

# Camp Century modellering af sne

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

# Camp Century modellering af sne

Teknisk notat

Nanna B. Karlsson, seniorforsker

Baptiste Vandecrux, post-doc

William T. Colgan, seniorforsker

Signe B. Andersen, statsgeolog

## Forord

Dette notat indeholder en kort beskrivelse af det videnskabelige studie af den tidligere, nuværende og fremtidige struktur af sneen omkring Camp Century. Arbejdet er udført i forbindelse med "Camp Century undersøgelses- og overvågningsprogrammet". Notatet tjener som en oversigt over og supplement til den engelsprogede videnskabelige artikel "*Firn evolution at Camp Century, Greenland: 1966-2100*" af B. Vandecrux udgivet i tidsskriftet "Frontiers Earth Science – Cryospheric Sciences" februar 2021 (Vandecrux m.fl., 2021).

# Introduktion

I 2016 udkom en videnskabelig artikel (Colgan m.fl. 2016), der peger på, at klimaforandringer i Grønland inden for dette århundrede muligvis kan begynde at smelte isen over 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 snefald 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. Disse efterladenskaber blev kortlagt i et tidligere studie (se Karlsson m.fl. 2019, samt teknisk notat GEUS 2019/18).

Klimaforandringer bevirker, at der nu forekommer afsmeltning ved Camp Century. Modelberegninger fra artiklen af Colgan og medforfattere anså det for sandsynligt at der ville smelte mere is over Camp Century end der dannes ny sne fra nedbør inden år 2100, hvis opvarmningen af klimaet fortsætter som hidtil.

Til vurdering af de klimamæssige aspekter af Camp Century-problematikken blev følgende undersøgelses- og overvågningsprogram påbegyndt i 2017:

- Kortlægning af Camp Century-området for at få øget kendskab til udbredelsen og positionen af efterladenskaberne.
- Overvågning af afsmeltning og snefald i Camp Century-området.
- 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 modelleringsstudiet. Studiet gør brug af matematiske modeller kombineret med målinger fra undersøgelses- og overvågningsprogrammet til at kortlægge udviklingen af strukturen af firnen<sup>1</sup>. Målingerne blev påbegyndt i 2017 mens modelleringsstudiet blev færdiggjort 2020. I løbet af denne periode indsamlede en automatisk vejstation placeret i Camp Century-området oplysninger om vejrforholdene. Disse oplysninger er vigtige da de gjorde det muligt at forbedre modellen. Ud fra dette nye modelleringsstudie vurderes det, efterladenskaber ikke vil smelte ud af indlandsisen, og at smeltevandet heller ikke vil nå ned til dem inden for de tilgængelige klimascenarier, som løber frem til år 2100.

Da det foreliggende arbejde støtter sig op af tidligere udførte studier, indeholder dette notat også en bibliografi, der kan findes i appendix.

---

<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.

## 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 boringer af firn-kerner på hhv. 73 m og 62 m dybde og efterfølgende måling af temperatur med termistorstreng (Figur 1).
- 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 løbende vejrmålinger inklusiv temperatur, vind, solindstrålingsbalance og afsmeltning.

Målingerne fra vejrstationen samt radardata kan tilgås via projektets hjemmeside [www.campcenturyclimate.dk](http://www.campcenturyclimate.dk).



Figur 1: Boring af firnkerner med Eclipse2-systemet (venstre) samt måling af firnens densitet (højre).

# Modellering af firn

Her beskrives kort den teoretiske baggrund for matematiske modeller af firn, samt hvordan disse kan anvendes til at forudsige den fremtidige udvikling af firnen.

Camp Century basen er placeret i et område af Grønland, hvor smeltning af overfladesneen er blevet mere almindelig i løbet af de sidste årtier. Hvis smeltevandet når ned til efterladenskaberne fra den gamle base, er der frygt for, at vandet blander sig med evt. forurenede vand fra basen. Når sne smelter på overfladen, kan der ske flere forskellige ting: vandet siver ned i den dybereliggende firn og genfryser, islag formes på overfladen, eller der kan dannes smeltevandssøer nede i firnen. Udfaldet af smeltning afhænger bl.a. af luftens og sneens temperatur, samt sneens densitet.

For at undersøge hvorvidt der er risiko for en opblanding af smeltevand fra overfladen med vand fra basen, opstilles der en firn-model. Denne model beskriver temperaturen og densiteten af firnen. Disse to parametre bestemmer, hvor dybt smeltevand fra overfladen kan trænge ned i firnen, samt om og hvor smeltevandet genfryser.

## Modellen

For at opstille en matematisk model af firnen er det nødvendigt at have oplysninger om 1) atmosfærens beskaffenhed, dvs. temperatur, luftfugtighed samt nedbørsmængde, 2) sneoverfladens strålingsbalance og densitet samt 3) selve firnens temperatur og densitet. Disse oplysninger fås fra klimamodeller. Den matematiske firn-model beskriver således, hvordan temperatur og densitet ændres i forskellige dybder for fortid, nutid og fremtid, med udgangspunkt i klimamodellernes forudsigelser.

## Oplysninger fra klimamodeller

Modelberegningerne tager udgangspunkt i år 1966. I tidsrummet 1966-2019 bruges resultater fra den regionale klimamodel RACMO (version 2.3p2, beskrevet i Noël m.fl., 2019) samt CanESM2 Jordsystemmodel. Begge modeller er kalibreret med observationer for at matche bedst muligt med de faktiske forhold. For perioden 2020-2100 er det nødvendigt at bruge fremskrivninger dvs. forudsigelser af fremtidens klima. Her bruges resultater fra tre CanESM2 beregninger, som svarer til tre forskellige fremtidige klimascenarier. Disse tre scenarier er navngivet i IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change, Assessment Report 5 udgivet i 2014) som hhv. RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. Navnene afspejler mængden af CO<sub>2</sub>, der bliver udledt i atmosfæren, hvor RCP8.5 er det scenarie med størst CO<sub>2</sub>-udledning.

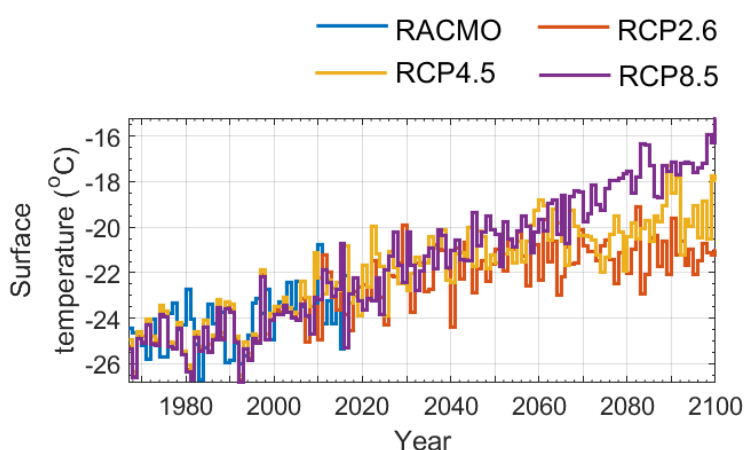
Oplysningerne fra disse fortidige og fremtidige modelberegninger bliver brugt til vores firn-model.

## Firn-model

Modellen, der beskriver ændringerne i firnen i takt med at klimaet ændrer sig, er udviklet på GEUS (se bl.a. Langen et al., 2017, Vandecrux et al., 2018, 2020). Firnmodellen beskriver ændringen i densitet og temperatur i dybden, dvs. beregningerne bliver udført i én dimension svarende til, at man betragter en søjle af firn. Når frisk sne falder på overfladen, vil hele snesøjlen blive skubbet ned af den nye sne. Hvis temperaturen stiger til over smeltepunktet, vil sneen blive omdannet til vand, og dette vand vil sive ned i sneen. Hvor langt vandet fortsætter i dybden afhænger af firn-temperaturen og -densiteten.

## Resultater

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. Dermed kan den gennemsnitlige årstemperatur komme op på -16°C. Til sammenligning er den gennemsnitlige årstemperatur -21°C ved år 2100 for scenariet RCP2.6. Tilsvarende ses en stigning i temperaturen af overfladesneen på mindst 1.4°C (afhængigt af klimascenarie, se Figur 2). Dette skal ses i sammenhæng med, at der allerede er sket en stigning på 3°C fra 1966 til 2019. Temperaturen i den dybere del af firnen (dybere end 20m) forbliver derimod stort set stabil, fordi en stor del af opvarmningen sker i de øverste 10m af firnen. Omdannelsen af denne varme til smeltevand stiger markant fra 1966 til 2010, og 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. Dette skal ses i forhold til, at snemængden er uændret i samme periode for alle klimascenarier.

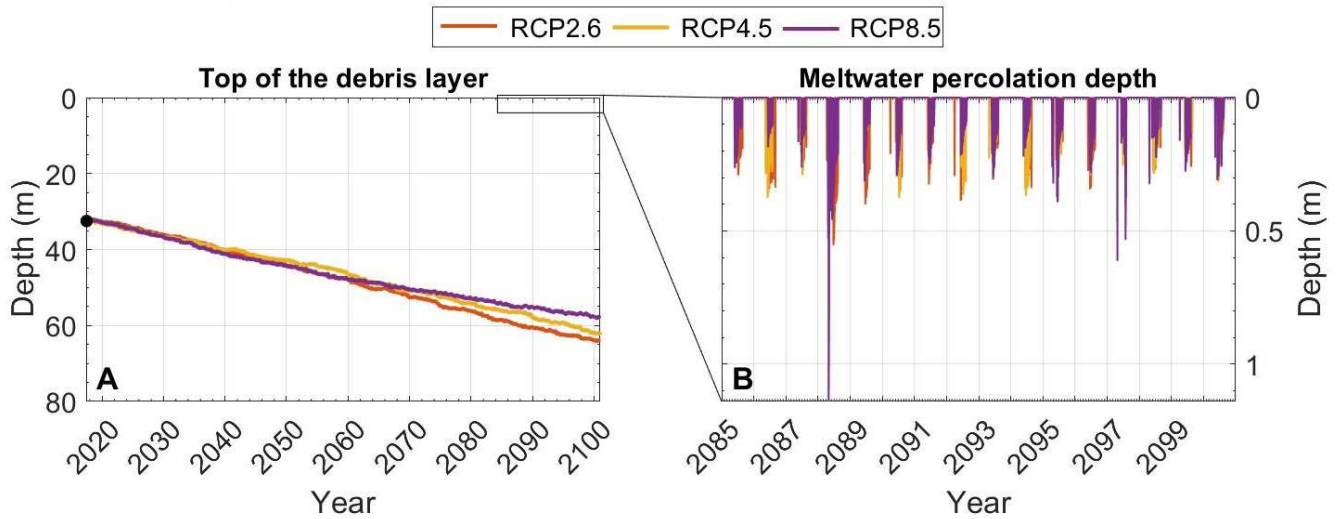


Figur 2: Overfladetemperaturens udvikling ved Camp Century frem til 2100 for hhv. scenarie RCP2.6 (rød), RCP4.5 (gul) og RCP8.5 (lilla). Den blå linje er resultater fra RACMO den regionale klimamodel der bruges til at forbedre fremskrivningerne.

På trods af stigende mængder overfladesmeltning ved Camp Century forudsiges der fortsat større snemængder end afsmeltning i alle fremtidige scenarier. Dette er i modsætning til resultater 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 korigeret ved hjælp af målinger fra vejrstationer opsat ved Camp Century.

Eftersom snemængden fortsat vil overstige afsmeltning, vil de kortlagte efterladenskaber fra basen fortsætte med at bevæge sig dybere ned i den grønlandske Indlandsis (Figur 3A). Der er med andre ord ingen risiko for at efterladenskaberne kommer op til overfladen på grund af smeltning inden 2100.

Når mængden af smeltevand stiger, bliver det muligt for vandet at bevæge sig længere ned i firnen. Figur 3B viser, hvor dybt smeltevandet trænger ned afhængigt af de forskellige klimascenarier for årene 2085-2100. Det er i dette tidsrum, man forventer den største mængde smeltevand. I alle modellerne er den dybeste smeltevandsnedsivning 1.1 m, men i langt de fleste tilfælde er nedsivningen mindre end 0,5 m. Da efterladenskaberne på daværende tidspunkt vil befinde sig i mellem 58 m og 64 m dybde, er der ingen risiko for, at smeltevandet fra overfladen kan sive ned og blande sig med efterladenskaberne inden 2100.



Figur 3: Resultater fra klimamodellen for hhv. scenarie RCP2.6 (rød), RCP4.5 (gul) og RCP8.5 (lilla). A: Dybden af efterladenskaberne ved Camp Century for forskellige klimascenarier. B: Maksimal nedsivning af smeltevand for forskellige klimascenarier. (Udsnit af A.)

Det skal understreges, at nærværende resultater er baseret på en vurdering af mulige fremtidige klimascenarier. Det betyder, at hvis CO<sub>2</sub>-indholdet i atmosfæren øges mere drastisk end IPCC's forudsigelser, vil der dannes mere smeltevand, og vandet vil efter al sandsynlighed trænge dybere ned.



## Sammenfatning

”Camp Century undersøgelses- og overvågningsprogrammet” har udført en omfattende kortlægning af Camp Century-basestrukturen og en indgående analyse af nuværende og fremtidige sneforhold. Ved hjælp af matematiske modeller er risikoen for henholdsvis udsmeltning af basens efterladenskaber samt nedsivning af smeltevand fra overfladen blevet beregnet. Ud fra målinger af temperaturen ved Camp Century, observationer fra en automatisk vejrstation (installeret i 2017) 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 over 50 m dybde.

# Appendix

## Bibliografi

**Colgan et al 2016:** Colgan, W., H. Machguth, M. MacFerrin, J. Colgan, D. van As and J. MacGregor. 2016. The abandoned ice sheet base at Camp Century, Greenland, in a warming climate. *Geophysical Research Letters*. 43: 8091-8096.

**Karlsson et al 2019:** Karlsson, N., W. Colgan, D. Binder, H. Machguth, J. Abermann, K. Hansen and A. Pedersen. 2019. Ice-penetrating radar survey of the subsurface debris field at Camp Century, Greenland. *Cold Regions Science and Technology*. 165: 102788.

**Langen et al., 2017:** Langen, P., R. Fausto, B. Vandecrux, R. Mottram and J. Box. 2017. Liquid water flow and retention on the Greenland ice sheet in the regional climate model HIRHAM5: Local and large-scale impacts. *Frontiers in Earth Science*. 4: 110.

**Noël et al 2018:** Noël, B., W. J. van de Berg, S. Lhermitte, and M. R. van den Broeke. 2019. Rapid ablation zone expansion amplifies north Greenland mass loss. *Science advances* 5, no. 9, eaaw0123.

**Vandecrux et al., 2018:** Vandecrux, B., R. Fausto, P. Langen, D. van As, M. MacFerrin, W. Colgan, T. Ingeman-Nielsen, K. Steffen, N. Jensen, M. Møller and J. Box. 2018. Drivers of Firn Density on the Greenland Ice Sheet Revealed by Weather Station Observations and Modeling. *Journal of Geophysical Research*. 123: doi:10.1029/2017JF004597.

**Vandecrux et al., 2020:** Vandecrux B, Fausto RS, Van As D, Colgan W, Langen PL, Haubner K, Ingeman-Nielsen T, Heilig A, Stevens CM, Macferrin M, Niwano M. Firn cold content evolution at nine sites on the Greenland ice sheet between 1998 and 2017. *Journal of Glaciology*. 2020:1-2.

**Vandecrux et al., 2021:** Vandecrux B, Colgan W, Solgaard A, Steffensen JP and Karlsson, NB. Firn evolution at Camp Century, Greenland: 1966-2100. *Frontiers in Earth Sciences | Cryospheric Sciences*. 2021. doi: 10.3389/feart.2021.578978.