for at fremhæve reflektionerne i firnen. Derefter blev data korrigeret for side-refleksioner, der uden korrektion fremkommer i en forkert dybde. Efter korrektionen (såkaldt "fk migration") fremstår de reflekterende områder som punkter i den korrekte dybde. Til sidst blev data omregnet fra signaltid til dybde.

Figuren nedenfor viser et eksempel på processeret radardata. Dybden er her blevet udregnet fra signaltiden (TWT: two-way traveltime). Refleksionerne fra metalloftet i tunnellerne er markeret med sorte pile.



*Figur 2: Eksempel på et radargram. Mørke farver indikerer øget refleksion. De sorte pile angiver refleksionerne fra metalloftet af tunnellerne i den centrale del af Camp Century. Bemærk at der ikke ses signaler under tunnellerne (skyggeeffekt).*

Efter processeringen blev radardata analyseret for tilstedeværelsen af refleksioner i firnen. Samtlige identificerede refleksioner blev kortlagt, og hvor radarlinjerne krydsede hinanden, blev det kontrolleret, at refleksionerne var tilstede i begge radarlinjer og i samme dybde. Denne analyse udmunder i kort over dybde og udbredelse af refleksioner.

Derudover blev enkelte radarlinjer analyseret for, om ekstra stærke eller dybe refleksioner var forårsaget af flydende vand eller glykol.

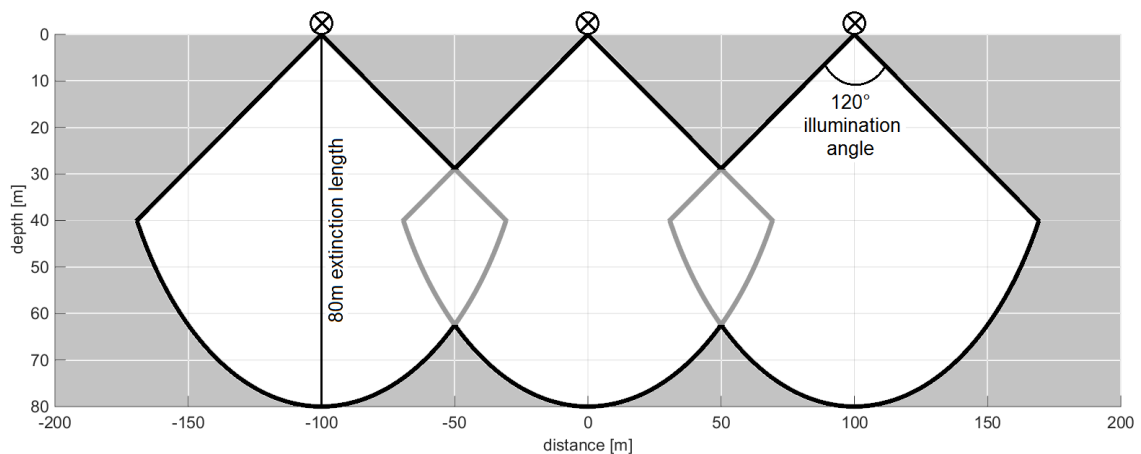


## Radardataopløsning

I det følgende skal begrebet “opløsning” forstås, som den største længde-dimension en struktur kan have uden at blive detekteret af radaren.

Langs med radarlinjerne måler signalet i den fulde dybde fra overflade, indtil alt signalets energi er brugt. For en frekvens på 250 MHz er denne dybde ca. 80 m. Mellem radarlinjerne måles imidlertid ikke de fulde 80 m. Hvis vi antager en radarsignalvinkel på  $120^\circ$  og et energitab svarende til en maksimal signaldybde på 80 m, kan en såkaldt blind vinkel beregnes mellem radarlinjerne. Dette er vist skematisk på Fig. 3. Som det ses, er der et område mellem radarlinjerne, der ikke bliver målt.

Dybden fra det gamle overfladelag og til vores maksimale signaldybde på 80 m er fuldt dækket i områder, hvor der er 50 m mellem radarlinjerne. Det estimeres således, at i det centrale måleområde<sup>2</sup> observeres 95% af det gamle overfladelag fra tiden, hvor Camp Century blev konstrueret. Men blinde vinkler findes udenfor dette område, hvor afstanden mellem radarlinjerne er større. På den baggrund estimerer vi, at opløsningen på radardata er 10 m, dvs. alle efterladenskaber større end 10 m i længden er blevet fundet.

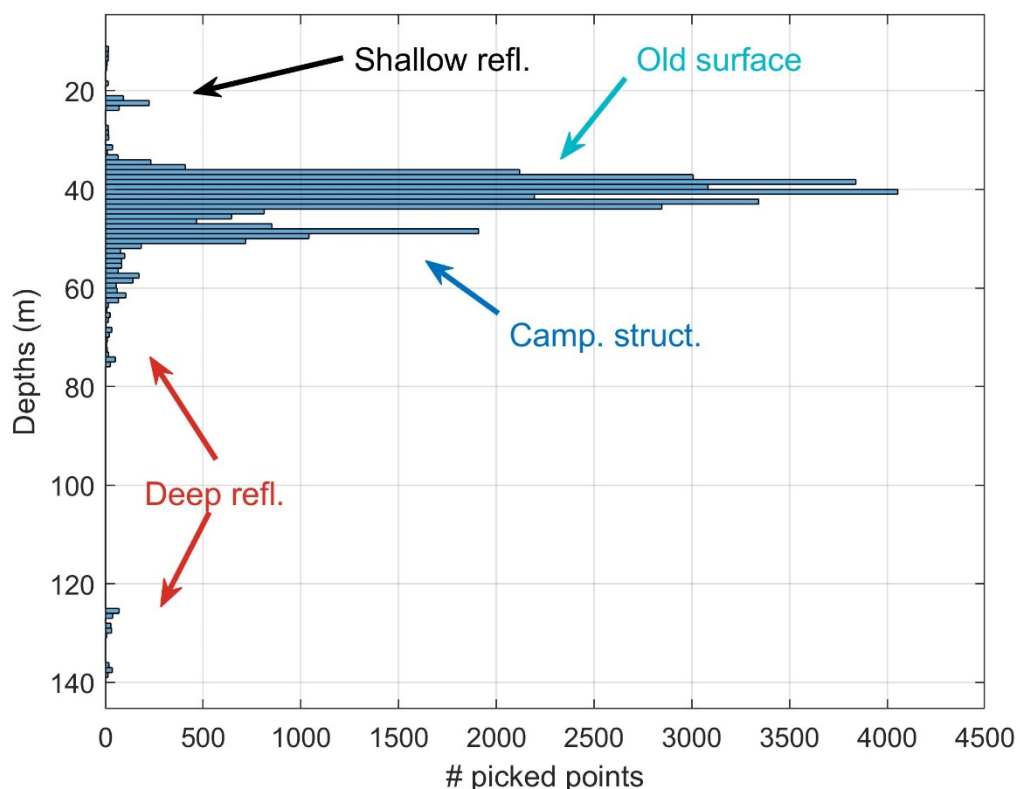


Figur 3: Idealiseret skitse over radarsignal og blinde vinkler for en afstand mellem radarlinjerne på 100m.

<sup>2</sup>Det 3.8 km<sup>2</sup> cirkulære område med en radius på 1.1 km der udgør størstedelen af måleområdet.

## Resultater

Kortlægningen af refleksionerne er blevet brugt til identifikation af den begravede struktur fra Camp Century. Overordnet set er udstrækningen og dybden af de begravede strukturer som forventet ud fra de historiske kilder. Der blev ikke fundet større ( $>10$  m) strukturer andre steder end allerede angivet på historiske kort. Mindre refleksioner, som er blevet fundet omkring området, svarer efter al sandsynlighed til efterladte effekter som for eksempel tomme olierønder eller kabler. Dette er forventeligt i betragtning af, at lejren var aktiv over en lang årrække. Vi skelner i det følgende mellem refleksioner, som skyldes dybe depoter, begravde tunneller og refleksioner, som befinder sig på, hvad der ved stationens etablering var sneoverfladen. De to sidstnævnte typer udgør størstedelen af de identificerede refleksioner. Refleksionerne fra den tidligere sneoverflade skyldes primært, at aktiviteten på overfladen i forbindelse med lejren har ændret sneens struktur og gjort den mere tæt. Dermed fremkommer en radarrefleksion. I det følgende vil refleksionerne fra den tidligere sneoverflade ikke blive yderligere diskuteret. For en fuldstændig oversigt over resultaterne henvises til den videnskabelige artikel. Fig. 4 nedenfor giver et overblik over fordelingen af refleksionerne.

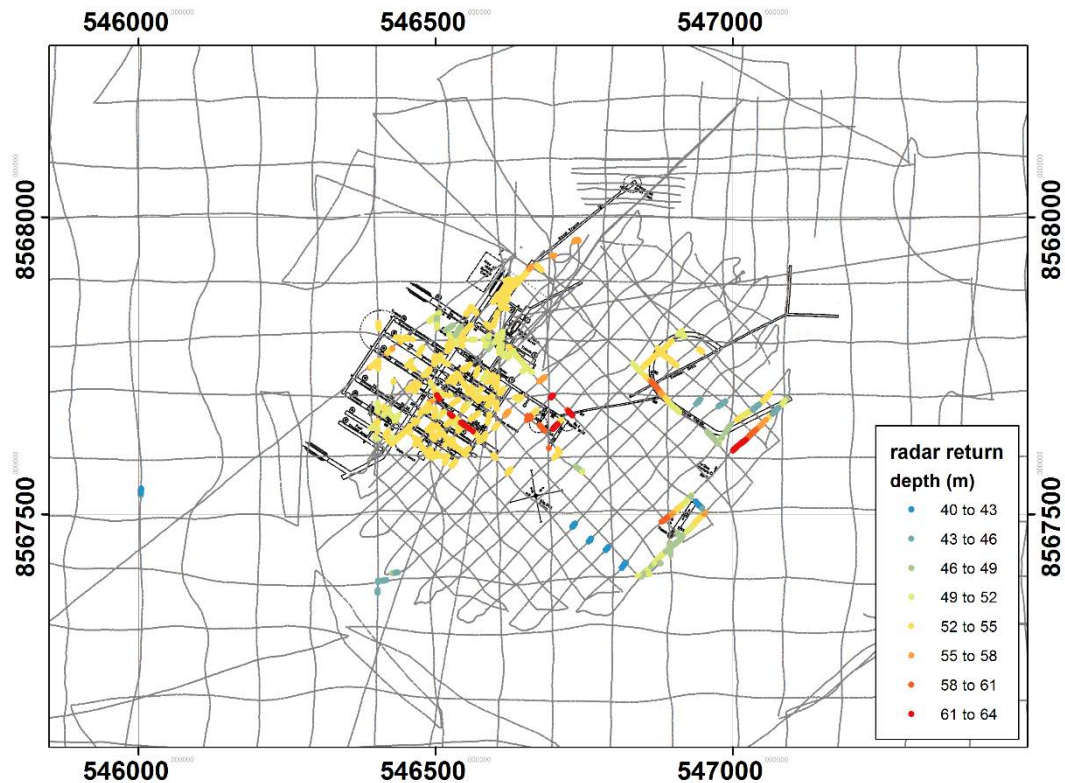


Figur 4: Fordeling af de identificerede refleksioner i forhold til dybden.

## Begravede tunneller

Den begravde tunnelstruktur kan forholdsvis let identificeres i radardata. Kortlægningen viser, at toppen af tunnellerne befinder sig i omkring 50 m dybde. Enkelte tunneller er dybere.

Udstrækningen af tunnellerne svarer i vid udstrækning til historiske kort over området. Ved en simpel sammenligning kan vi dermed overføre vores dybde-estimerer til det historiske kort og identificere hver enkelt tunnel samt estimere dens nuværende dybde (se Fig. 5). Denne sammenligning giver også mulighed for at vurdere, hvor hurtigt isen og dermed efterladenskaberne bevæger sig i den horisontale retning. Dette er muligt, fordi positionen af det radio-meteorologiske tårn blev målt med høj nøjagtighed i 1986. Ved hjælp af den nye position målt i 2017 kan det beregnes, at isen bevæger sig med en hastighed af  $4.0 \pm 0.7$  m/år i vestsydvestlig retning (ca.  $253^\circ$ ).

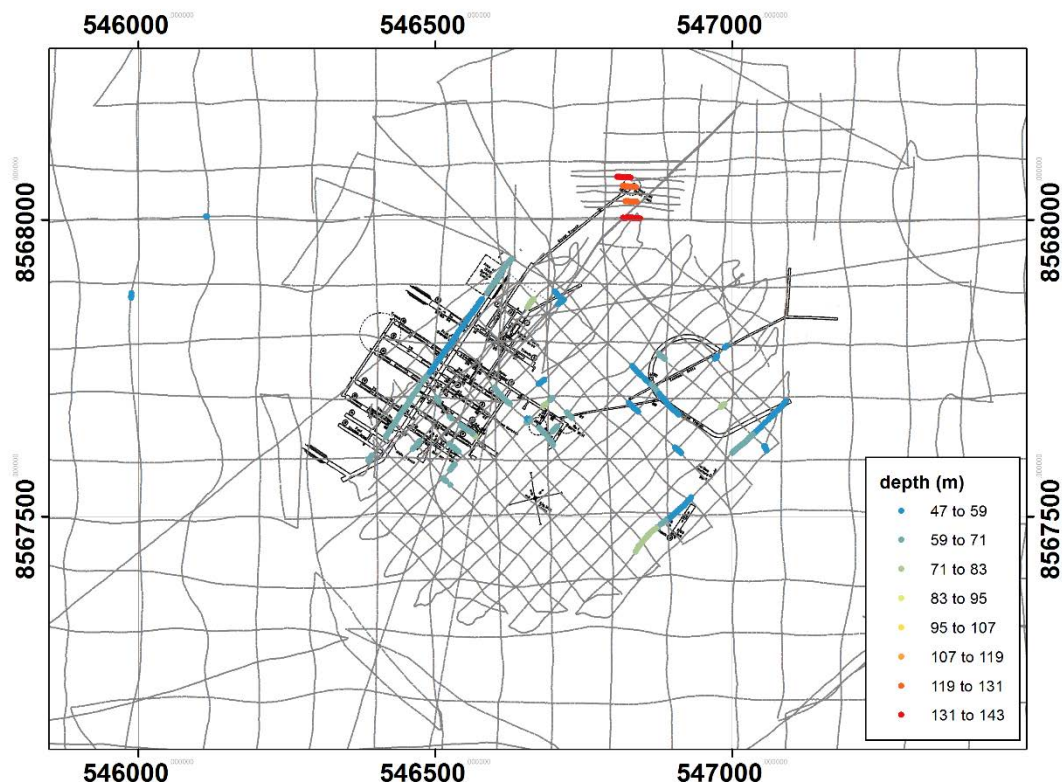


Figur 5: Historisk kort over Camp Century tunnellerne med radardata (250 MHz) indsamlet i 2017 (grå linjer). De farvede områder indikerer dybden af radarrefleksionerne.

## Dybe refleksioner

I tilgift til refleksionerne fra den begravede lejr blev forskellige dybereliggende refleksioner også identificeret. Størstedelen af disse refleksioner befinder sig imellem 55 m til 80 m dybde og findes i det samme område som de begravede tunneller. Derudover lykkedes det at kortlægge enkelte dybe refleksioner ned til 130 m dybde.

Signalerne fra de dybeste refleksioner er blevet analyseret yderligere. Den øgede refleksion indikerer, at der er tale om et andet materiale end sne og firn. Imidlertid viser signalets form, at der ikke er tale om flydende vand. Når radarsignaler reflekteres fra vand skifter signalet polaritet (se Fig. 6 nedenfor samt Fig. A2 og A3 i appendix), men det sker ikke her. Sammenholdt med det historiske kort er det sandsynligt, at der er tale om et glykol-depot, der blev etableret i udkanten af den primære lejrstruktur. Glykol forårsager nemlig ikke et skift i polaritet af radarsignaler.

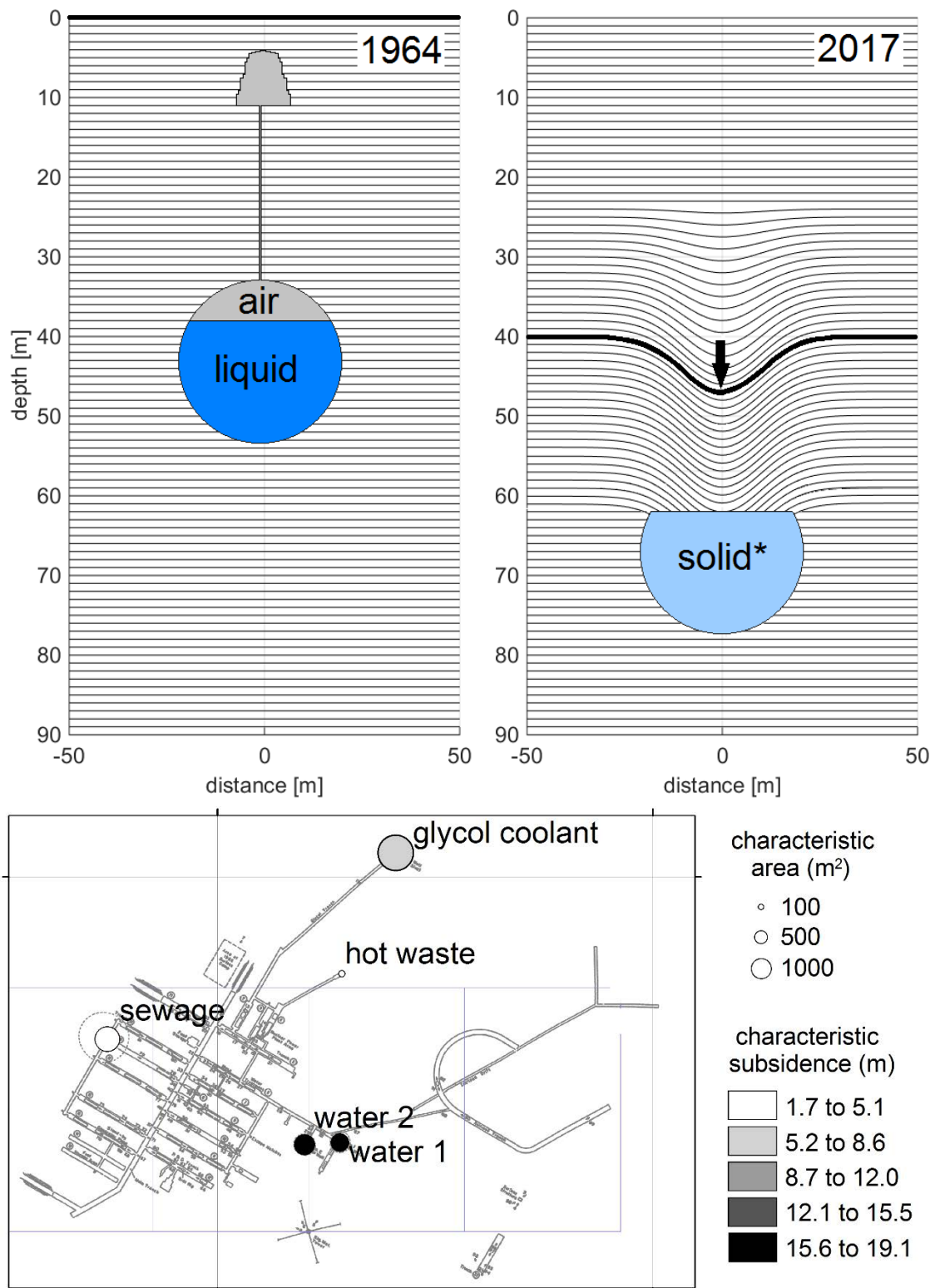


Figur 6: Dybden af de dybeste refleksioner fra radardata (100 MHz og 250 MHz) sammenholdt med det historiske kort over Camp Century. Radarlinjerne er indikeret med grå linjer.

## Nedsynkning af væskedepoter

Mens Camp Century lejren var aktiv, blev væsker fra lejrens drift ledt ned i firnen i depoter, der befandt sig markant dybere end tunnellerne. Der er i historisk materiale beskrevet følgende depoter: To vandreservoirdepoter, et glykoldepot, et afløbsdepot samt et depot i forbindelse med den nukleare reaktor (Fig. 7). Efterfølgende er flere af disse depoter sunket sammen, og det har medført en synlig nedsynkning i den overliggende firn og dermed radarlagene (se Fig. 8 og Fig. A2 og A3 i appendix). Sammensynkningen skyldes til dels, at depoterne havde en del luft over væsken. Dette tomme luftrum er på et tidspunkt kollapsede og er blevet fyldt med sne. Dermed sker der en nedsynkning af de lag, der ligger over depotet. Tabellen nedenfor opsummerer de omtrentlige volumener af de kendte depoter vurderet ud fra historiske kilder.

|                                      | Vanddepot 1 | Vanddepot 2 | Afløbsdepot | Reaktordepot | Glykoldepot |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|
| Total volumen ( $10^3 \text{ m}^3$ ) | 17±4.3      | 24±5.6      | 38±7.6      | 1.4±0.29     | 100±21      |



Figur 7: Øverst: Illustration af nedsynkning af et væskefyldt depot. Linjerne svarer til lagene, der ses i radar-data. Den tykke sorte linje er sneoverfladen fra 1959-1965. Nederst: Historisk kort over Camp Century med væskedepoterne markeret som cirkler, hvor størrelsen af cirklen angiver den omtrentlige størrelse af depotet. Farver fra hvid til sort indikerer den teoretisk beregnede nedsynkning. \*solid: Beregningen er foretaget på baggrund af en væske med frysepunkt over  $-24^{\circ}\text{C}$ .

## **Vand- og afløbsdepoterne**

De to vandreservoirdepoter har efter al sandsynlighed naturligt forenet sig til et depot, der estimeres til at være i en dybde af 150 m og er dermed for dybt til at kunne ses på radardata præsenteret her. Imidlertid indikerer formen på radarlagene over depotet, at nedsynkningen stoppede inden for 30 år efter oprettelsen af depotet. Dvs. nedsynkningen af vandreservoirdepotet stoppede omkring 1990. Depotet fra kloak- og køkken afløbet angives i historiske kilder til at have et forholdsvis lille tomrum med luft, og beregninger viser således at depotet har en lille nedsynkning (omkring 5 m). Det stemmer overens med radardata: Ud fra lagene i radardata er denne nedsynkning stoppet inden for få år efter Camp Century blev forladt.

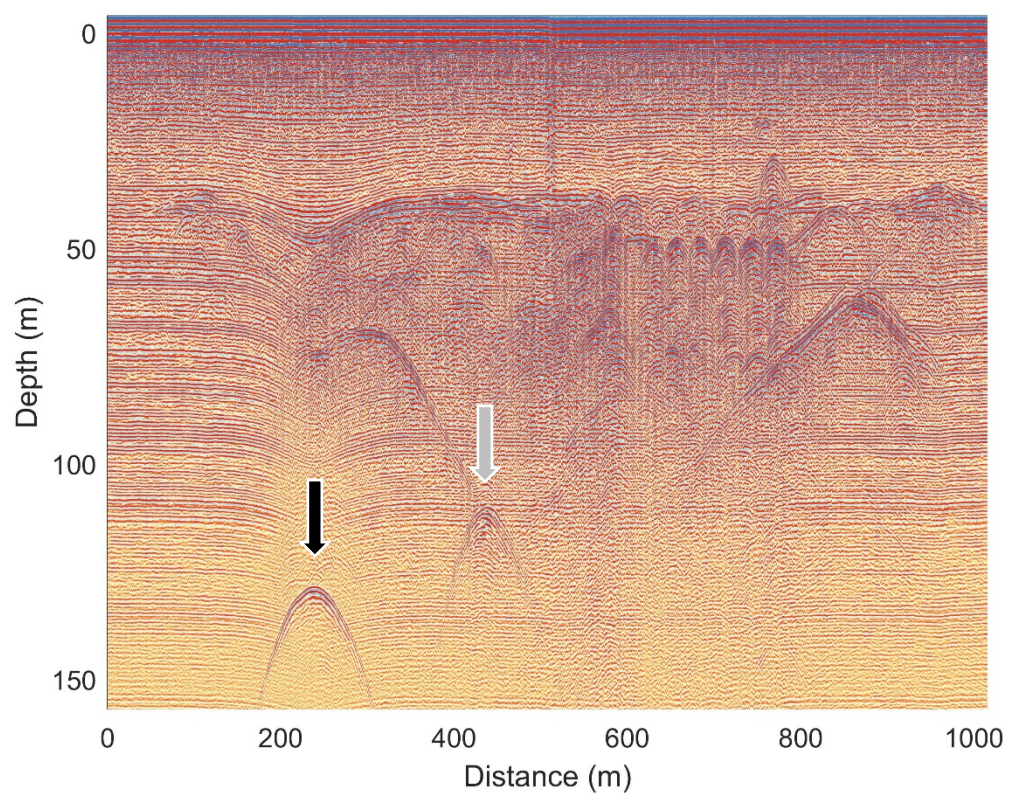
## **Glykoldepot**

Glykoldepotet stammer fra det kølevæske, der blev brugt til at nedkøle den nukleare reaktor. Dette depot blev målt med 100 MHz radarantennen, og en refleksion i ca. 120 m dybde kan identificeres (Fig. 8). Over denne refleksion er der en tydelig nedsynkning af firnen og i modsætning til vanddepoterne, er der tegn på, at nedsynkningen stadig er aktiv eller var aktiv indenfor de sidste 10 år. Denne proces foregår efter al sandsynlighed i glykoldepotet, fordi glykol har et meget lavere frysepunkt end vand, hvorved det er mere sandsynligt, at depotet stadig er flydende. Nedsynkningen kan sandsynligvis fortsætte så længe væskedepotet er flydende hvorved firn opblandes med glykol og frysepunktet sænkes. Så længe opblandingen finder sted, forsvinder der firn under væskedepotet, og det gør det muligt for væsken at trænge længere ned.

## **"Hot waste" depot**

Endelig er der depotet, der ifølge historiske kilder indeholder "hot waste" dvs. vand fra den nukleare reaktor. Dette depot er mindre end de andre depoter og har dermed haft markant mindre termisk energi til at smelte firnen. Dette stemmer overens med radardata, der ikke viser tegn på nedsynkning. Der er heller ingen synlige stærke refleksioner ned til 80 m dybde. På 100 MHz radardataene ses en refleksion i ca. 110 m dybde (Fig. 8), der kan være depotet, men det kan ikke afgøres med sikkerhed. Det kan ikke udelukkes, at der er dybere refleksioner i området, men det betragtes som usandsynligt, at der foregår en nedsynkning.





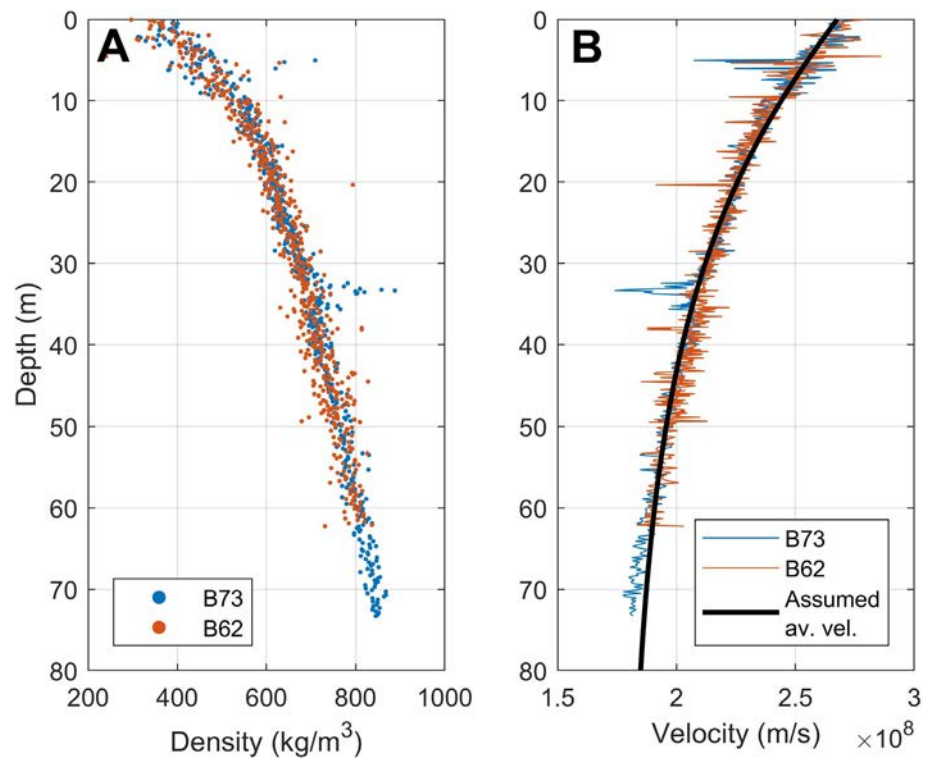
Figur 8: Eksempel på den dybe refleksion forårsaget af glykolen. Læg mærke til de nedsunkne lag. Den sorte pil angiver refleksionen fra glykoldepotet, den grå pil angiver den mulige refleksion fra "hot waste" depotet.

## Sammenfatning

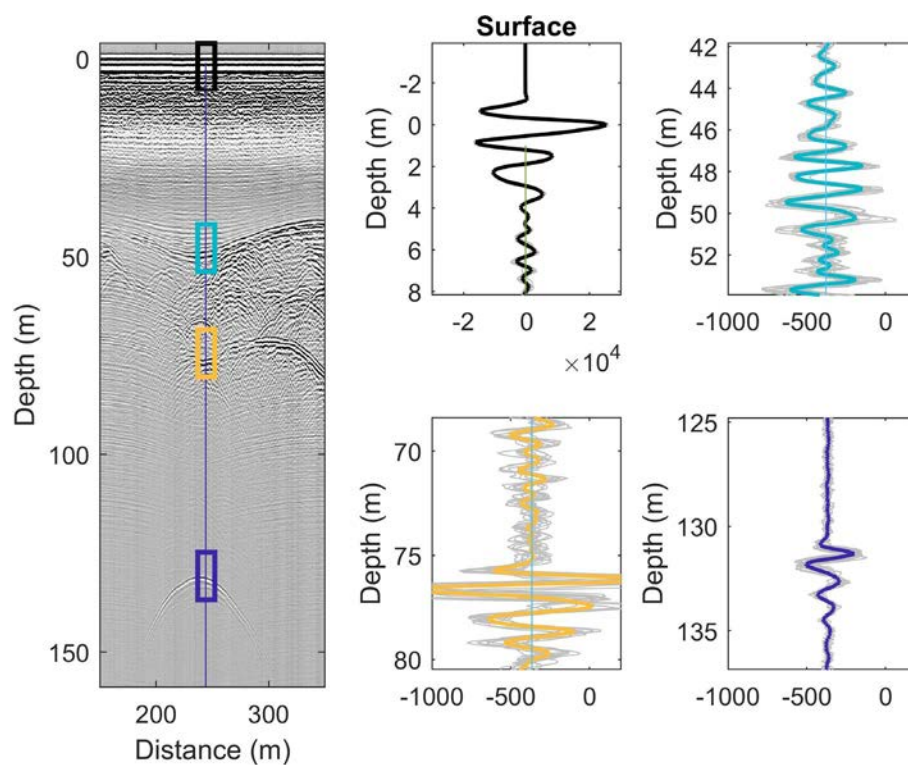
"Camp Century undersøgelses- og overvågningsprogrammet" har udført en omfattende kortlægning af Camp Century-lejrstrukturen ved hjælp af 80 km radardata indsamlet i sommeren 2017. Ud fra radardataanalysen er dybden og udbredelsen af lejren blevet fastlagt. Størstedelen af de identificerede refleksioner svarer til begravede tunnelstrukturer eller den tidligere modificerede sneoverflade. Tidligere væskedepoter kunne identificeres ud fra sammensynkning af overliggende lag eller for glykoldepotets vedkommende ved hjælp af en stærk refleksion i ca. 135 m dybde. Nedsynkningen af dette depot finder stadig sted eller ophørte for kun få år siden. De øvrige depoter ophørte med at nedsynke senest i 1990. Ud fra radardataopløsning vurderes det, at ingen ukendte strukturer større end 10 m er tilstede. Resultaterne af kortlægningen vil i tilgift til at give indsigt i udbredelsen og positionen af efterladenskaberne blive anvendt i det efterfølgende arbejde med at modellere smeltevandsnedsivning i området.



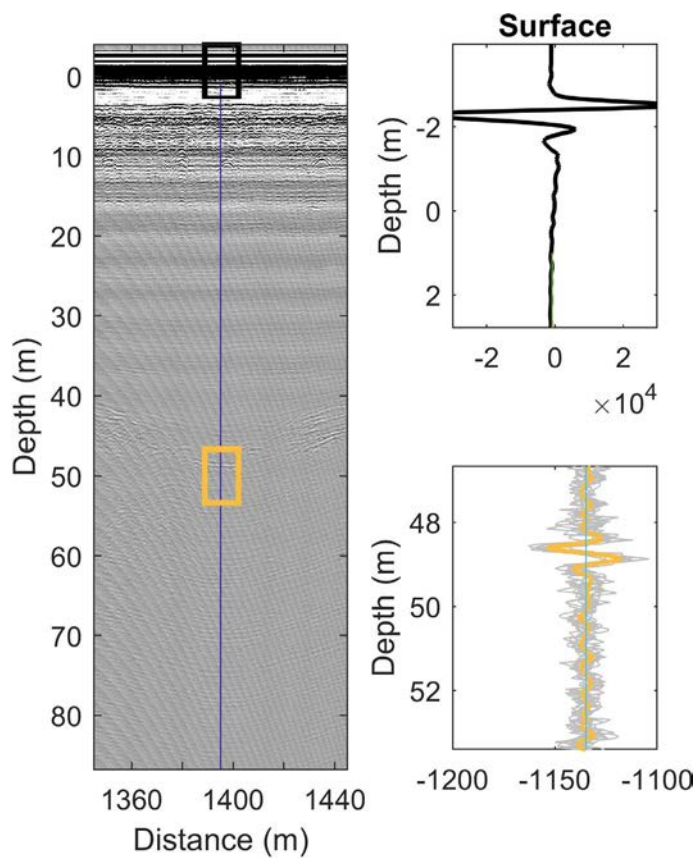
# Appendix



Figur A1: (A) Sneens densitet fra kernerne B73 (udenfor det centrale måleområde) og B62 (indenfor det centrale måleområde). (B) Den tilsvarende hastighed af radarbølgerne og den gennemsnitlige beregnede hastighed (sort).



Figur A2: Eksempel på et radargram fra 100 MHz radaren og tilsvarende zoom langs med et enkelt radar-signal. Der er en indikation på at der kan være flydende hydro-karboner i nærheden af glykoldepotet i ca. 130 m dybde.



Figur A3: Eksempel på et radargram fra 250 MHz radaren og tilsvarende zoom langs med et enkelt radar-signal. Her er der tegn på flydende vand i ca. 46 m dybde.