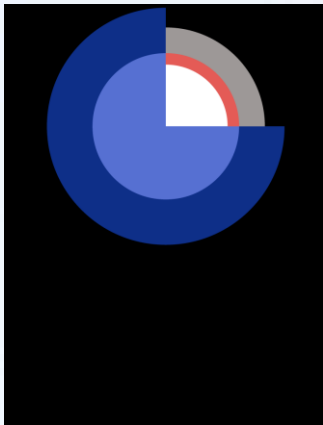


Camp Century klimaundersøgelser

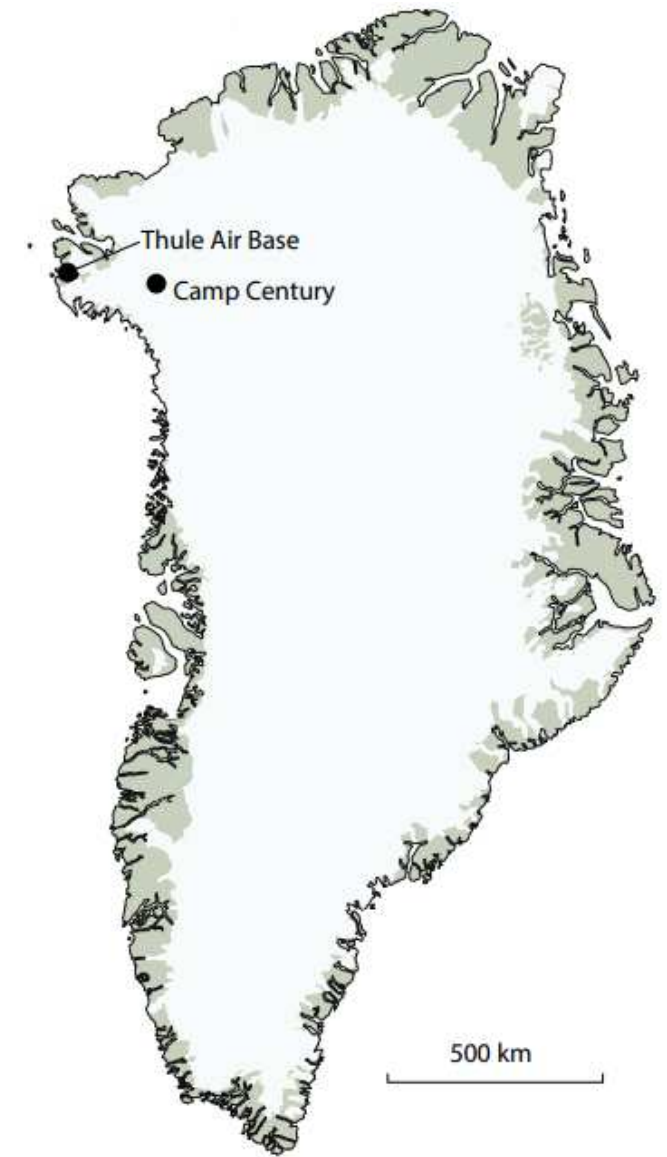
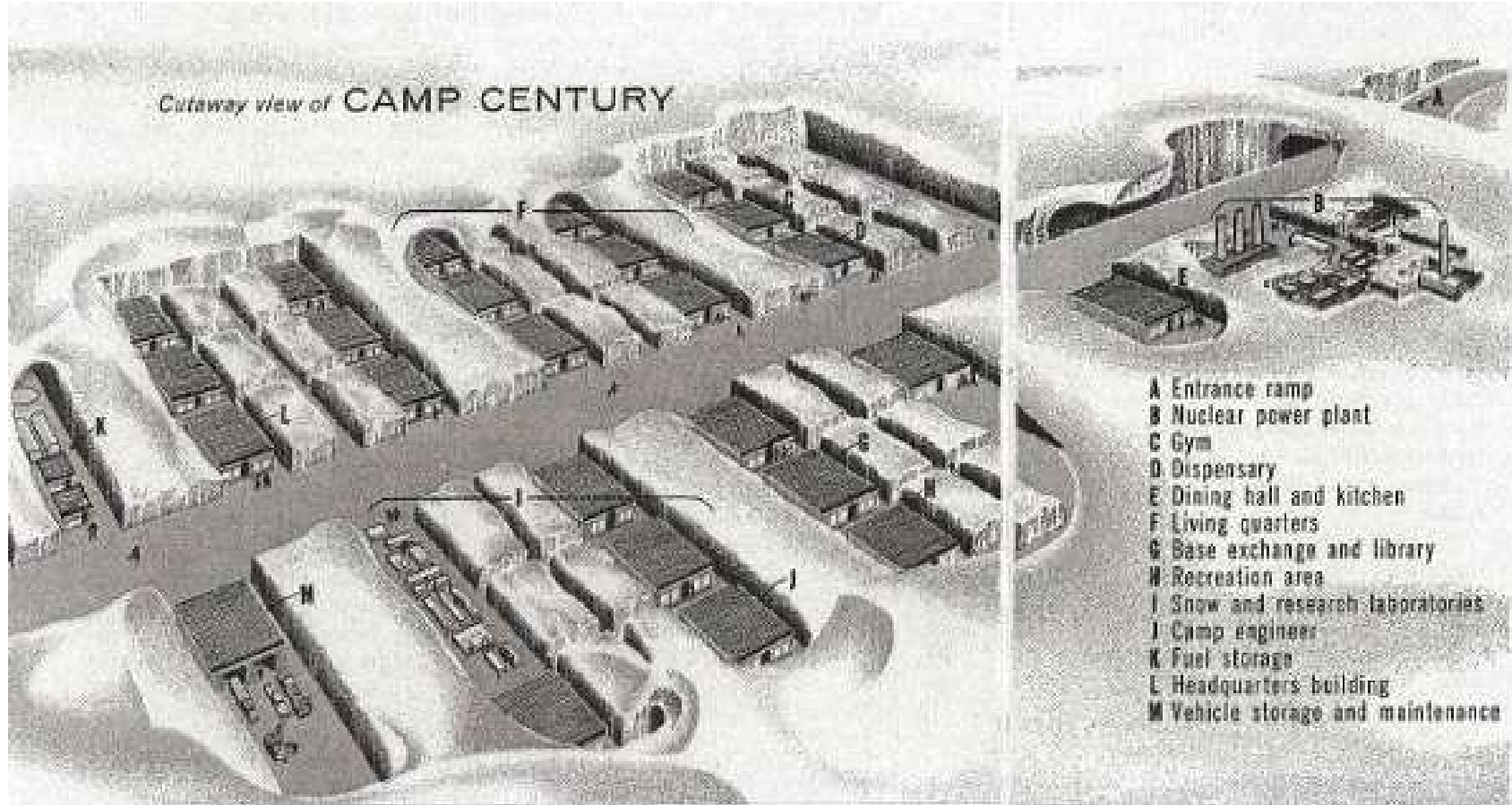
Teknisk gennemgang for Folketingets Grønlandsudvalg 21. april 2021

Statsgeolog Signe B. Andersen

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland



Camp Century



Camp Century

I 2016 udkom en videnskabelig artikel, der pegede på, at klimaforandringer i Grønland inden for dette århundrede muligvis kan begynde at smelte isen over den nedlagte amerikanske Camp Century-base og således frigøre affald fra basen.

RESEARCH LETTER

10.1002/2016GL069688

Key Points:

- The first inventory of wastes in the Greenland ice sheet at the abandoned military base Camp Century
- Regional climate modeling suggests that these wastes can no longer be considered "preserved for eternity"
- The potential remobilization of wastes previously deemed sequestered represents a new pathway to political dispute due to climate change

Supporting Information:

- Supporting Information S1
- Figure S1
- Figure S2
- Figure S3
- Figure S4
- Figure S5
- Figure S6

Correspondence to:

W. Colgan,
colgan@yorku.ca

Citation:

Colgan, W., H. Machguth, M. MacFerrin, J. D. Colgan, D. van As, and J. A. MacGregor (2016), The abandoned ice sheet base at Camp Century, Greenland, in a warming climate, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 8091–8096, doi:10.1002/2016GL069688.

Received 27 MAY 2016

The abandoned ice sheet base at Camp Century, Greenland, in a warming climate

William Colgan^{1,2}, Horst Machguth^{3,4}, Mike MacFerrin², Jeff D. Colgan⁵, Dirk van As⁶, and Joseph A. MacGregor⁷

¹Lassonde School of Engineering, York University, Toronto, Ontario, Canada, ²Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado, USA, ³Department of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland, ⁴Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland, ⁵Watson Institute, Brown University, Providence, Rhode Island, USA, ⁶Department of Glaciology and Climate, Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark, ⁷Cryospheric Sciences Laboratory (Code 615), NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA

Abstract In 1959 the U.S. Army Corps of Engineers built Camp Century beneath the surface of the northwestern Greenland Ice Sheet. There they studied the feasibility of deploying ballistic missiles within the ice sheet. The base and its wastes were abandoned with minimal decommissioning in 1967, under the assumption they would be preserved for eternity by perpetually accumulating snowfall. Here we show that a transition in ice sheet surface mass balance at Camp Century from net accumulation to net ablation is plausible within the next 75 years, under a business-as-usual anthropogenic emissions scenario (Representative Concentration Pathway 8.5). Net ablation would guarantee the eventual remobilization of physical, chemical, biological, and radiological wastes abandoned at the site. While Camp Century and four other contemporaneous ice sheet bases were legally established under a Danish-U.S. treaty, the potential remobilization of their abandoned wastes, previously regarded as sequestered, represents an entirely new pathway of political dispute resulting from climate change.

1. Historic and Climatic Context

The advent of long-range aircraft capable of deploying nuclear bombs drew military attention to the Arctic, the shortest route between the U.S. and USSR, during the Cold War. In April 1951, the U.S. and Denmark signed the Defense of Greenland Agreement. Three air bases, including Thule Air Base (AB) in northwestern Greenland, opened later that same year. In 1959, after several years of intensive ice sheet research, the U.S.

Camp Century klimaundersøgelser

Til vurdering af de klimamæssige aspekter af Camp Century-problematikken blev et undersøgelses- og overvågningsprogram påbegyndt i 2017 under ledelse af GEUS og med følgende mål:

1. Kortlægning af Camp Century-området for at få øget kendskab til udbredelsen og positionen af efterladenskaberne.
2. Overvågning af klima, afsmeltning, snefald og istemperaturer 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.
4. Offentliggørelse af alle data og undersøgelser på projektets hjemmeside www.campcenturyclimate.dk

Camp Century feltarbejde

Programmet 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:

- Etablering af klimastation og dermed løbende vejr målinger inklusiv temperatur, vind, solindstrålingsbalance og afsmeltning.
- To boringer af iskerner på hhv. 73 m og 62 m dybde og efterfølgende måling af temperatur med termistorstreng.
- Indsamling af 80 km radarlinjer .

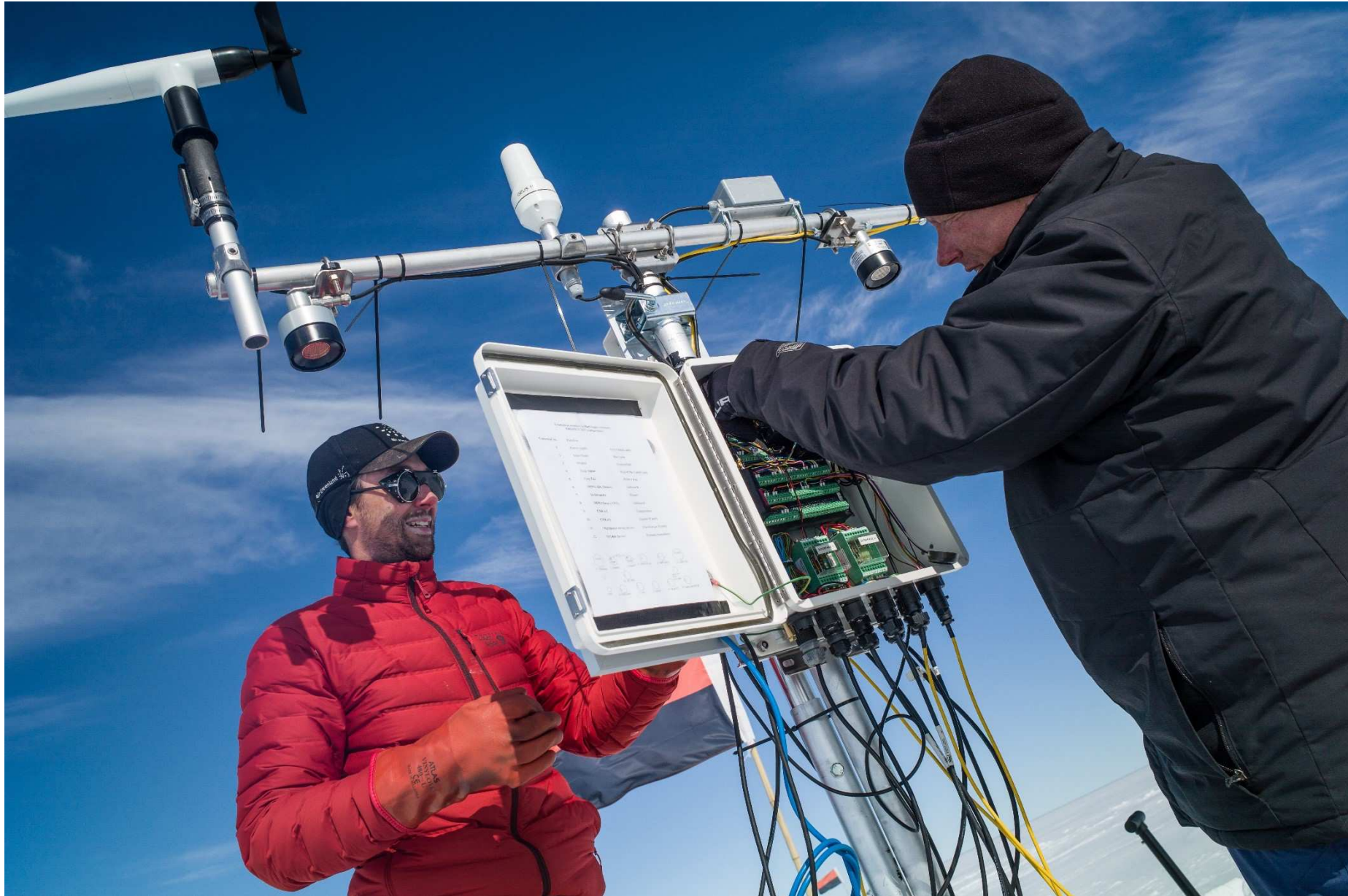
Twin Otter på ski



Camping

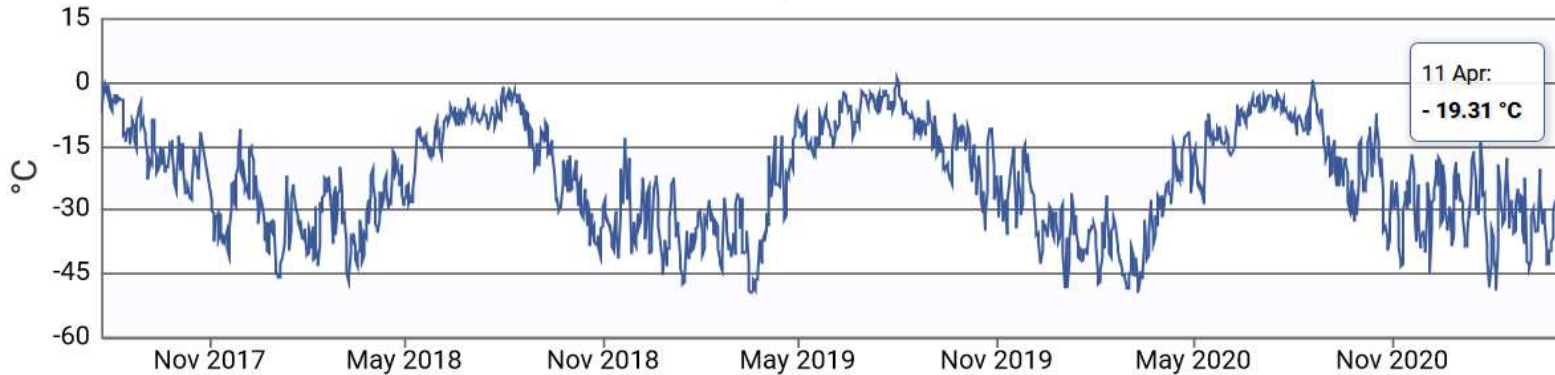


Etablering af klimastation



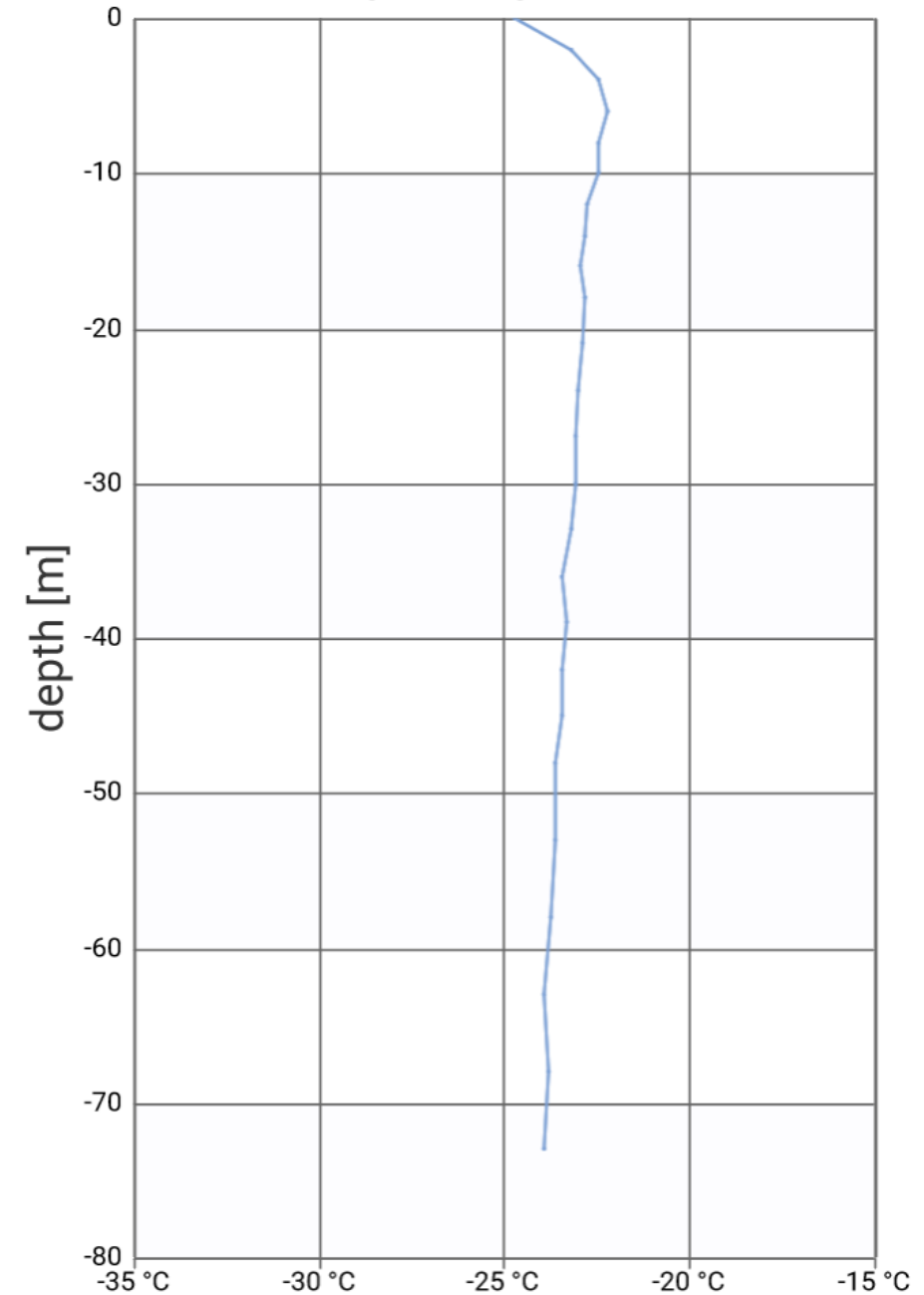
Klimadata online

Air temperature



Realtidsdata for lufttemperatur og istemperatur – samt mange andre klimaparametre – findes på www.campcenturyclimate.dk/ccc/data.html

Firn Temperature April 10, 2021



Boring af firnkerner



Indsamling af radarlinier

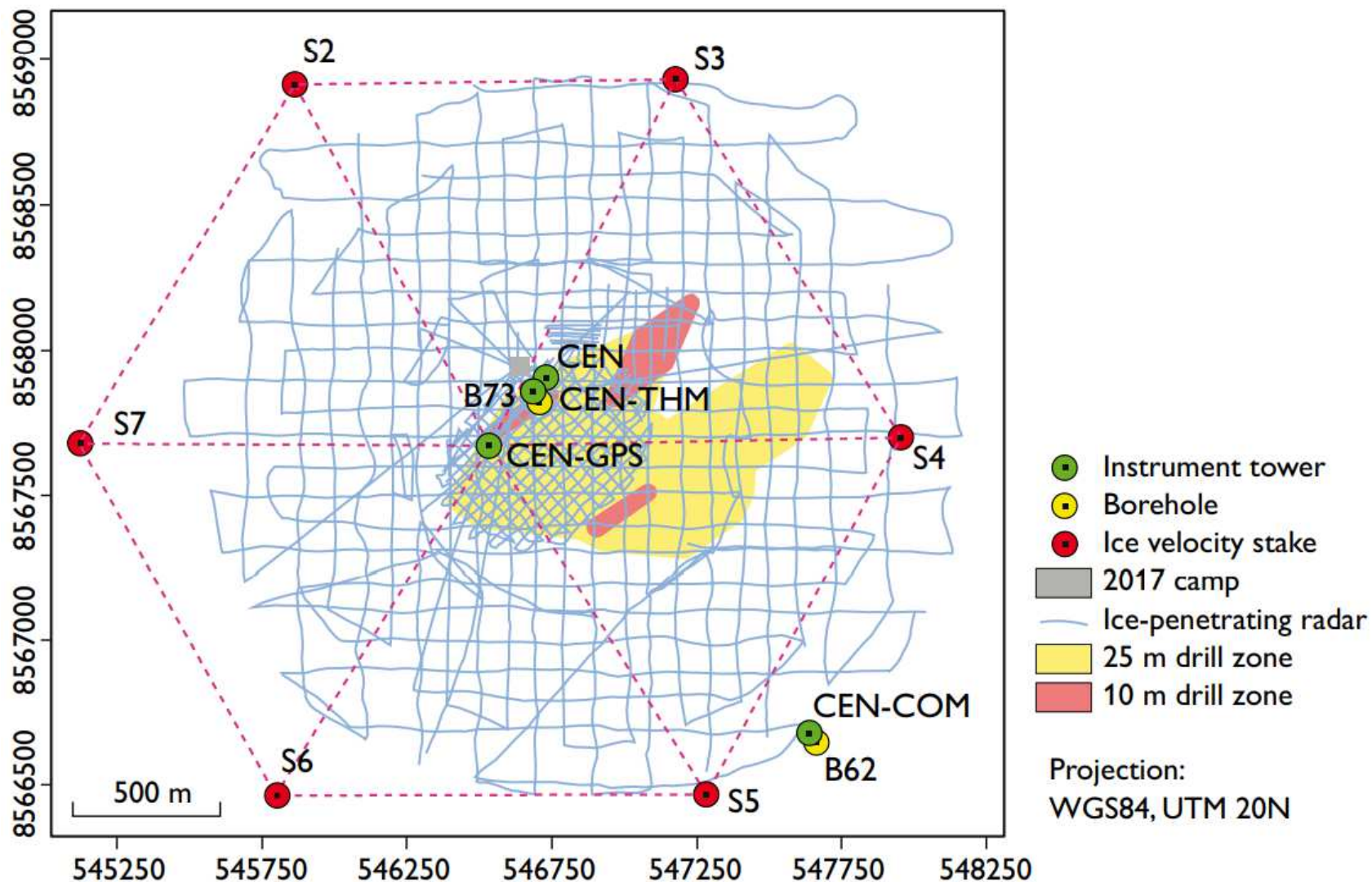


Indsamling af radarlinier

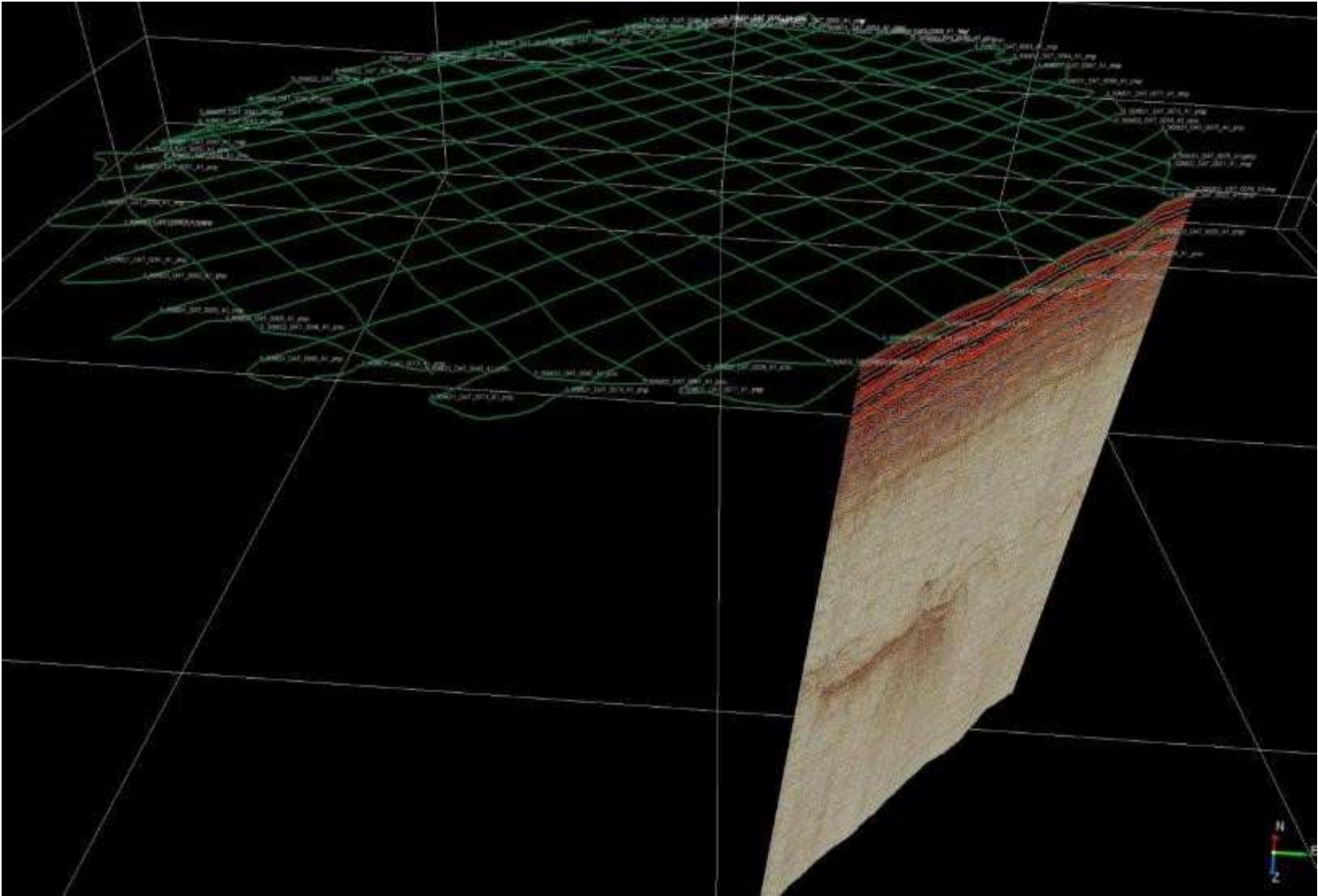


Arealet og dybden af det forladte affald

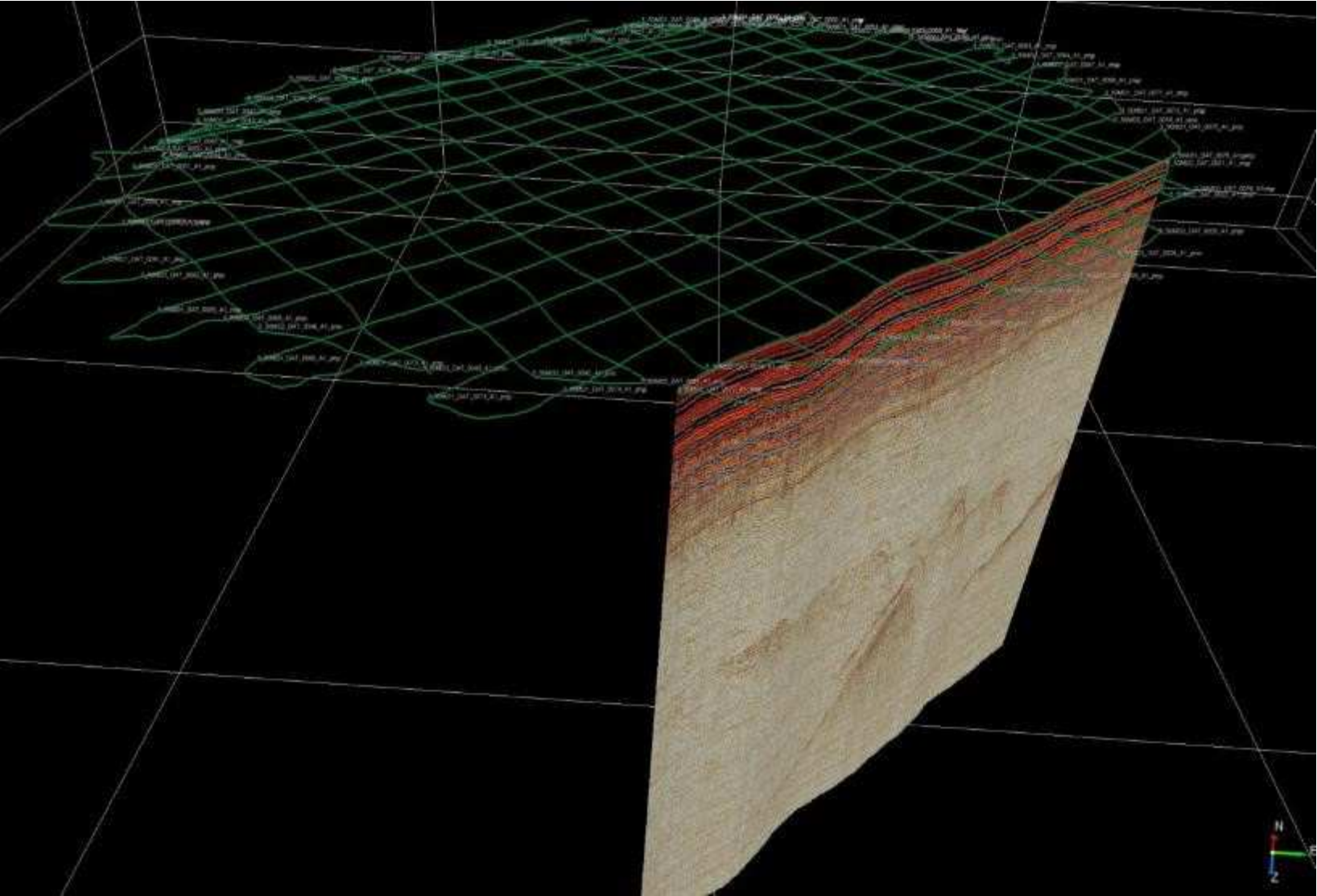
Over 80 km radardata
indsamlet og analyseret
for at estimere
placeringen og dybden
af efterladenskaberne.



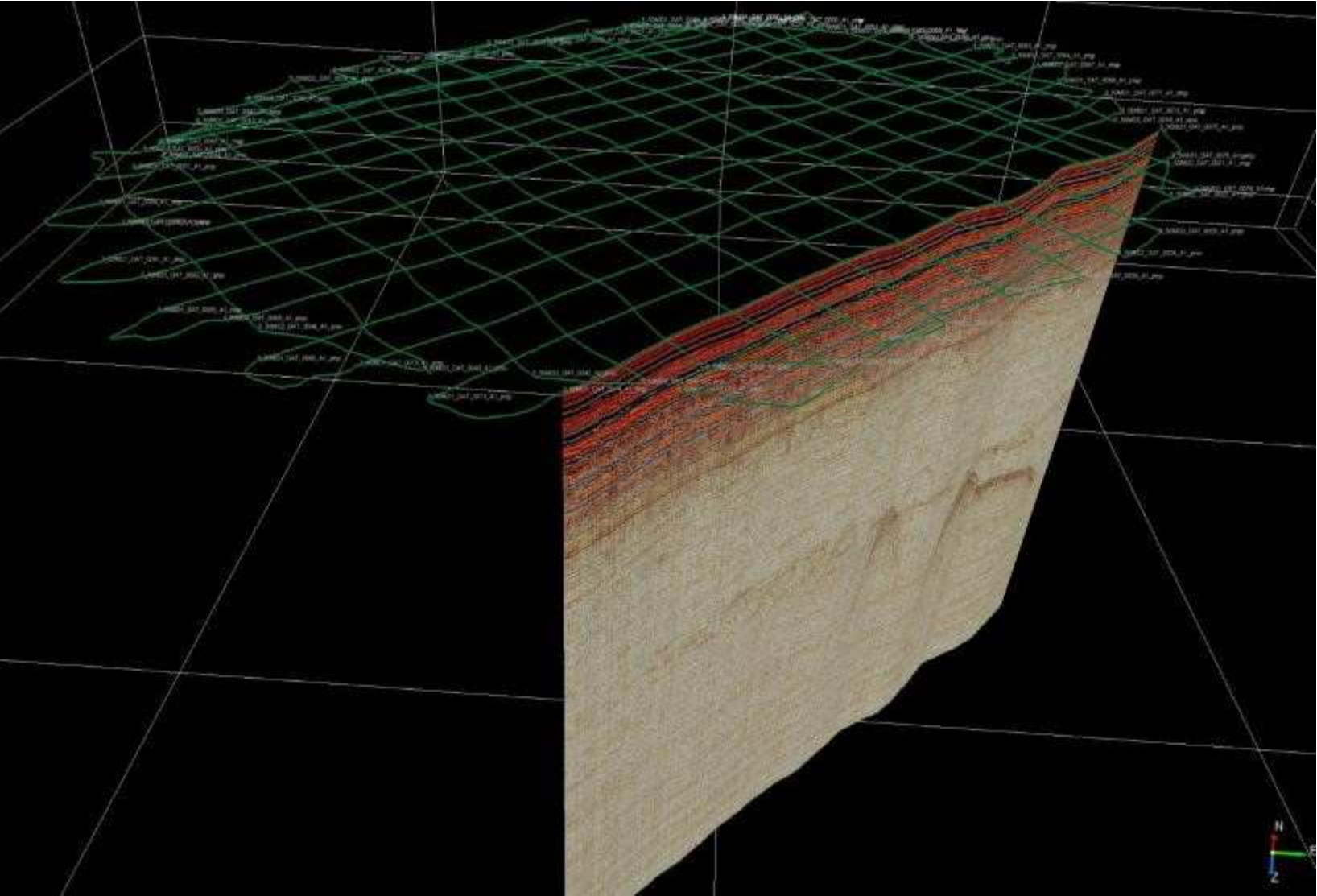
ICE-PENETRATING RADAR



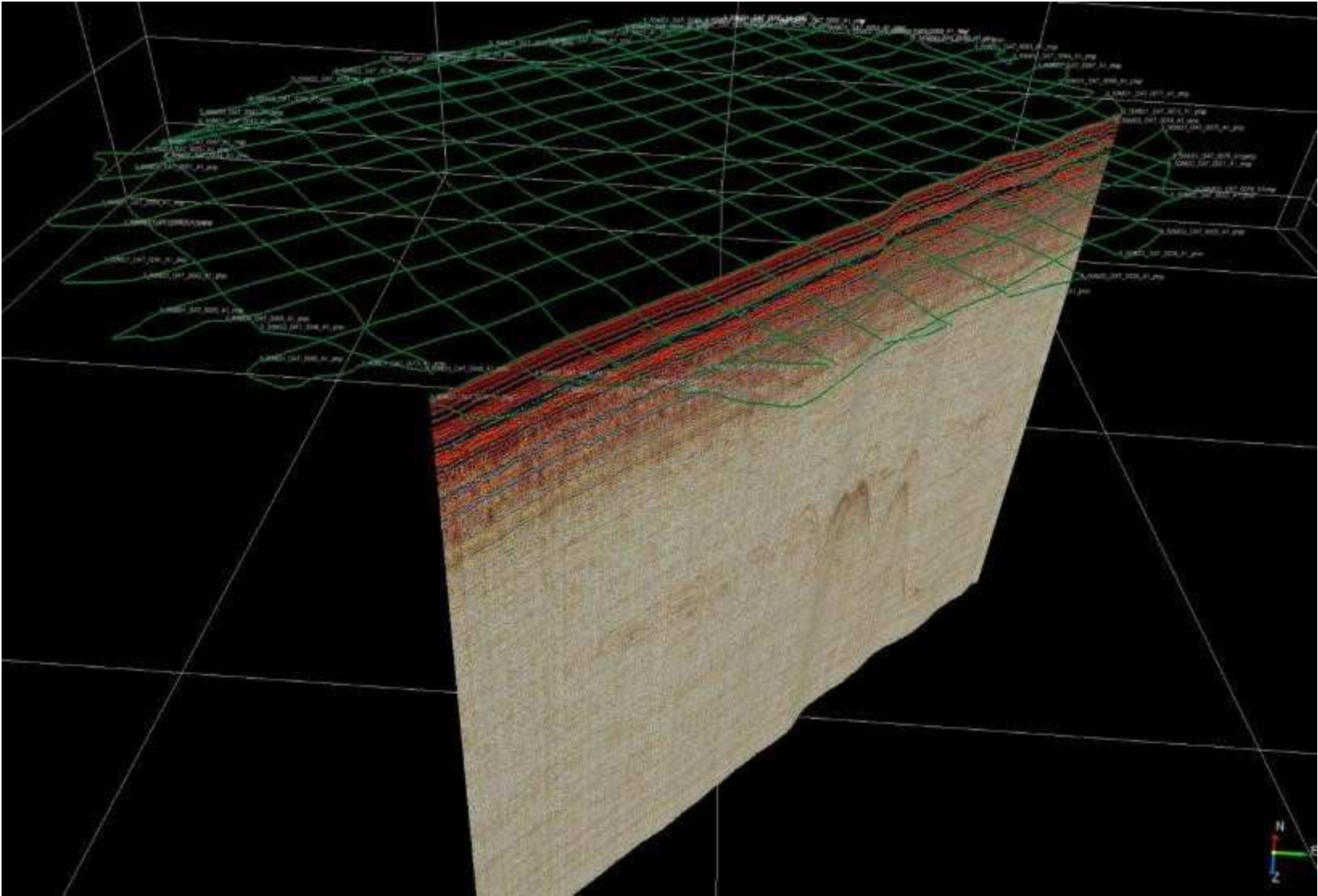
ICE-PENETRATING RADAR



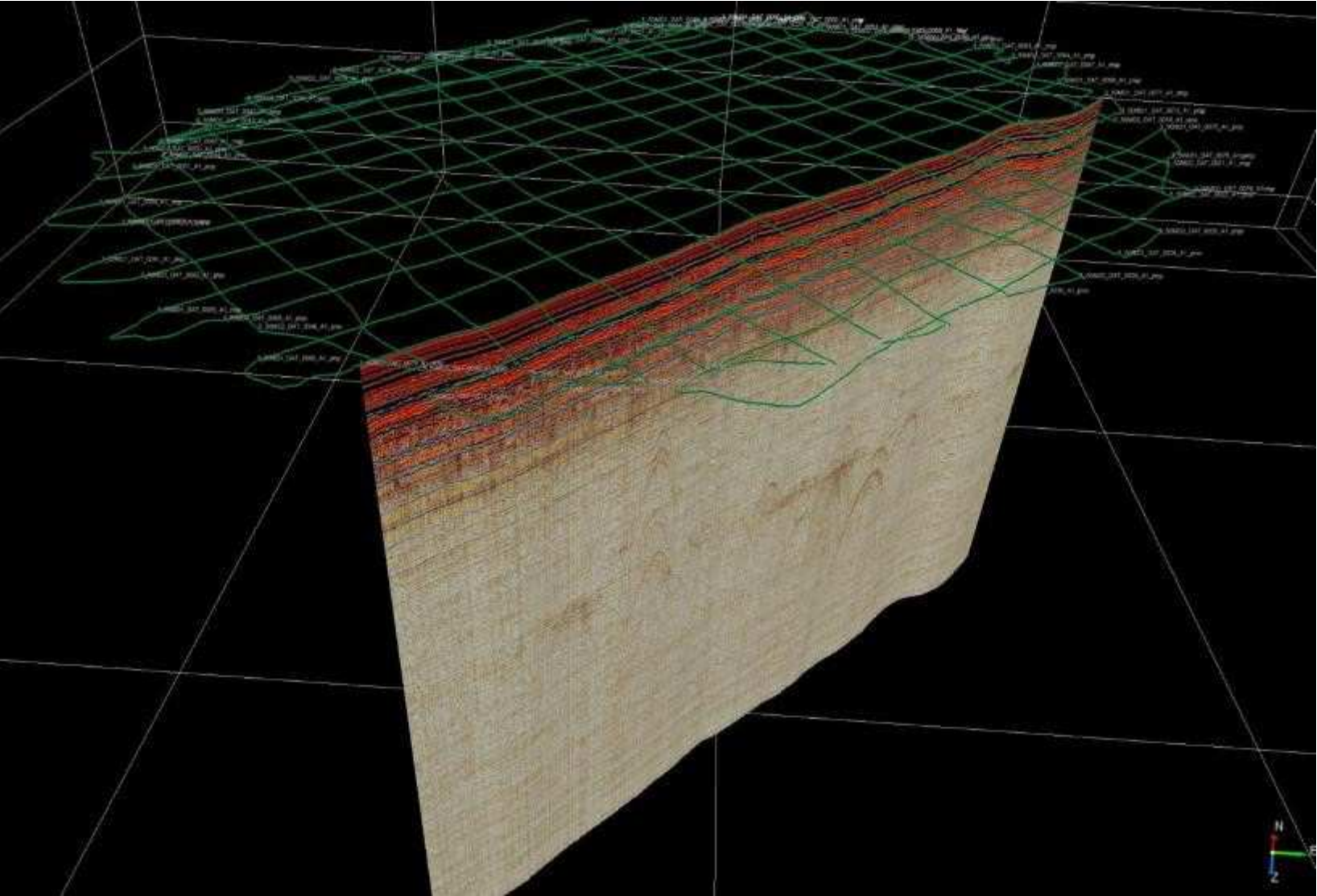
ICE-PENETRATING RADAR



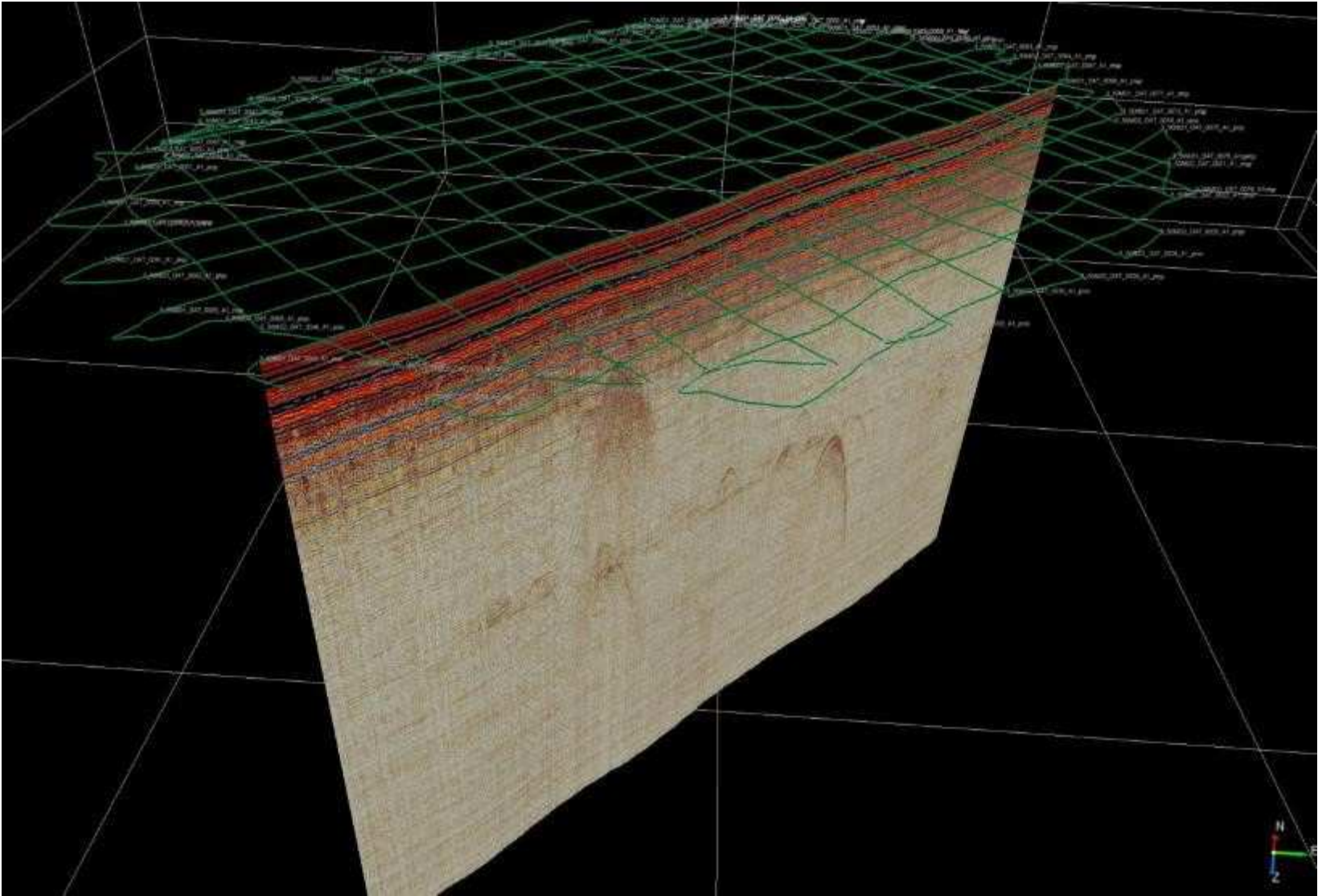
ICE-PENETRATING RADAR



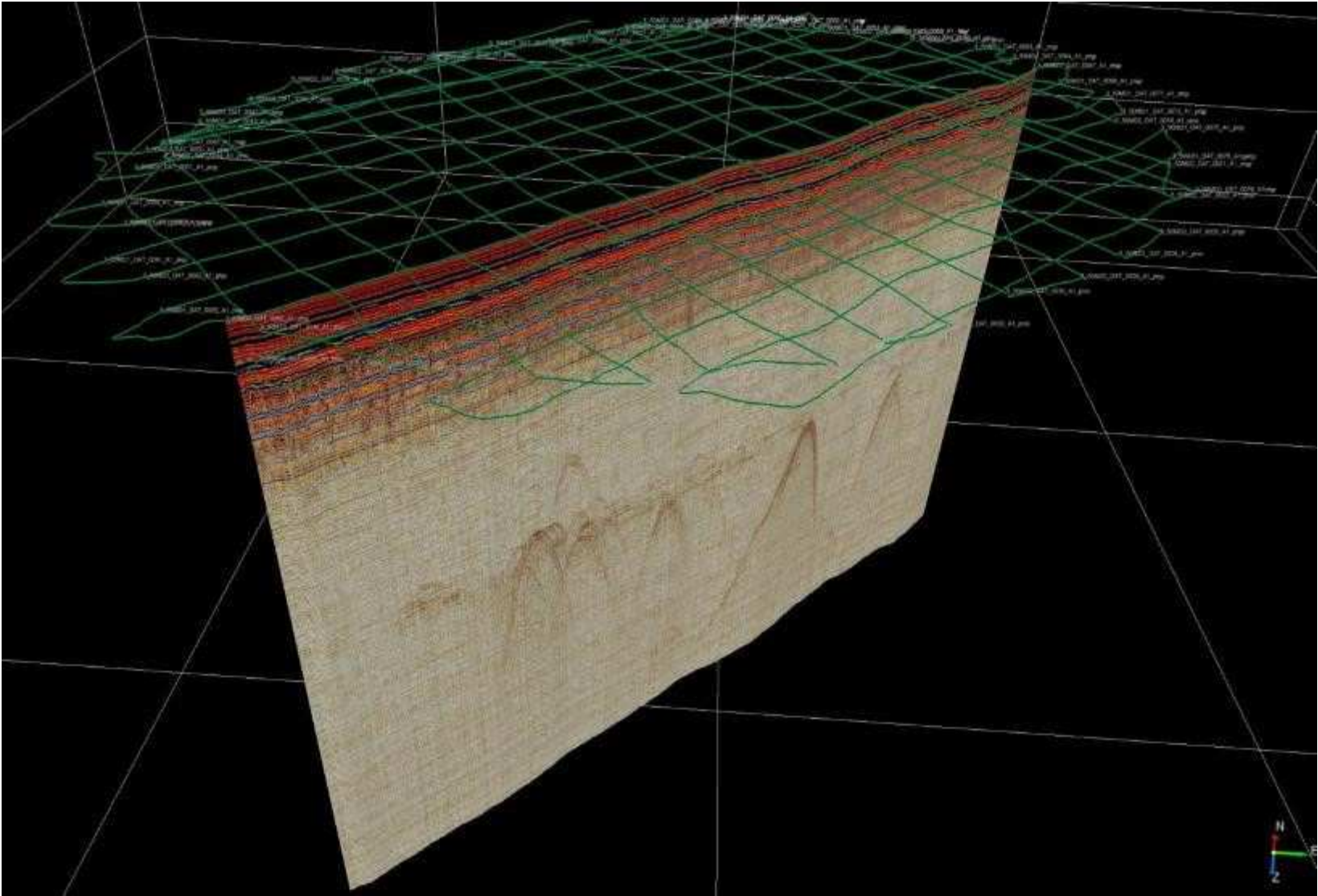
ICE-PENETRATING RADAR



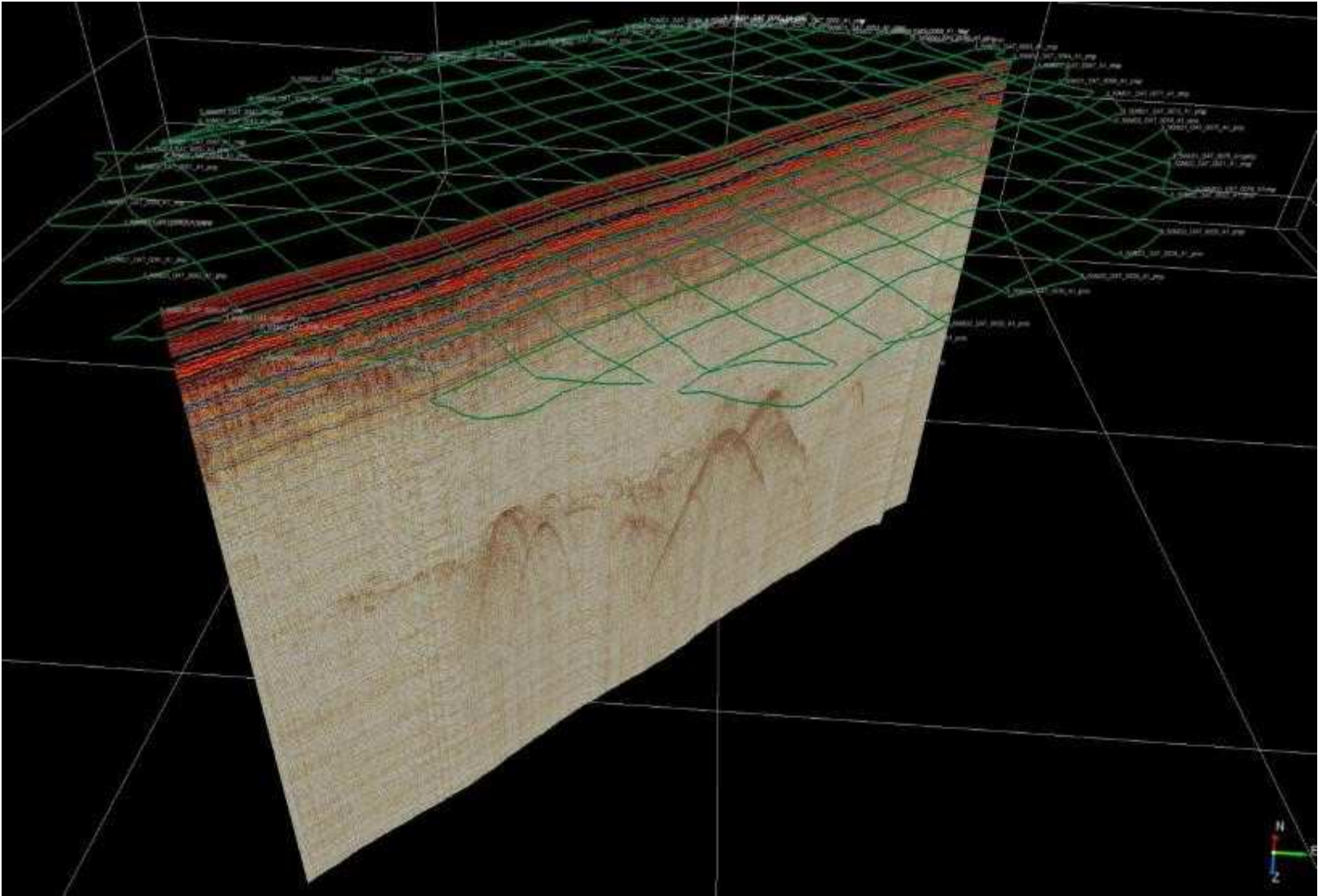
ICE-PENETRATING RADAR



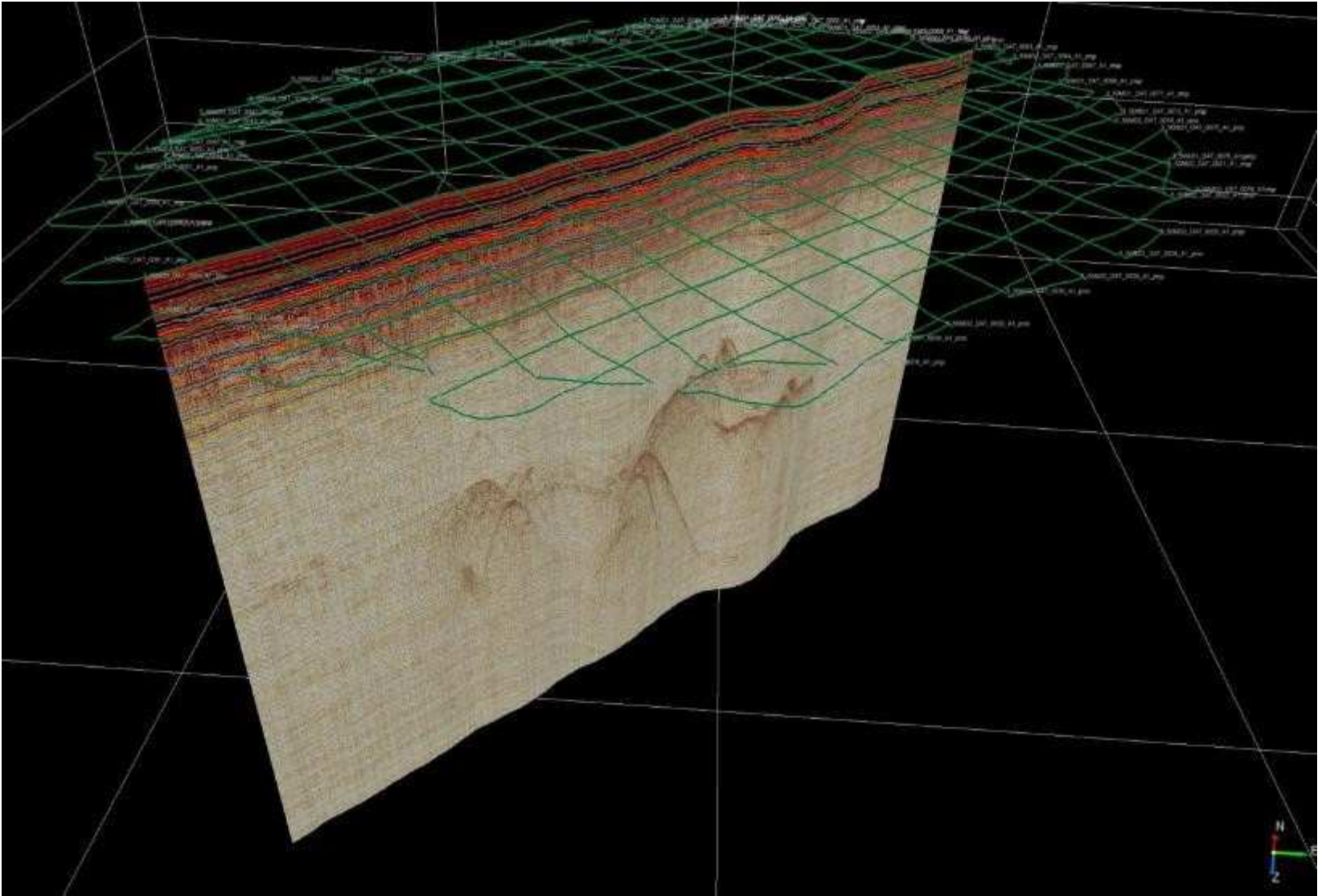
ICE-PENETRATING RADAR



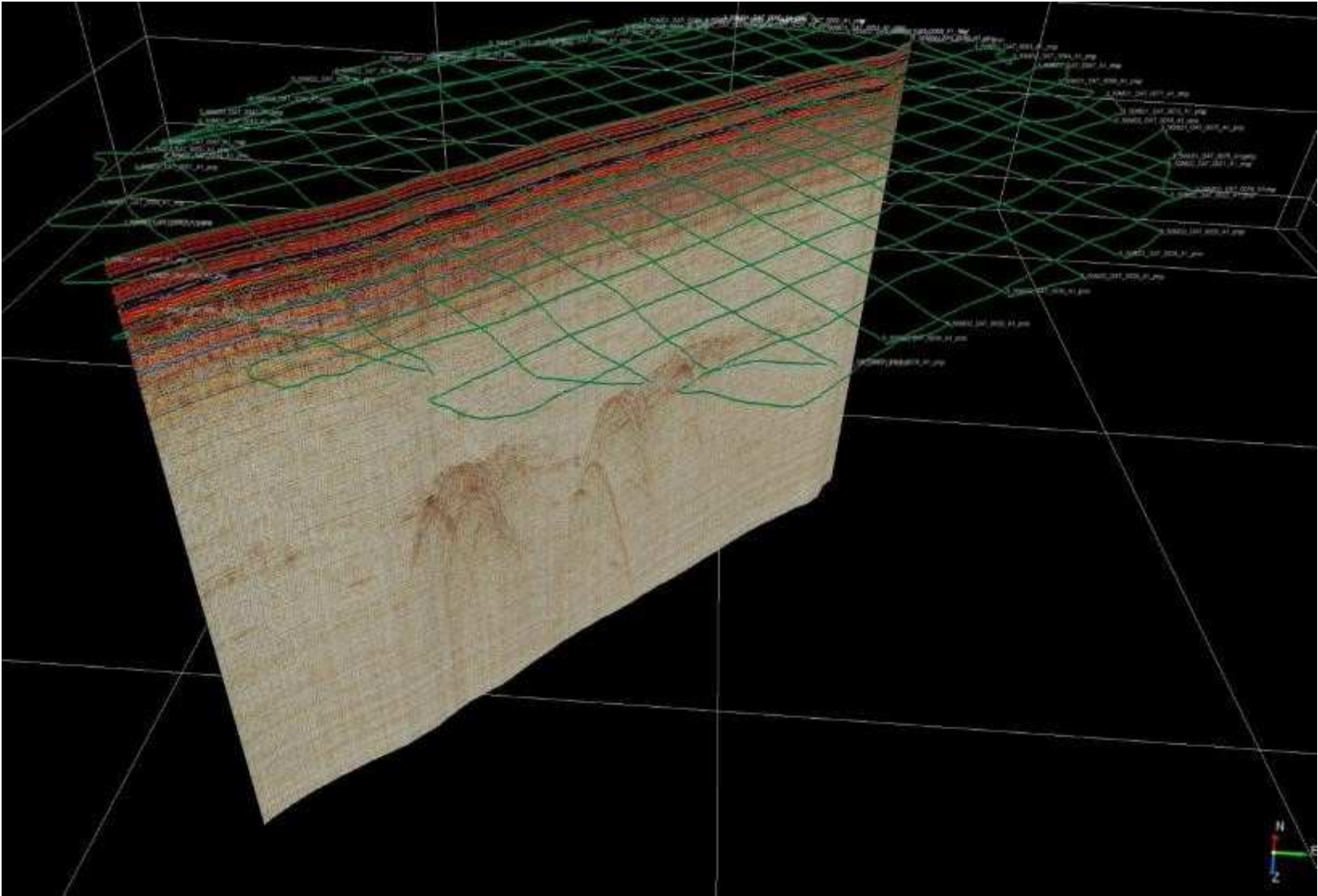
ICE-PENETRATING RADAR



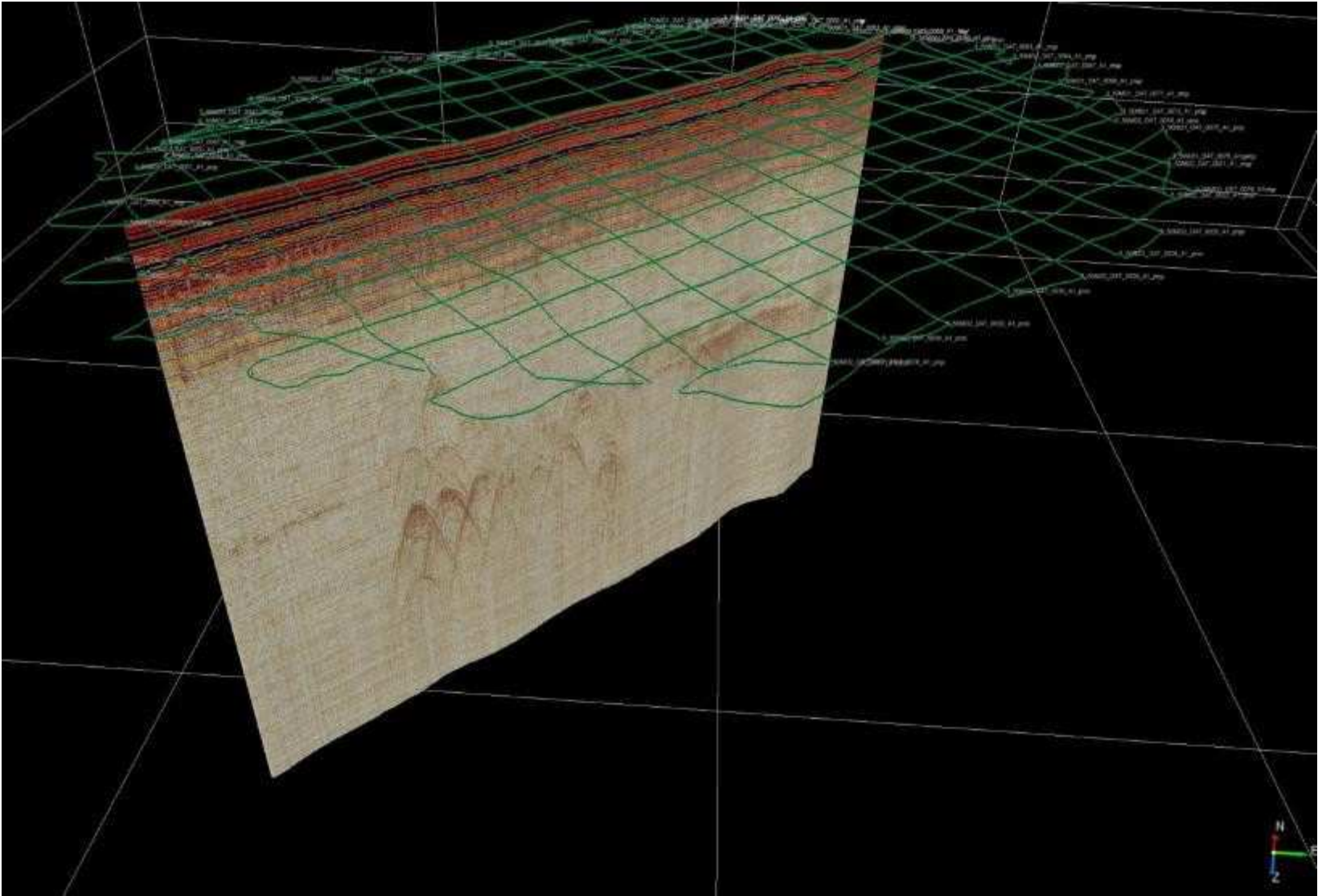
ICE-PENETRATING RADAR



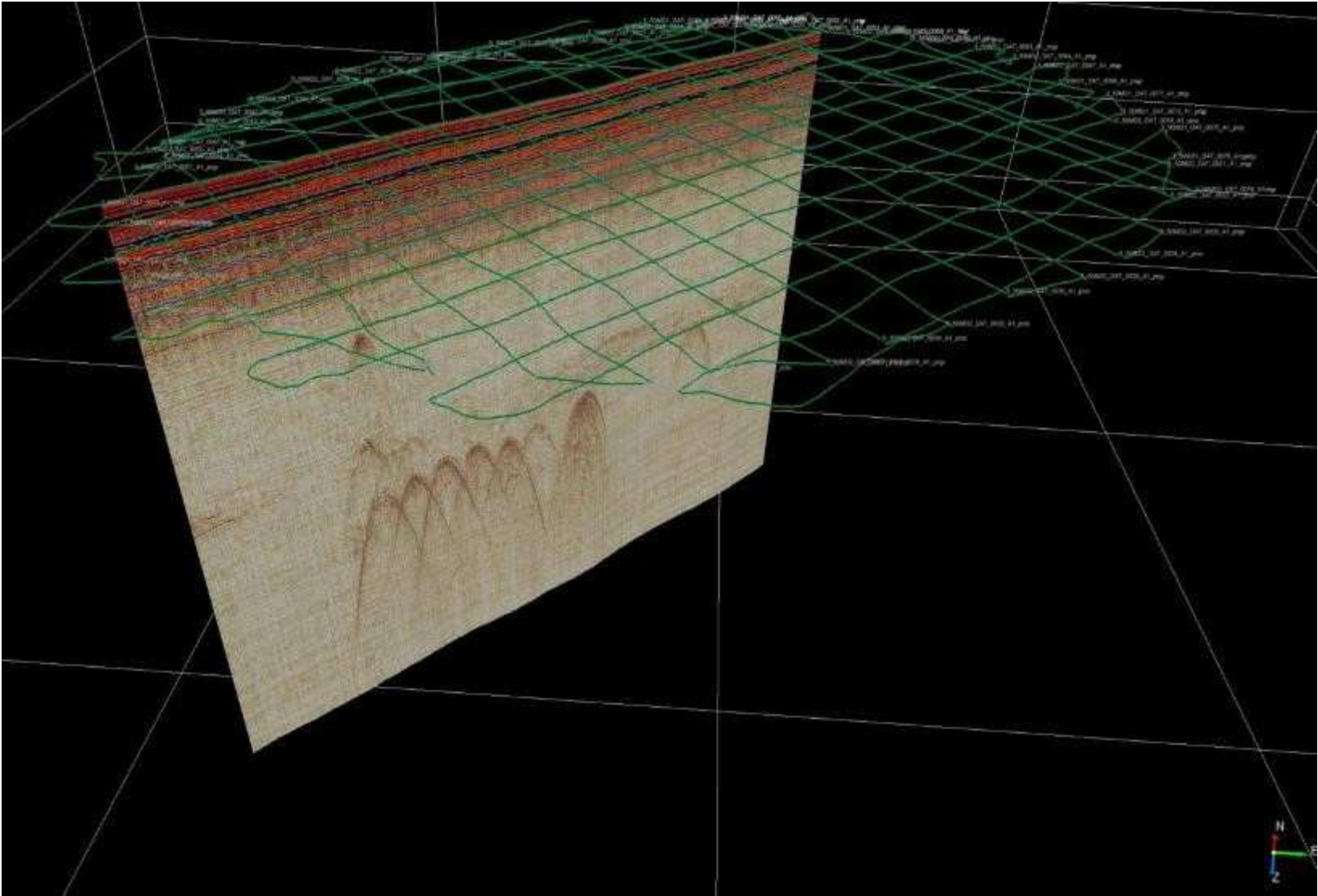
ICE-PENETRATING RADAR



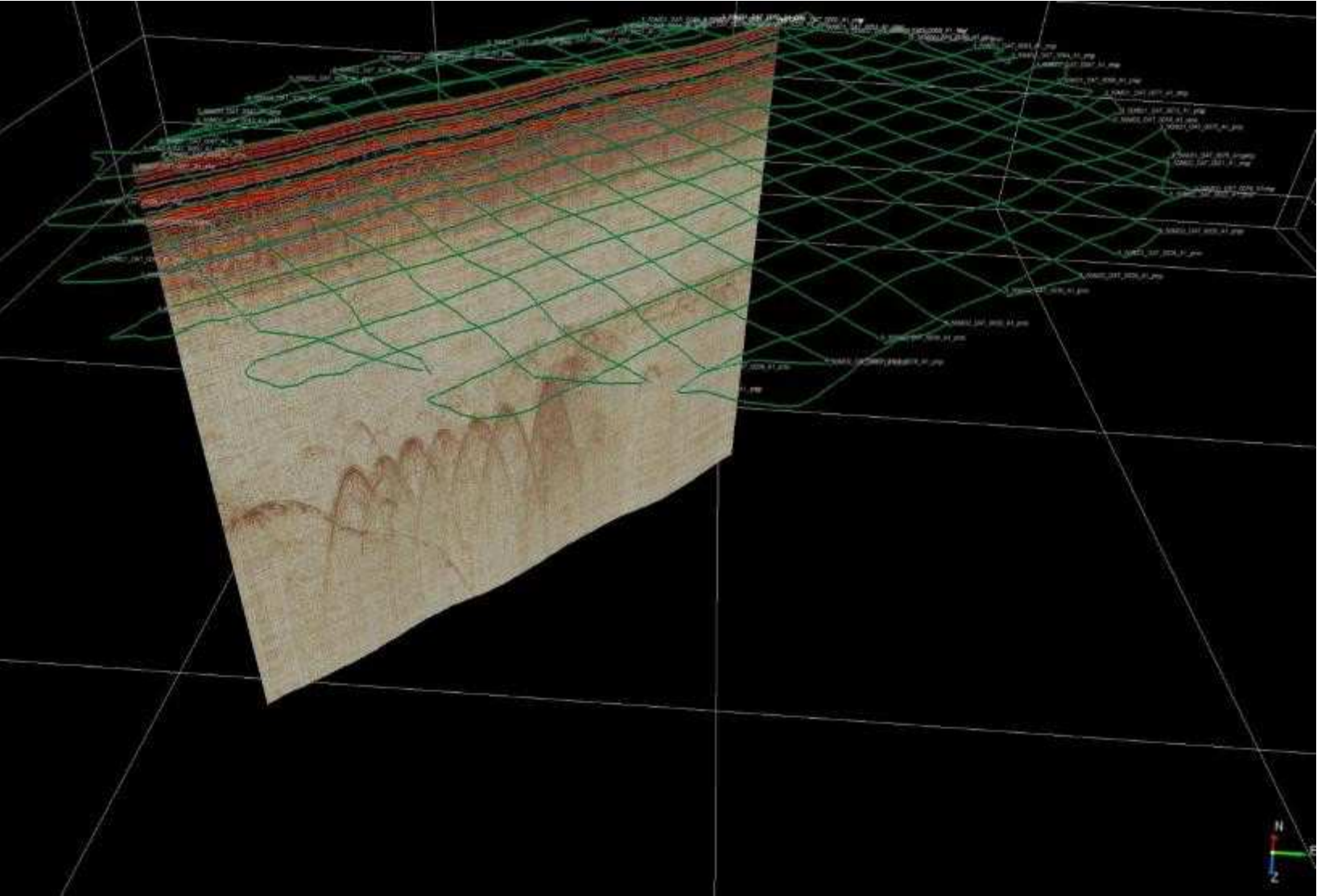
ICE-PENETRATING RADAR



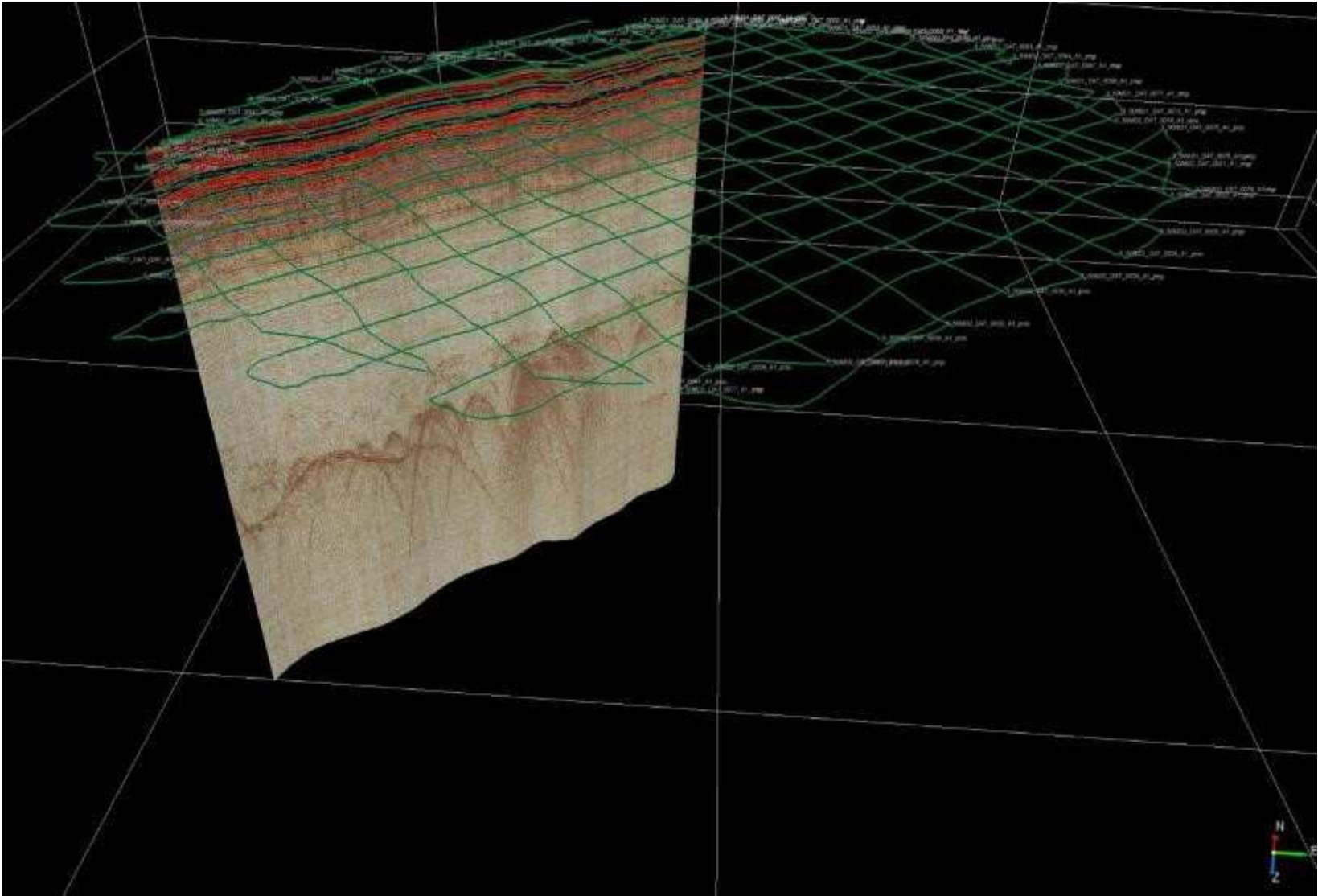
ICE-PENETRATING RADAR



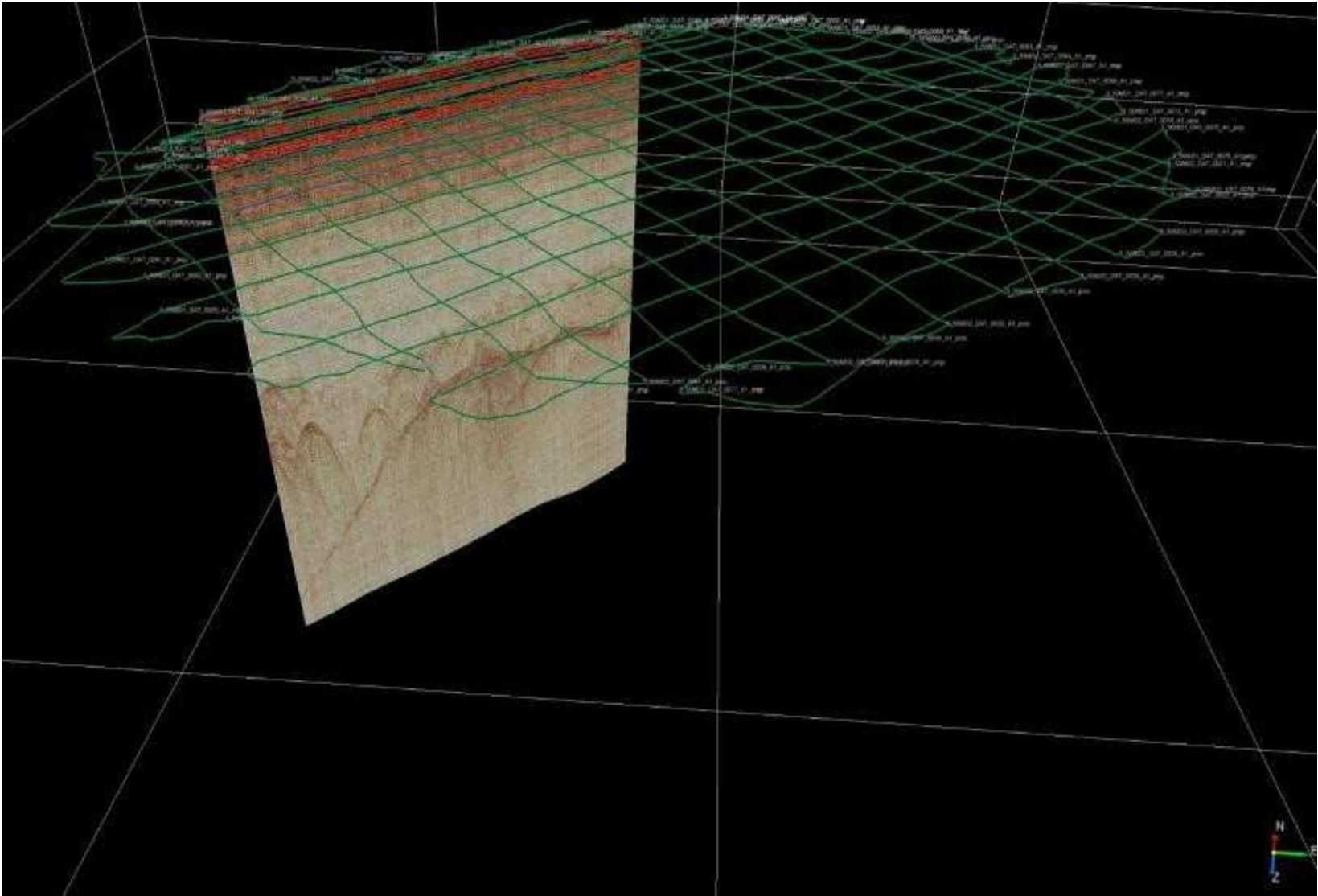
ICE-PENETRATING RADAR



ICE-PENETRATING RADAR

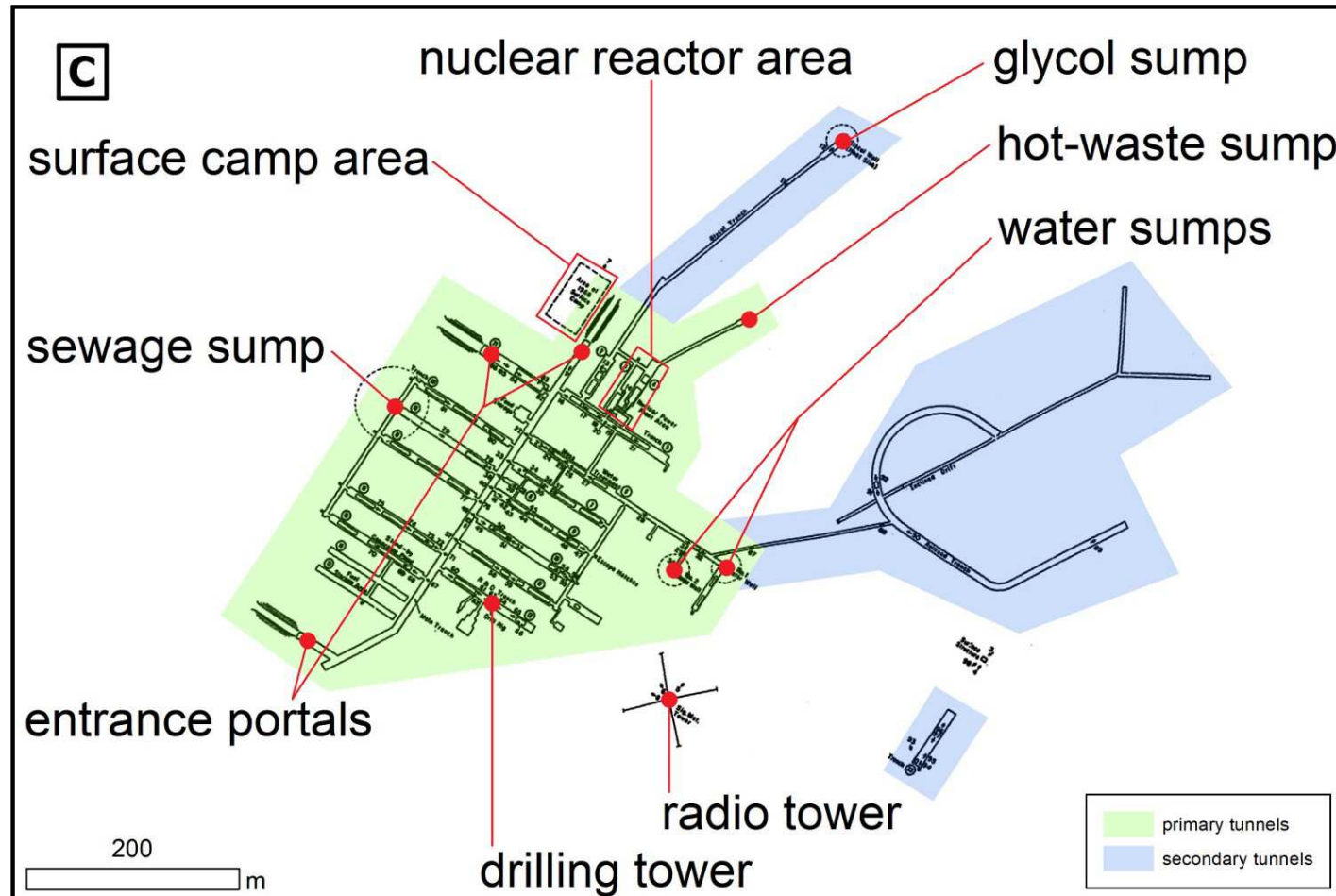


ICE-PENETRATING RADAR



**Analyse 1:
Kortlægning af Camp Century-
området for øget kendskab til
udbredelsen og positionen af
efterladenskaberne.**

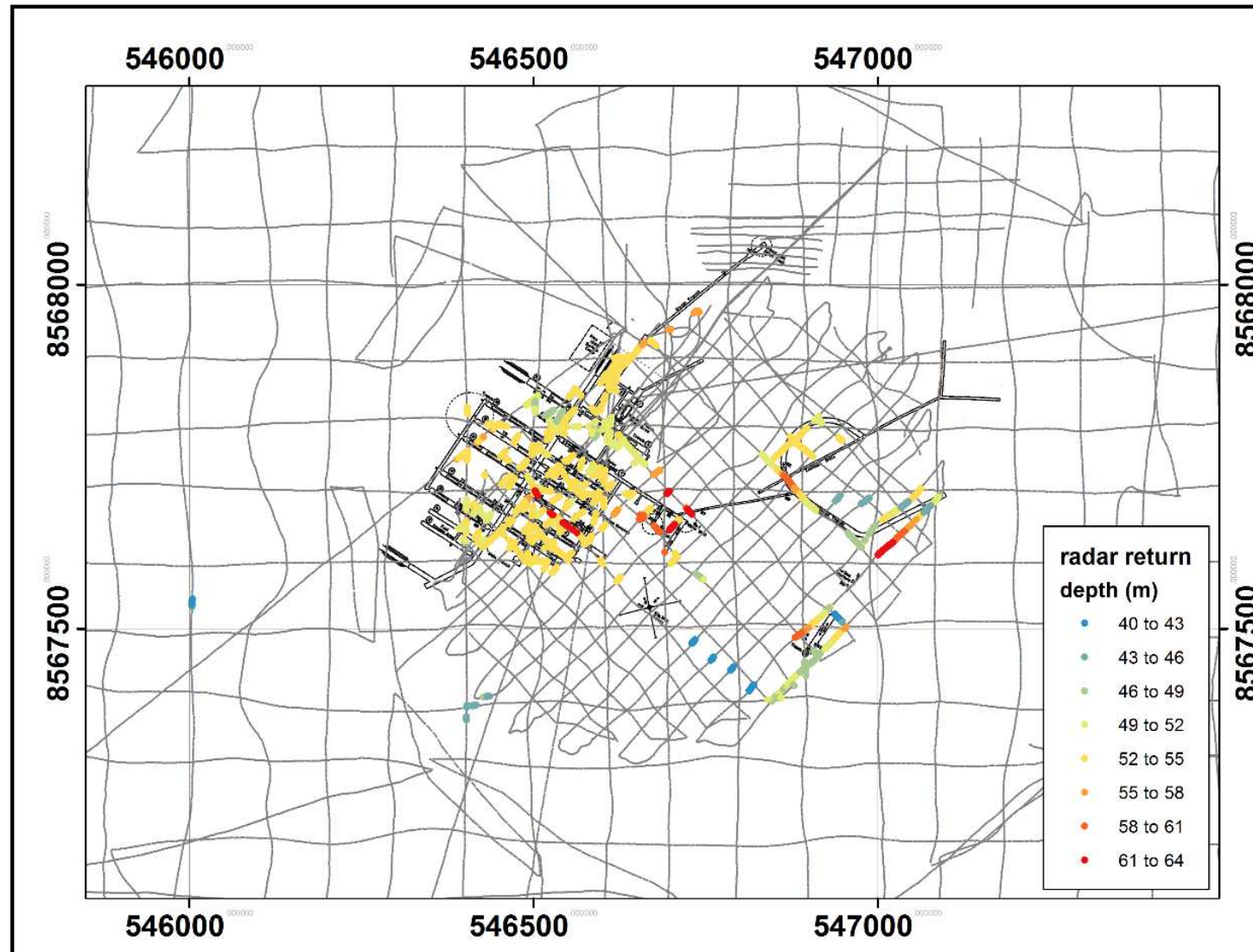
Kort over den begravede station



Kort over lejren “as built”. Her ses tunnellerne der blev brugt til beboelse, samt indgange mm.

Det historiske kort kan sammenholdes med radarmålingerne.

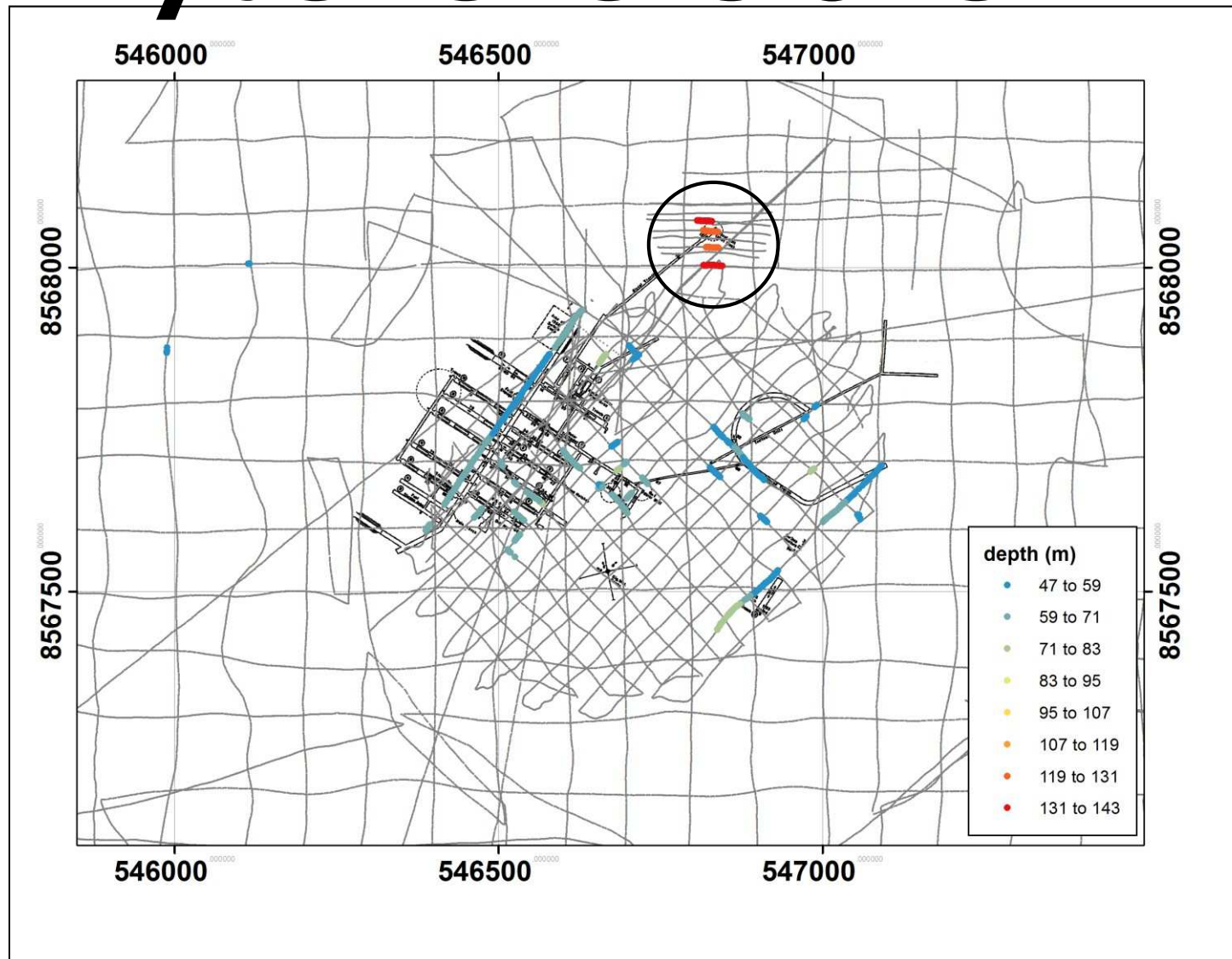
Kort over den begravede station



Der er god overensstemmelse mellem det historiske kort og resultaterne fra radaranalysen.

Vi kan identificere både primære og sekundære tunneller.

Dybe refleksjoner



Tidligere væskedepoter kunne identificeres. For glykoldepotets vedkommende ved hjælp af en stærk refleksion i ca. 135 m dybde.

Konklusion radarundersøgelser

Ud fra radardataanalysen er dybden og udbredelsen af lejren blevet fastlagt.

- Der er god overensstemmelse mellem historiske kort og resultaterne fra radaranalysen.
- På nuværende tidspunkt ligger størstedelen af efterladenskaberne i dybder mellem 30 og 65 meter.
- Tidligere væskedepoter kunne identificeres ud fra sammensynkning af overliggende lag eller for glykoldepotets vedkommende vha. en stærk refleksion i ca. 135 m dybde.
- Det vurderes, at ingen ukendte strukturer større end 10 m er tilstede.

[*Ice-penetrating radar survey of the subsurface debris field at Camp Century, Greenland*](#), Karlsson et al., Cold Regions Science and Technology, June 2019.

[*Camp Century radarundersøgelser*](#), Karlsson et al., GEUS report 2019/18.

Analyse 2:

Model for nedsivning af smeltevand

Metode

Studiet gør brug af en matematisk model til at kortlægge udviklingen af strukturen af snen/isen (firnen*).

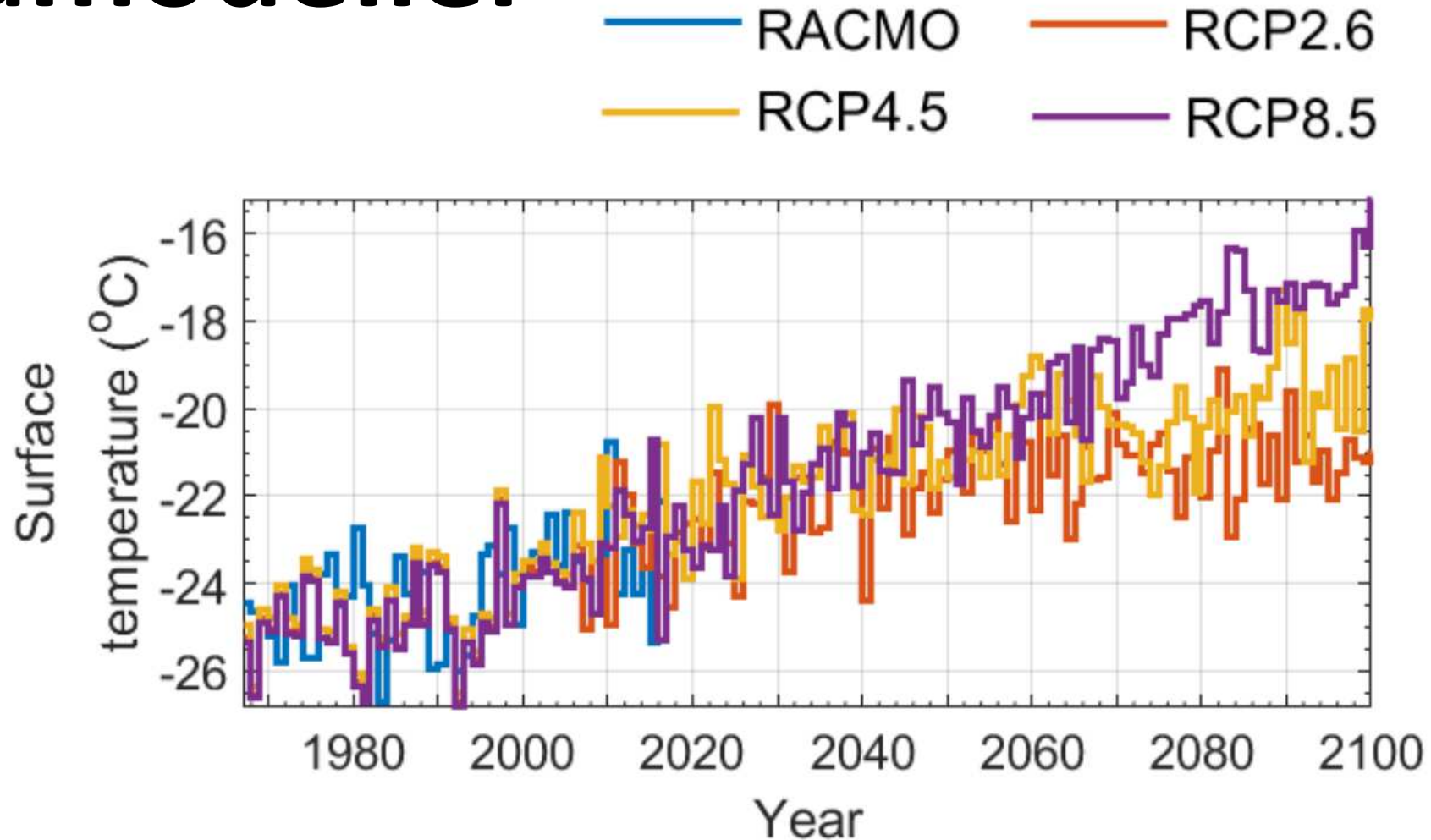
Denne model beskriver temperaturen og tætheden af firnen. Disse to parametre bestemmer, hvor dybt smeltevand fra overfladen kan trænge ned.

Modellen gør brug af data fra klimamodeller (canESM2 og RACMO) samt de indsamlede data fra Camp Century.

For perioden 2020-2100 anvendes fremskrivninger, som svarer til tre forskellige fremtidige klimascenarier. Disse tre scenarier er navngivet i IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change, Assessment Report 5) som hhv. RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. Navnene afspejler mængden af CO₂, der bliver udledt i atmosfæren, hvor RCP8.5 er det scenarie med størst CO₂-udledning.

* Firn er gammel sne, der endnu ikke er blevet omdannet til is.

Klimamodeller

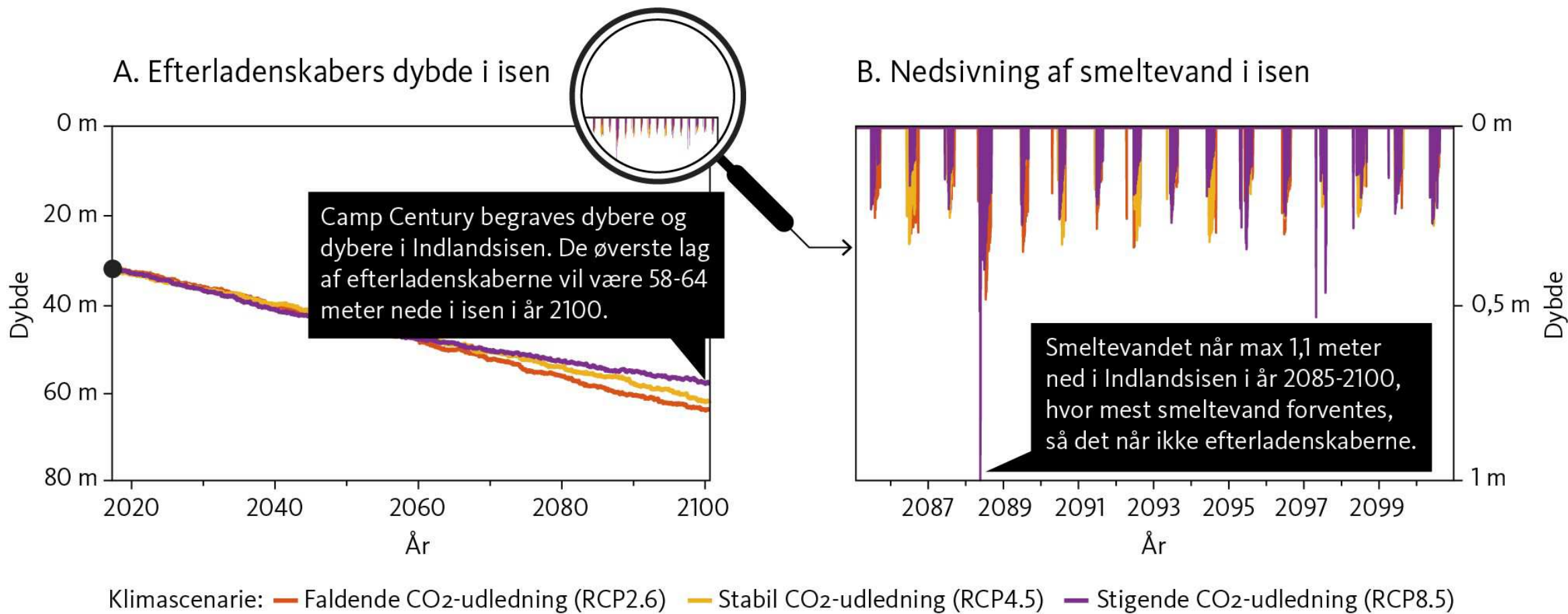


Overfladetemperaturens udvikling ved Camp Century frem til 2100 for hhv. scenarie RCP2.6 (rød), RCP4.5 (gul) og RCP8.5 (lilla). Den blå linje er resultater fra RACMO regional klimamodel(1966-2020).

Klimamodellerne viser

- Klimamodellerne viser, at der i fremtiden vil være højere luftfugtighed og højere temperaturer ved Camp Century.
- Luftens årlige gennemsnitstemperatur stiger adskillige grader med den største stigning for scenariet RCP8.5 på over 6°C i år 2100 i forhold til i dag.
- Alle klimascenarier forudsiger smeltning af snemassen svarende til dannelse af over 20 mm vand hvert år. Derudover forudsiges store udsving fra år til år, hvor enkelte år i RCP8.5 scenariet har smeltning på over 100 mm vand.
- På trods af stigende mængder overfladesmeltning ved Camp Century forudsiges der fortsat større snemængder end afsmeltning i alle fremtidige scenarier til 2100.
- Dette er i modsætning til resultaterne fra det tidligere studie af Colgan m.fl. (2016). Forskellen mellem nærværende studie og studiet fra 2016 er, at det ældre studie brugte resultater fra en klimamodel, hvor lufttemperaturerne var mellem 3.7°C og 5.1°C for høje, hvorved smeltesæsonen både bliver for varm og for langvarig. I nærværende studie er disse fejlagtigt høje temperaturer blevet korrigeret ved hjælp af målinger fra klimastationen opsat ved Camp Century.

Model for nedsivning af smeltevand



Konklusion nedsivning af smeltevand

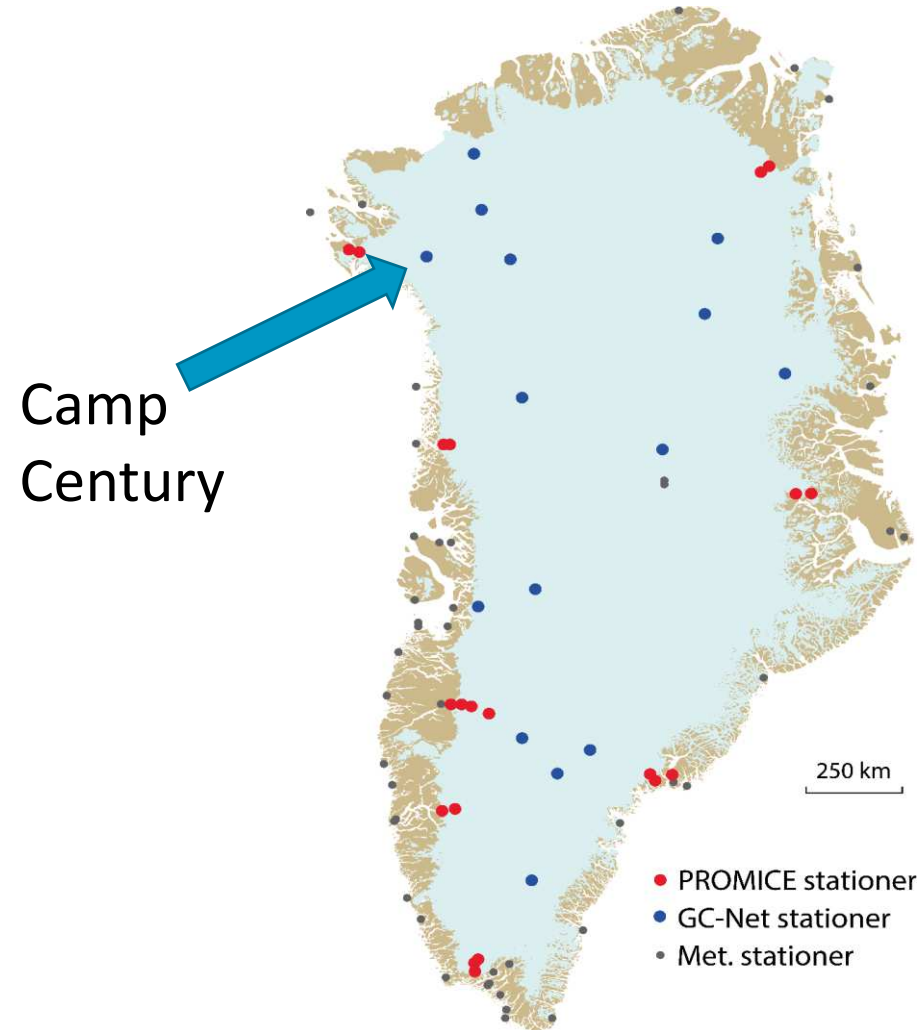
- Ud fra observationer ved Camp Century og tilgængelige klimascenarier, som løber frem til år 2100, vurderes det, at der ikke vil forekomme smeltning i overfladen i sådan en grad, at basens efterladenskaber vil smelte ud af indlandsisen.
- Endvidere vil smeltevand fra overfladen ved udgangen af dette århundrede højst trænge 1 m ned i overfladen og dermed er opblanding med vand fra basen meget usandsynlig, idet basen befinder sig i mere end 50 m dybde.

Firn Evolution at Camp Century, Greenland: 1966–2100, Vandecrux et al., *Frontiers in Earth science*, Marts 2021.

Camp Century modellering af sne, Karlsson et al., GEUS report 2021/6.

Fortsatte klimaobservationer ved Camp Century

- Klimaobservationerne ved Camp Century planlægges at fortsætte som led i GEUS' overvågning af Grønlands indlandsis.



Materiale

Alle data er offentligt tilgængelige på hjemmesiden www.campcenturyclimate.dk, hvor der også er to film om arbejdet.

Analyserne er offentliggjort i fagfællebedømte videnskabelige tidsskrifter og som kortere rapporter på dansk.



frontiers
in Earth Science

ORIGINAL RESEARCH
published: 23 March 2021
doi: 10.3389/feart.2021.678176

Firm Evolution at Camp Century, Greenland: 1966–2100

Baptiste Vandecrux¹, William Colgan², Anne M. Solgaard³, Jørgen Peder Steffensen² and Nanna B. Karlsson¹

¹Department of Geology and Climate, Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark, ²Physics of Ice, Climate and Earth, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark

Camp Century is an American military base built in 1959 under the surface of the Greenland ice sheet and decommissioned in 1967. Here, we use outputs from RACMO2.3p2 and CanESM2 climate models, adjusted to meteorological observations, and a firm model to simulate the firm density and temperature at Camp Century between 1966 and 2100. The model output is evaluated against an extensive set of firm observations and three Representative Concentration Pathways (RCP2.6, 4.5 and 8.5) are considered as future scenarios. Our model suggests that the upper horizon of the Camp Century debris field – observed at a depth of 52 m in 2017 – will continue to be buried by persistent net accumulation over the next eighty years under all RCP scenarios. This horizon depth will be between 58 and 64 m in 2100, depending on the RCP scenario. We estimate a maximum meltwater percolation depth of 1.1 m under all RCP scenarios. We therefore find it extremely unlikely that surface meltwater interacts with the subsurface debris field at Camp Century before 2100 under all RCP scenarios. Camp Century's future is representative of the firm area in northwestern Greenland, bound to shift from dry snow to a percolation regime. Our model suggests that 10 m firm temperatures at Camp Century will increase from -24.0°C in 1966 to -21.5 , -20.0 and -18.0°C in 2100 under the RCP2.6, 4.5 and 8.5 scenarios, respectively. We reveal a previously unknown warm bias in air temperatures simulated at Camp Century by both RACMO2.3p2 and CanESM2 climate models which needs to be accounted for when using these models to predict melt, firm evolution and sea-level contribution of the Greenland ice sheet. We also present novel in situ measurements of firm compaction rates, which indicate that about 25% of firm compaction of the top 62 m of firm occurs below 20 m depth. This highlights the importance of deep-firm compaction measurements for model evaluation and correction of albedo products.

Keywords: greenland ice sheet, firm, surface mass balance, accumulation, camp century, future climate

OPEN ACCESS

Edited by: Alan Hubbard, Arctic University of Norway, Norway

Reviewed by: Michael John MacPherson, University of Colorado Boulder, United States; Aziz Arzoo-Beyensman, Rutgers University, Newark, United States

***Correspondence:** Baptiste Vandecrux, bv@ipm.uibk.ac.at

Specialty section: This article was submitted to Cryosphere Science, a section of the journal Frontiers in Earth Science

Received: 07 July 2020
Accepted: 23 January 2021
Published: 23 March 2021

Citation: Vandecrux B, Colgan W, Solgaard AM, Steffensen JP and Karlsson NB (2021) Firm Evolution at Camp Century, Greenland: 1966–2100. *Front. Earth Sci.* 9:678176. doi: 10.3389/feart.2021.678176

Frontiers in Earth Science | www.frontiersin.org | 1 | March 2021 | Volume 9 | Article 678176

DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE RAPPORT 2021/6

Camp Century modellering af sne

Nanna B. Karlsson, Baptiste Vandecrux, William T. Colgan & Signe B. Andersen

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

CAMP CENTURY CLIMATE

77.13°N 61.03°W NORTH WEST GREENLAND

Reports

- *Camp Century modellering af sne*, by Nanna B. Karlsson, Baptiste Vandecrux, William T. Colgan and Signe B. Andersen, GEUS report 2021/6.
- *Firm evolution at Camp Century, Greenland: 1966–2100*, by Baptiste Vandecrux, William Colgan, Anne Solgaard, Jørgen Peder Steffensen and Nanna B. Karlsson in *Frontiers Earth Science – Cryospheric Sciences*, February 2021.
- *Camp Century radarundersøgelse*, by Nanna B. Karlsson, William T. Colgan and Signe Bech Andersen, GEUS report 2019/18.
- *Ice-penetrating radar survey of the subsurface debris field at Camp Century, Greenland*, by Nanna B. Karlsson, William T. Colgan, Daniel Binder, Horst Machguth, Jakob Abermann, Karina Hansen and Allan Pedersen in *Cold Regions Science and Technology*, June 2019.
- *Initial field activities of the Camp Century Climate Monitoring Programme in Greenland*, by William Colgan, Allan Pedersen, Daniel Binder, Horst Machguth, Jakob Abermann and Mike Jayred in *Review of Survey Activities 2017*.