

Global klimaovervågning med GNSS

Finn Bo Madsen, Shfaqat Abbas Khan og Jens Emil Nielsen

Hvornår bliver de folkerige floddeltaer i Asien ubeboelige, hvornår forsvinder Maldiverne eller sommerhuset på Danmarks Vestkyst. Verdenshavene stiger i takt med at ismasserne ved polerne smelter og ledes ud i oceanerne. Et centralt spørgsmål for hele verdenssamfundet er: hvor hurtigt sker det og hvornår skal der skrides ind? Massebalancen af Grønlands indlandsis er en særdeles god indikator for globale klimaforandringer. Vi viser at man ved hjælp af GNSS¹ kan følge klimaforandringerne, og bidrage med kvantitative svar.

Dette er blot nogle få, men særdeles konkrete spørgsmål der følger i kølvandet på de globale klimaforandringer der pågår i dette årti. Politikere og planlæggere har behov for løbende at blive opdateret om klimaforandringer for at kunne være på forkant med såvel politiske beslutninger som logistiske og tekniske foranstaltninger. Forskere fra mange lande og discipliner arbejder på højtryk for at beskrive processerne og svare på helt konkrete spørgsmål. De geofysiske videnskaber bidrager bl.a. med svar på hvor meget verdenshavene stiger.

Grønlands indlandsis udmærker sig som medie for studier af klimaforandringer, ved at være så tilpas stor at ændringer i massebalancen vil have en global indikation. Set i forhold til Antarktis er Grønland velafgrænset hvad ismasserne angår, lettere tilgængelig logistisk og nemmere at arbejde i.

Projektet kaldes "Greenland GPS Network" (GNET) og den grundlæggende ide er at måle jordskorpens højdeændringer ved hjælp af meget præcise beregninger af data fra GNSS stationer der er fastgjort til solidt fjeld.

Jordskorpen reagerer på Indlandsisens masse ved en elastisk sammenpresning. Hvis der forsvinder masse vil jordskorpen hæve sig som en umiddelbar respons, og ved at måle højdeændringer med GNSS over flere år, vil det være muligt at bestemme om der sker en netto afsmeltning. Herudover er der en effekt hvor der under istidsmaksimum flyder masser bort fra belastningen fra iskapperne i en meget langsom viskos proces. Ved belastningens ophør vil den omvendte proces ske til-

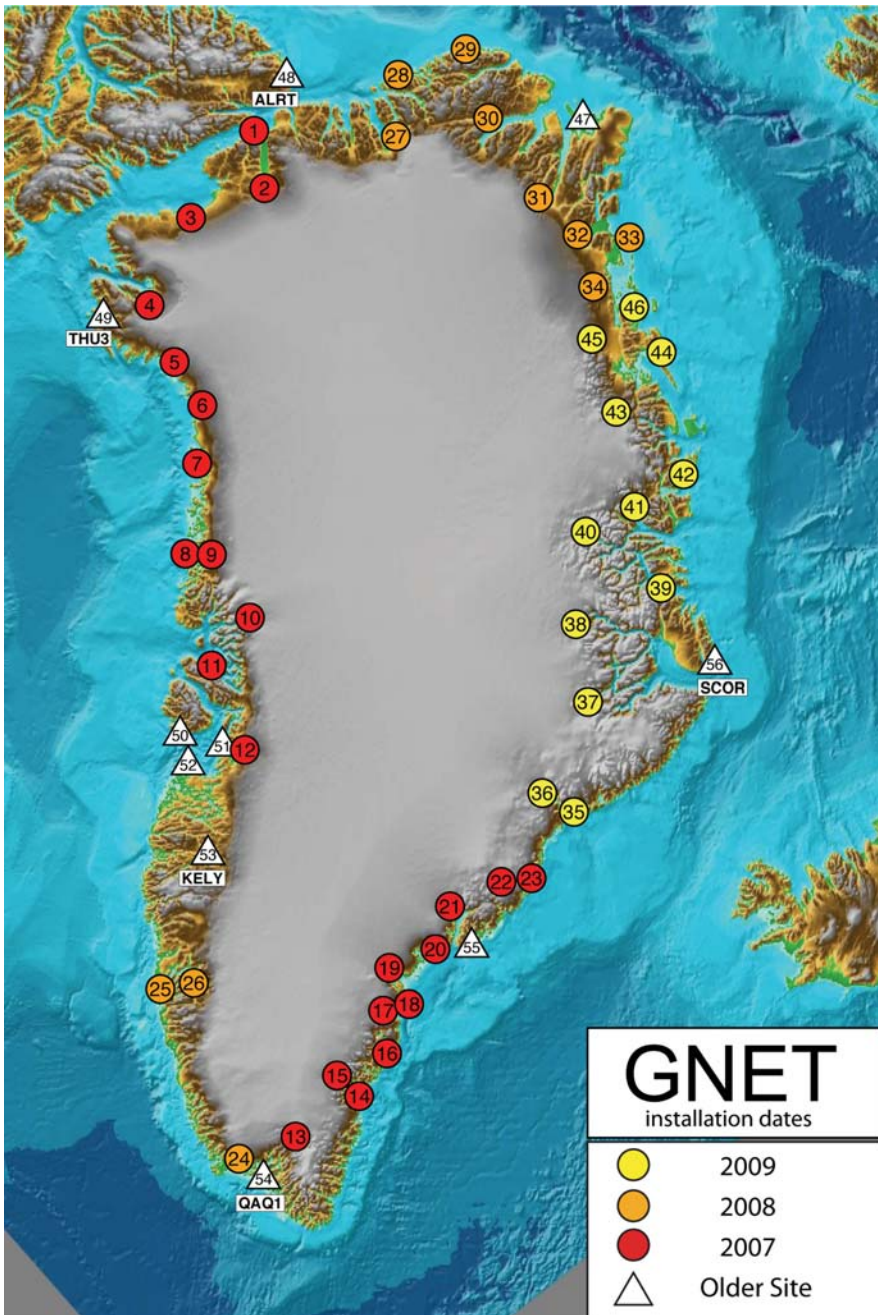
svarende langsomt. Denne viskose effekt er indeholdt i højdebestemmelsen og skal trækkes fra' for at bestemme den elastiske effekt der er udtryk for igangværende klimaforandringer. Effekten bestemmes ved gentagne absolutte tyngdemålinger, som DTU Space har påbegyndt i 2009.

Ideen om højpræcisions GNSS til klimaovervågning ved måling af jordskorpens deformation har eksisteret i bl.a. DTU Space i flere år, og etablering af GNSS stationer har uden held været søgt finansieret via danske forskningsmidler. Initiativtager til GNET er Dr. Michael Bevis fra Ohio State University, der som Principal Investigator har modtaget en bevilling på godt 3 mio. US Dollar til opbygning af et netværk af permanente GNSS stationer i Grønland. DTU Space medvirker med data fra eksisterende permanente GNSS stationer i Grønland, med egen forskning, planlægning, logistik og deltagelse i feltarbejder.

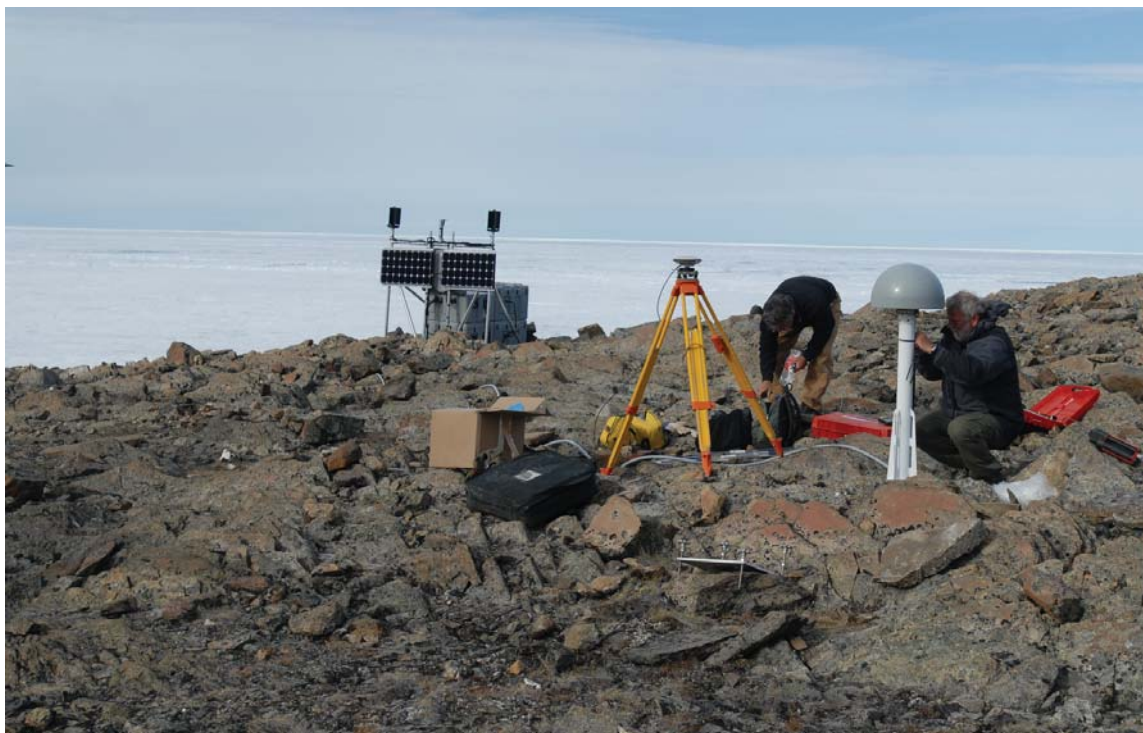
Etablering af de permanente GNSS stationer i GNET er sket over 3 år siden 2007. I det følgende beskrives den tekniske opbygning af de permanente stationer, logistik og feltarbejde i forbindelse med etableringen. Dernæst beskrives feltarbejdet med de absolutte tyngdemålinger. Endelig beskrives nogle af de foreløbige resultater af GNSS beregningerne, og der sammenlignes med resultater opnået med GRACE satellitterne.

Opbygning af GNET

Der er bygget i alt 46 nye permanente GNSS stationer der omkranser hele Grønland. Herudover indgår 10 allerede eksisterende stationer ligeledes i netværket.



Figur 1. Stationer i GNET (Bevis, 2009) Stationernes placering er planlagt med baggrund i de større gletschere og isstrømme, og er ofte placeret parvist med en station tæt på isranden og en på yderkysten. En afgørende lokaliseringsfaktor er at monumentet skal fastgøres til solidt fast fjeld.



Figur 2. Permanent station ved Jewell Fjord i Nansen Land, Nordgrønland (C) Max Rasmussen

Teknisk opbygning

En permanent station består af et monument, GNSS antenne, GNSS modtager, strømforsyning og datakommunikation. De fleste stationer er oprettet som autonome stationer, dvs. uden for byer og bygder, og har derfor egen strømforsyning og satellitbaseret datakommunikation via Iridium. Strømforsyningen består her af en batteribank der oplades med solcellepaneler og vindturbiner. Strømforbruget er på omkring 5 Watt og kapaciteten på batteribanken er dimensioneret på baggrund af længden af mørkeperioden. Stationerne er derfor forsynet med en batteribank på 1200, 1800 eller 2400 Amperetimer varierende fra Syd- til Nordgrønland.

På billedet i figur 2 ses monumentet med antenne, rammen med solceller samt kasser med batterier, GNSS modtager og Iridium-kommunikation.

Logistik

En station med 24 stk. 100 Ah batterier vejer ca. 1000 kg hvilket stiller store krav til transport fra USA eller Danmark til Grønland. I 2008 er ca. 8 tons materiel fløjet ind fra Thule Airbase til Station Nord med assistance fra Flyvevåbnets Hercules C-130 transportmaskiner. De 16.000 liter brændstof der blev brugt i sommeren 2008 er ligeledes fløjet ind med Hercules C-130.

Til udbringning af stationer i felten er benyttet en helikopter af typen AS332C Super Puma, der er chartret hos Air Greenland og opereret af Airlift fra Norge. Denne helikoptertype har en nyttelast på ca. 1400 kg, og har samtidig en rækkevidde på næsten 700 km uden optankning.

Helikopteren bruger 600 liter brændstof pr time. Hvis afstandene er større end de ca. 350 km fra hovedbasen må der udlægges brændstofdepoter.



Figur 4. Super Puma helikopteren på Station Nord

(C) Finn Bo Madsen

I figur 5 er vist de stationer der blev etableret med base fra Station Nord i 2008. De fjerneste stationer ligger her ca 475 km fra Station Nord. Der er herfor udlagt brændstofdøpote ved Kap Harald Molkte og ved Centrum Sø. Disse steder findes primitive landingsbaner for Twin Otter fastvingede fly, der kan udlægge depoter på op til 1200 liter brændstof af gangen. Med indkøb, emballage, transport til Grønland og udlægning i depot med Twin Otter, koster en liter brændstof i visse tilfælde op til 1000 kr.

Absolutte tyngdemålinger

Ud over den elastiske effekt fra umiddelbar be- eller aflastning fra ismasser, undergår jordskorpen deformationer der skyldes langtidspåvirkninger fra Jordens seneste istid. Disse deformationer sker med en konstant hastighed, og skyldes at belastning over meget lang tid vil resultere i at masser i undergrunden flyder bort fra belastningen i en lang-

som viskos proces. Når de enorme iskapper forsvinder vil denne masseflytning ske med omvendt fortegn og medføre en landhævning hvor iskapperne har haft sin største udstrækning. Tilsvarende vil der ske en nedsynkning i randområder til de tidligere iskapper. Dette fænomen kendes fra Skandinavien, hvor der fortsat sker landhævning på op mod 10 millimeter om året som en viskos reaktion på ismassernes påvirkning under sidste istid selvom ismasserne er borte forlængst. Fænomenet kaldes også Glacial Isostatic Adjustment (GIA) og kan medføre såvel landhævning som nedsynkning. Dette GIA signal er indeholdt i den geometriske deformation målt med GNSS, og skal bestemmes for at isolere den elastiske deformation der kan henføres til nuværende klimaforandringer.

Tilflydning af masser i undergrunden bestemmes med absolutte tyngdemålinger ved GNSS stationerne gentaget med nogle års



Figur 5. GNSS stationer (★) og depoter (✈) omkring Station Nord

© Kort & Matrikelstyrelsen

mellemrum. Når det vides hvor stor en del af den hævnning eller sænkning der måles skyldes is-afsmeltningen i dag, kan det bruges til at sige noget om hvor stor masseændringen af isen er, hvilket igen har betydning for havniveauændringer.

Instrumentet til tyngdemålingerne kaldes A10 og er udviklet af Micro-g i USA. Det er et instrumentet der kan måle tyngdeaccelerationen med en nøjagtighed på 10-7 m/sec². Dette sker ved at der foretages et stort antal frit-fald eksperimenter. Frit-falds

eksperimenterne foretages i et vakuumkammer, hvilket betyder at der ikke vil være luftmodstand til at påvirke det frie fald, så kun tyngdekraften er på arbejde her. Med laser måles det hvor langt og hvor hurtigt testlegemet falder og derved kan tyngdeaccelerationen bestemmes. I forbindelse med en måling udføres som minimum 600 frit-falds eksperimenter og det høje antal sikrer en høj nøjagtighed på målingen. Selve målingen kan gøres på ca. 25 minutter, forberedelse til målingen, opstillingen og nedpakning af instrumentet gør at én måling typisk

tager omkring 45 minutter. Instrumentet er meget følsomt og der må f.eks. stilles telt op for at skærme mod selv små vindpåvirkninger.

Det absolutte gravimeter² er anskaffet af DTU Space i sommeren 2008. I 2009 er der blevet målt ved 11 GNSS stationer på Grønland, derudover er der målt på 14 andre punkter. Som tidligere nævnt er meningen at disse skal genmåles med nogle få års mellemrum. Nye punkter skal også måles i de kommende år, for at sikre en god dækning af landet. Der vil blive fokuseret på områder hvor vi de største højdeændringer.

På figur 6 ses antennen til GNSS stationen på monumentet i baggrunden, men de to gule "tønder" er selve tyngdeinstrumentet. Elektronikken der styre instrumentet ses til venstre i billedet. Dette er ikke en normal måling i felten. Normalt vil selve instrumentet være gemt i et telt.

Beregning af GNSS data

De GNSS beregninger der præsenteres her er foretaget med programmet GIPSY (Zumberge, 1997). GIPSY udmærker sig ved at alle væsentlige fysiske påvirkninger er modelleret. Der er i hovedtræk benyttet følgende karakteristika ved beregningerne:

Tidsspecifikke:

- Præcise satellitbaner
- Urkorrektioner til satellitter
- Jordrotationsparametre

Versionerede statiske:

- Antennefasecenter offsets for satellitter og modtagere
- Jordens tyngdefelt og andre planeters positioner i solsystemet

Disse oplysninger findes på internationale datacentre enten som parametre der er tidsspecifikt beregnet af internationale analysecentre og typisk publiceres i daglige tabeller, eller som versionerede tabuleringer der opdateres ved f.eks. nye satellitter eller antenntyper.



Figur 6. Tyngdemåling ved Thule GNSS station (C) Jens Emil Nielsen.

For hver station der beregnes koordinater til indgives: pseudorange –og fasedata via Rinx-formatet der indeholder metadata som:

- modtager fabrikat, type og firmware
- antenne fabrikat, type og referencehøjde
- antenne radome, fabrikat og type
- apriori stationskoordinater

oceanbelastning af jordskorpen i stationen (ocean loading)

Ocean loading parametre (amplitude og faseforsinkelse) findes på baggrund af apriori stationskoordinater og beregnes på hjemmesiden (<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>).

Selve beregningen foregår efter en strategi der kaldes GIPSY OASIS 5.0 Precise Point Positioning (PPP). Af navnet fremgår at stationernes koordinater beregnes enkeltvis på baggrund af satellitkonstellationen og de benyttede karakteristika og modeller. Modsætningen er en netværksstrategi hvor punkterne beregnes differentielt. Den differentielle beregning udmærker sig ved delvis at eliminere fejl der kan antages at virke ens i nabostationer. Til gengæld er stationernes koordinater korrelerede således at fejl eller dårlige målinger i en station vil påvirke ikke blot nabopunkter men i princippet hele netværket. PPP modellen udmærker sig ved at stationer ikke er korrelerede, men stiller større

krav til modellering idet fejlbidrag ikke elimineres ved princippet i den differentielle teknik.

Resultater fra GNSS beregning

I det følgende præsenteres GNSS resultater fra 2 testområder hvor permanente GNSS stationer var etableret nogle år inden GNET blev iværksat. Tidsserier for hvordan jordskorpen deformeres i polare egne viser årlige variationer der bedst bestemmes på adskillige års data.

Testområde Diskobugt

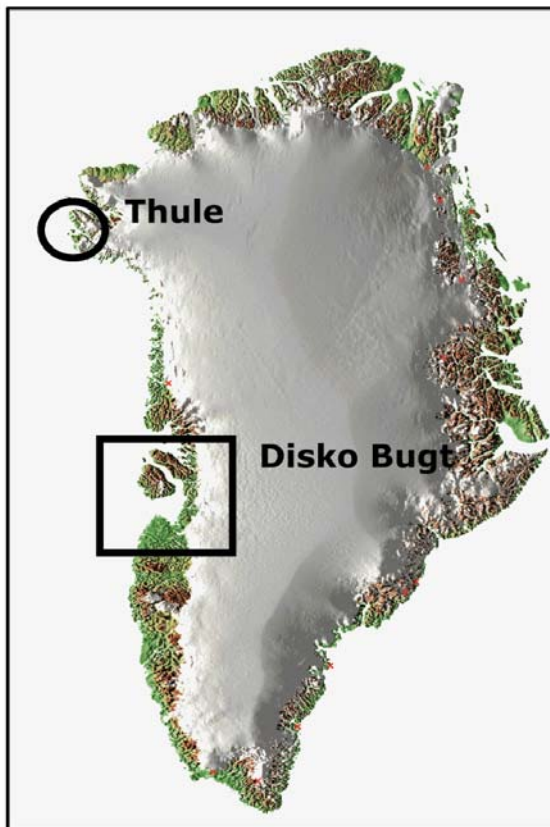
Sermeq Kujalleq er en af de mest produktive gletschere i Grønland og munder ud ved Ilulissat i Diskobugten. Talrige forskningsprojekter har overvåget aktiviteten af denne gletscher gennem et par årtier. I 2005 blev etableret GNSS stationer i Qeqertarsuaq, Ilulissat og Aasiaat. I 2007 blev tillige etableret en permanent GNSS station (Kangia) tæt ved gletscheren.

Afsmeltning og afstødning (ablation) af is fra denne gletscher har bl.a. været kortlagt fra flybårne laser missioner hvor området overflyves med laseraltimetre (Jouhgin, 2008). Ved anvendelse af kinematisk GNSS bestemmes positionen af laserinstrumentet i flyet med få centimeters nøjagtighed. Sammen med måling af højden fra flyet til gletscheroverfladen dannes en terrænmodel. Målingerne gentages med få års mellemrum og ved differens dannes modeller for hvor stort volumen is der forsvinder per år.

Figur 8 (b) viser en model for ablation per år i udtyndingsområdet for Sermeq Kujalleq (Khan et. al., 2010)

Data fra GNSS stationer er beregnet efter PPP modellen som beskrevet ovenfor. Flere års daglige løsninger sammensættes i tidsserier og analyseres. Højdekomponenter i løsningerne er korrigeret for GIA effekt ved hjælp af en foreløbig model: ICE-5G (Peltier, 2004). Der løses for årlige perioder, disse elimineres og en årlig trend findes på baggrund af hele tidsserien.

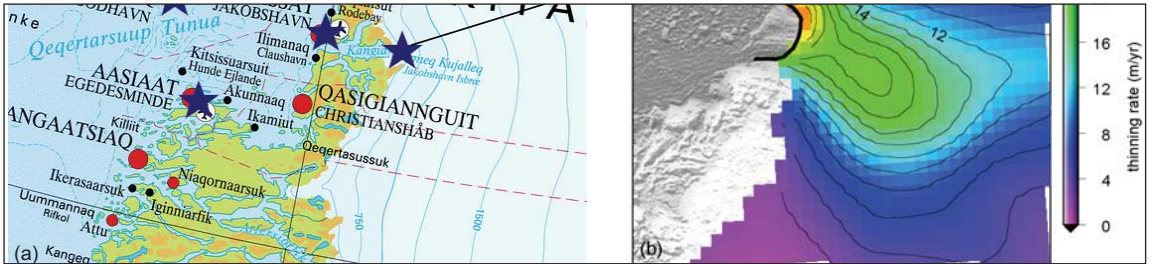
Analyserne er præsenteret i figur 9. I første kolonne vises den beregnede højdekom-



Figur 7. Testområder

ponent samt den filtrerede løsning der klart viser et helårligt signal. Der akkumuleres masse i løbet af vinteren som trykker jordskorpen ned. Om sommeren forsvinder mere masse end den forudgående vinters akkumulerede, og der sker således en netto-afsmeltning (idet der er korrigeret for GIA effekt). I kolonne 2 vises tidsserien hvor de årlige periodiske signaler er fjernet. Kolonne 3 viser spredningen på tidsserien. Der regnes først data fra et helt år. Dernæst tilføjes succesivt 1 måneds ekstra data og kurven viser så spredningen på tidsserien. Af kurven ses at der skal være næsten 2 års data før tidsserien er stabil.

Testområdet ved Diskobugten er et 'proof of concept': Ablationsmodellen omsættes til is-



Figur 8. Placering af GNSS stationer (tv) og model for ablation i udtynningsområdet (th)
 © Kort & Matrikelstyrelsen (tv) (Khan S.A., 2010) (th)

mængder der omsættes til massetab. Aktuelt er massetabet fra ablationsmodellen beregnet til ca. 23 kubikkilometer is per år. Ved at benytte parametre der beskriver jordskorpens elasticitet, kan man beregne jordskorpens deformation som funktion af afstanden fra området for massetabet.

Valideringen foregår ved at beregne deformationen i GNSS stationernes lokationer ud fra ablationsmodellen. Denne beregnede deformation stammer fra den flybårne radarmåling og er derfor en uafhængig kontrol. Resultatet af sammenligningen fremgår af tabel 1.

Vi mener at årsagen til forskelle mellem ablationsmodel og GNSS beregnede deformationer skyldes at den foreløbige GIA model ikke er god nok. GIA modellen bygger primært på antagelser om udbredelsen af gletschere under Jordens sidste istid og nedsningsperiodicitet.

Den fremgangsmåde vi ønsker at benytte med absolutte tyngdemålinger i GNSS stationerne, vil give et mere præcist resultat i omregningen mellem jordskorpedeformation og ismængder.

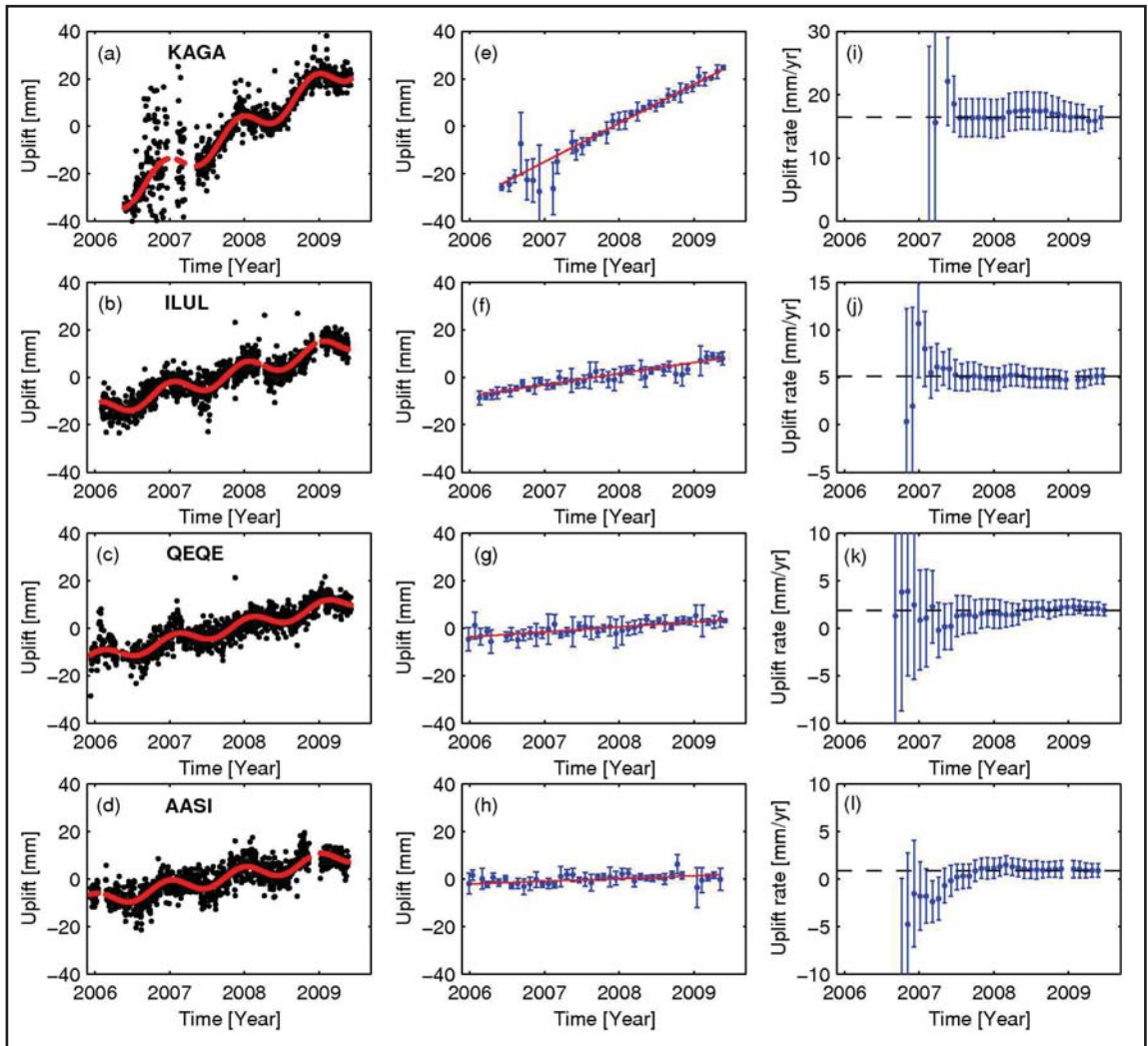
Testområde Thule

Resultater fra satellitmissionen GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) har vist at massetabet har bredt sig fra syd-østgrønland, op langs vestkysten frem til Thule og videre nordpå. GRACE er en tandem satellitmission. To identiske satellitter flyver i samme bane ca. 500 km over jordens overflade og måler kontinuert afstanden mellem satellitterne med en nøjagtighed på 1/100 mm. Afstanden mellem satellitterne er ca. 220 km. Den basale ide er at når den forreste satellit overflyver områder med større densitet end den bagerste, vil der ske en opbremsning som følge af en større gravitation. Forskelle i gravitation observeres som en deformation af afstanden mellem satellitterne. Når det samme område overflyves vil selv små forskelle i gravitation kunne registreres. Mange forskningsprojekter har vist at GRACE kan benyttes til at kortlægge f.eks. grundvandstand og således også ændringer i ismasser over Grønland. (<http://www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/>)

Figur 10 viser massetab i Grønland bestemt med GRACE. Der ses et kraftigt massetab i syd-øst Grønland. I denne sammenhæng

Tabel 1. Sammenligning mellem ablationsmodel og GNSS

	Højdeændring i mm/år			
Lokation	Kangia	Ilulissat	Qeqertarsuaq	Aasiaat
Ablationsmodel	17.1	3.8	1.3	1.5
GNSS beregnet	16.4	4.9	1.9	0.9



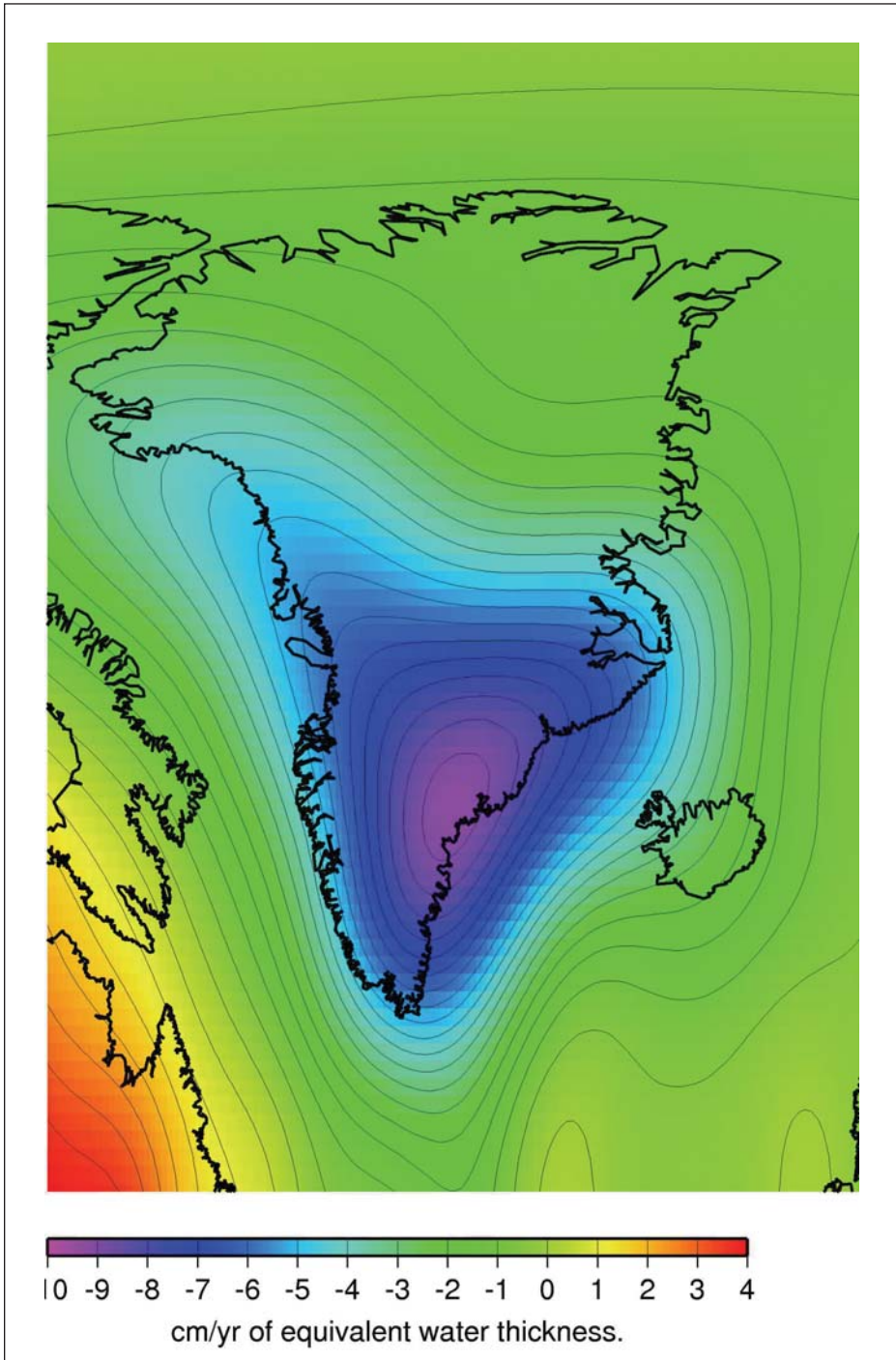
Figur 9. Tidsserier fra Diskobugten (Khan S.A., 2010)

er det tendensen til stigende massetab op langs Grønlands vestkyst der fokuseres på. Hensigten med testområdet fra Thule er at undersøge om opløsningen i GNSS tidsserier er tilstrækkelig god til at erkende en acceleration i højdekomponenten.

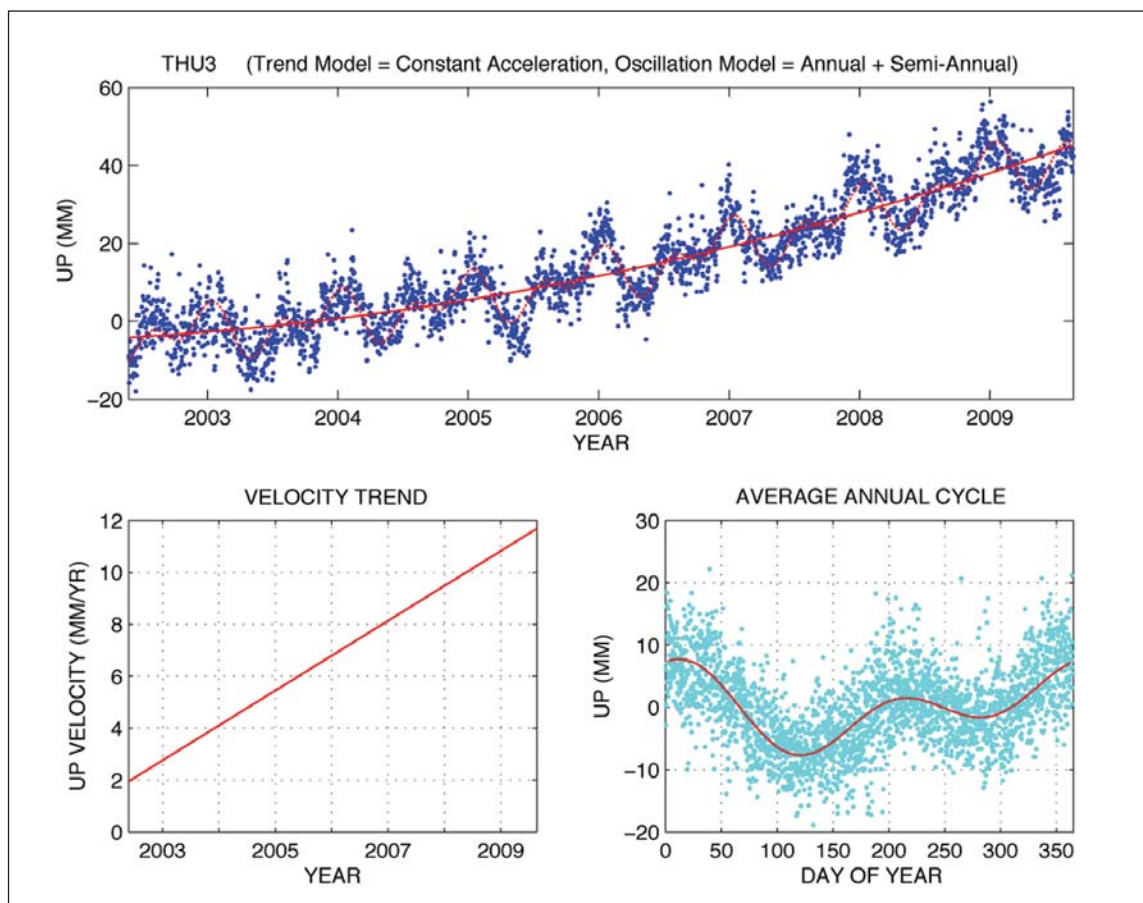
Tidsserien for Thule i figur 11 viser at højde deformationen er steget fra ca 2 til 10 mm/år fra 2002 til 2009. GNSS baserede tidsserier har altså en opløsning og en nøjagtighed der

er tilstrækkelig til detektering af små ikke-lineære deformationsprocesser.

Kurven der viser højdekomponentens middel års variation viser 2 perioder: en helårlig hvor masse ophobes om vinteren og afsmelter om sommeren. Den halvårige periode med hævnning af jordskorpen om sommeren tilskrives vi udsving i såkaldt atmosfærisk loading af jordskorpen.



Figur 10. Massetab i Grønland bestemt med GRACE (Wahr J., 2009)



Figur 11. Tidsserie fra Thule (Bevis, M., 2009)

Konklusion

Vi har demonstreret at GNSS kan benyttes som værktøj til bestemmelse af massetab og dermed indirekte globale klimaforandringer med Grønlands Indlandsis som medie. Deformationer af jordskorpen kan med pålidelighed omsættes til massetab af de vandressourcer der er opmagasineret i Indlandsisens randområder. Vi har demonstreret at langs tidsserier med GNSS resultater, har en opløsning og en nøjagtighed der er tilstrækkelig til at GNSS kan benyttes som indikator for at forandringer er initieret til nye områder.

Mens vi venter på at tidsserierne for de mange nye stationer vokser sig pålidelige, er der ud-

fordringer med at etablere absolutte tyngdemålinger i GNSS stationerne. Absolutte tyngdemålinger er sammen med GNSS til at beskrive højdeændringer geometrisk, den mest præcise metode til at bestemme pålidelige Glacial Isostatic Adjustment modeller. Disse modeller vil være af stor værdi for andre cryosfærelaterede forskningsværktøjer som f.eks. GRACE.

Omvendt vil satellitbaserede missioner som GRACE være nødvendig som supplement til overvågning af forandringer midt inde på Indlandsisen, hvor en masseændring ikke vil kunne ses som respons i GNSS stationer på klippegrund ude på kysten mange hundrede kilometer borte.

Ud over GNSS og andre satellitbaserede overvågningsværktøjer til at overvåge globale klimaforandringer, er det oplagt at foretage vandstandsobservationer. DTU Space driver tre tidevandsstationer i Grønland der er knyttet til permanente GNSS stationer, og forventer at inddrage data herfra i forskningen fremover.

Referencer

Bevis, M., Personlig kommunikation, 2009

Joughin, I., I.M. Howat, M. Fahnestock, B. Smith, W. Krabill, R.B. Alley, H.Stern, M. Truffer, Continued evolution of Jakobshavn Isbrae following its rapid speedup, Journal of Geophysical Research, 113,

Khan S.A, L. Liu, J. Wahr, I. Howat, I. Joughin, GPS measurements of crustal uplift near Jakobshavn Isbræ due to glacial ice mass loss, under peer review 2010

Peltier, W.R., Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model

and GRACE, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32, 111-149, 2004

Wahr, J. Personlig kommunikation, 2009

Zumberge, J.F., M.B. Hefflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins, F.H. Webb, Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research, 120,5005-5017, 1997.

<http://www.oso.chalmers.se/~loading/>

<http://www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/grace/>

Fodnoter

¹ GNSS: Global Navigation Satellite System, er en fællesbetegnelse for GPS, Galileo, GLONASS m.v.

² Instrument til måling af den absolutte tyngdeacceleration (m/s^2)

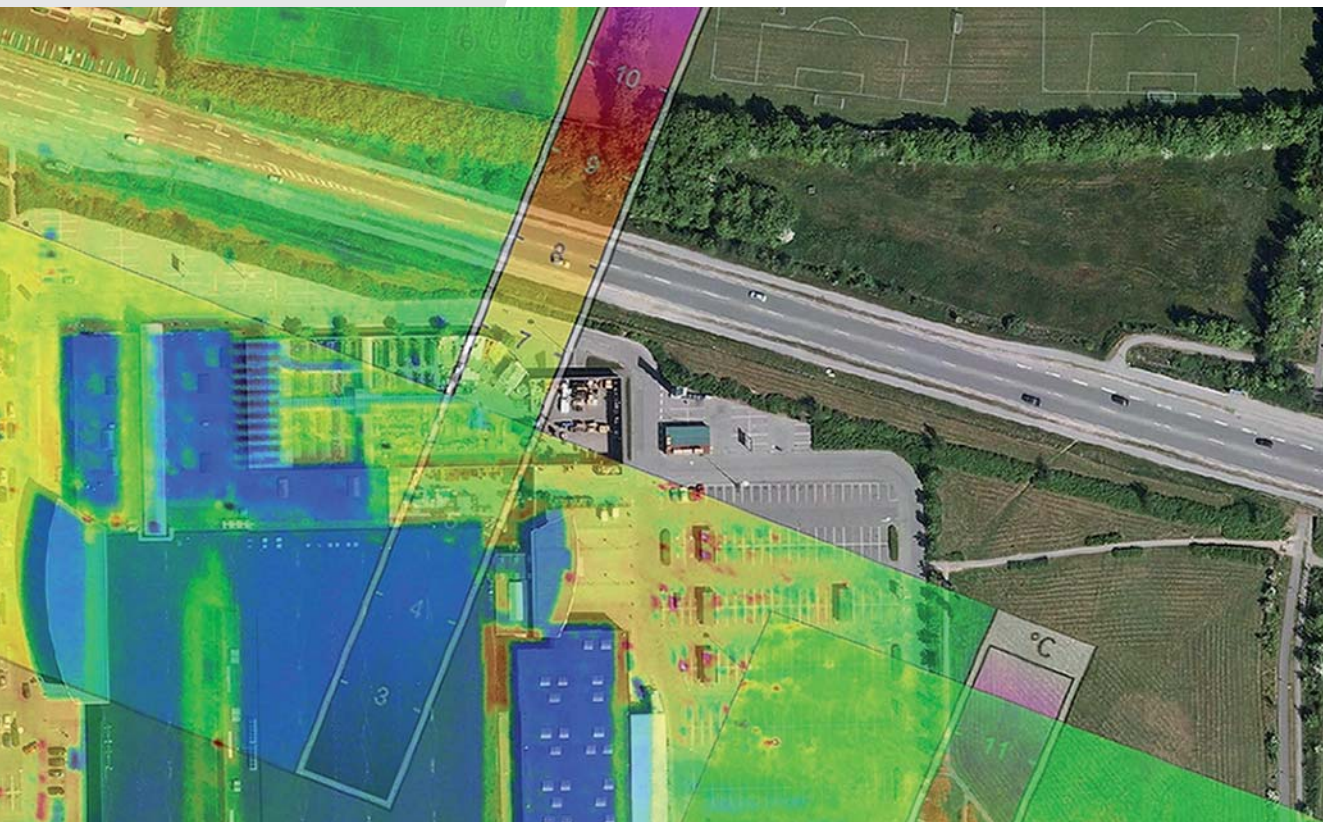
Om forfatteren

Finn Bo Madsen, Landinspektør, Sektionsleder, DTU Space, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø, E-mail: bm@space.dtu.dk

Shfaqat Abbas Khan, Ph. D., Seniorforsker, DTU Space, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø, E-mail: abbas@space.dtu.dk

Jens Emil Nielsen, Cand. Scient., Videnskabelig Assistent, DTU Space, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø, E-mail: jemni@space.dtu.dk

Termografisk kortlægning



Termografisk kortlægning fra luften er en metode til at analysere og visualisere f.eks. bygningers varme og -energitab. Ved hjælp af specielt kameraudstyr er det muligt fra luften at identificere f.eks. bygninger og fjernvarmerør, der udstråler for meget varme.

COWI kortlægger varmetab fra luften

Varmetab fra f.eks. bygninger og fjernvarmenetværk kortlægges præcist og effektivt ved hjælp af professionelt udstyr til termografisk måling fra luften. Det termografiske kamerasystem er tilknyttet avanceret GPS, der gør at varmetabet kortlægges med stor præcision. Områder, med store varmetab, udpeges i detaljer ned til 20 cm's pixelstørrelse.

COWI har en dyb faglig viden inden for bl.a. byggeri, fjernvarme og økonomiske samfundsanalyser og med den viden udfører COWI tolkninger og analyser, der sikrer, at beslutninger om renovering kan optimeres.

Kongens Lyngby

Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby
Tlf. 45 97 22 11
Fax 45 97 22 12

Odense

Odensevej 95
5260 Odense S
Tlf. 63 11 49 00
Fax 63 11 49 49

Silkeborg

Papirfabrikken 28
8600 Silkeborg
Tlf. 87 22 57 00
Fax 87 22 57 01

Aalborg

Thulebakken 34
9000 Aalborg
Tlf. 99 36 77 00
Fax 99 36 77 01

COWI
www.cowi.dk/varmekort