

Ændringer i Jordens tyngdefelt fra GRACE – tørke, oversvømmelse og is-afsmeltning målt fra rummet

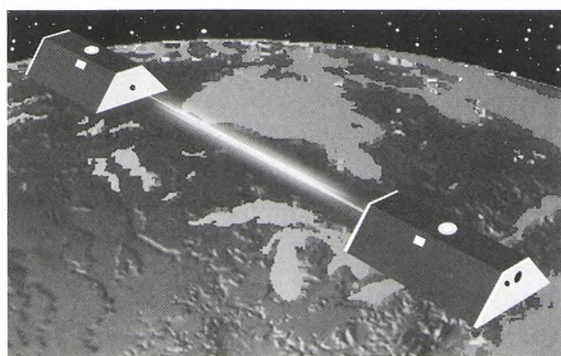
Ole B. Andersen, Danmarks Rumcenter

Jordens tyngdefelt bevirker, at vi mennesker bliver fastholdt på Jorden og de fleste ved, at Jordens tyngdefelt varierer en lille smule (ca. 1/1000 af selve tyngden) fra sted til sted på grund af densitetsforskelle i Jordens yderste lag. Endnu mindre tidsvariationer – der nu kan måles med GRACE-satellitterne – kan afsløre ændringer i vandets fordeling f.eks. i forbindelse med tørke, oversvømmelser og afsmeltningen af is.

Jordens tyngdefelt viser i store træk, hvordan Jordens yderste dele (skorpen) ser ud. Hvad færre nok ved er, at Jordens tyngdefelt også varierer med tiden. Størrelsen af dette signal er meget småt (ca. 1/1000 af tyngdevariationerne eller en milliontedel af selve tyngden), og skyldes at vandets fordeling i det hydrologiske kredsløb på Jorden ændrer sig med tiden.

De to tvillinge-satellitter kaldet GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) blev opsendt fra Rusland den 17. marts 2002 via et samarbejde mellem NASA og det tyske rumforsknings institut (DLR). Satellitterne er sendt i kredsløb om Jorden i omtrent 450 km højde, og med en banehældning i forhold til Jordens ækvatorplan på 89 grader dækker GRACE næsten hele Jorden [8].

Satellitterne er et næsten identisk tvillingepar, der jagter hinanden rundt om Jorden som Chip og Chap med en hastighed af 25000 km i timen og en indbyrdes af-stand på ca. 200 km. Når satellitterne kredser rundt om Jorden påvirker områder med stærkere tyngdekraft formationen på den måde, at den forreste satellit trækker en smule væk fra sin forfølger. Ved konstant at måle afstanden mellem de to satellitter med stor præcision, er GRACE i stand til opfange selv de mindste svingninger i Jordens tyngdefelt.



Figur 1. GRACE satellitterne i omløb om Jorden i ca. 450 km højde, hvor afstanden på ca. 200 km mellem de to satellitter måles med ultrahøj nøjagtighed med et mikrobølgelink.

Det er netop i præcisionen af denne afstandsmåling mellem de to satellitter, at GRACE konceptet er enestående. Det skyldes et mikrobølgelink mellem de to

satellitter, der kan bestemme afstanden med 1 mikrometers nøjagtighed, svarende til 1/100 af tykkelsen på et hår. Herved bliver GRACE i stand til at kortlægge Jordens tyngdefelt med en opløsning på ca. 1000 km hver måned af langt højere nøjagtighed, end det er set før. Da man fra GRACE kan producere et tyngdefelt hver måned, bliver man for første gang i stand til også at studere ændringer i Jordens tyngdefelt på disse skalaer.

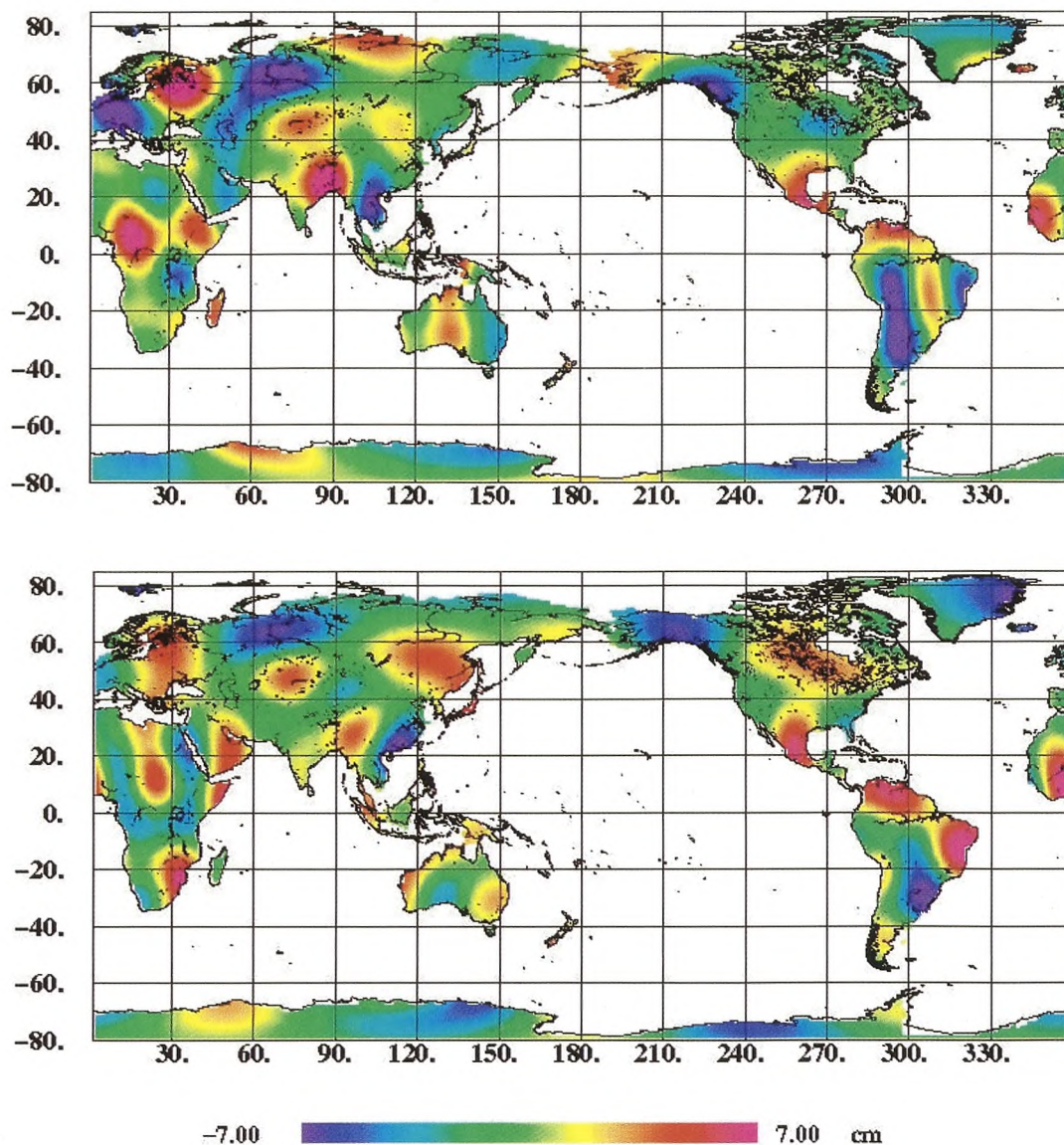
Ændringer i Jordens tyngdefelt giver direkte indblik i ændringer i massefordelingen direkte under satellitten. Det vil sige på, i og over Jorden. GRACE måler den integrerede masseændring under satellitten, som hovedsageligt skyldes ændringer i fordelingen af vand under satellitten. Det være sig ændringer i mængden af grundvandet på kontinenterne, ændringer i størrelsen af gletsjere og indlandsis eller ændringer i havstrømme og ændringer i vand bundet i atmosfæren.

På nuværende tidspunkt har GRACE satellitterne været i kredsløb i ca. 4 år og har leveret månedlige data for årene 2002, 2003 og 2004. Ved at fjerne bidraget til tyngdefeltsændringer fra kendte og kortlagte bidrag, så som tidevand og tide-jord, atmosfære, oceanvariationer og pol-tide, kan man over land isolere det hydrologiske signal sammen med et eventuelt post glacialt opløft signal i tyngdemålingerne. Tyngdeændringerne er fantastisk små og man bliver i processeringen nødt til at midle observationerne over et stort område (1000 km og 1 måned) for overhovedet at set et signal. Det betyder at de tyngdefelter som leveres for tiden kun har en rumlig opløsning på ca 1000 km (en måned i tid), hvorfor man kun kan analysere signaler af større rumlig og tidslig udstrækning.

Det hydrologiske signal, som er den vandmængde der ophobes på Jorden eller i undergrunden, kan bestemmes som regnmængden minus fordampningen og den del der transporteres væk i floder. Vandmængden kan approksimeres med et tyndt lag af vand med en tykkelse $h(t)$. Tyngdeændringen $\Delta g(t)$ som funktion af denne masse kan bestemmes [4] som

$$\Delta g(t) = 41,89(\mu\text{Gal/m}) \cdot h(t), \quad (1)$$

hvor en mikro Gal, $1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$. En tyngdeændring på $1 \mu\text{Gal}$ svarer til et 2,3 cm tykt lag vand.



Figur 2. Ændringerne i mængden af is og vand i cm på kontinenterne mellem 2002 og 2003 (øverst) og mellem 2003 og 2004 (nederst). Positive værdier indikerer en forøgelse af vand eller is i de to perioder.

De hydrologiske signaler som følge af tørke, oversvømmelse og is-afsmeltning fremkommer ved, at man analyserer to års data ad gangen, og disse signaler vil så fremkomme i forskellene/ændringerne mellem de to år. I dette tilfælde analyserer man først årene 2002 og 2003 og dernæst årene 2003 og 2004, og man benytter en stokastisk inversion på de målte GRACE tyngdefelter og deres associerede fejlfelter. I inversionen modellerer man de dominerende signaler i data, og det er nødvendigt at inkludere årstidssignalet. Dette signal er nemlig lige så stort som de lineære ændringer (trenden), som indeholder informationen om forskellene fra år til år (inter-årslige hydrologiske signal).

I inversionen modellerer man observationerne som en middelværdi (g_0) samt den lineære ændring ($g_1 t$) fra år til år (trenden) samt et årstidssignal, opskrevet som

$$g_{obs} = g_0 + g_1 t + g_2 \cos(\omega_{ann} t) + g_3 \sin(\omega_{ann} t) + e, \quad (2)$$

hvor t er tiden, og fejlen e er den størrelse man

søger at minimere i inversionen. Årstidssignalet er modelleret som en sinus og cosinus med frekvens ω_{ann} (årstidscyklus) for at tage hensyn til fasen for hvornår på året signalet har maksimum.

GRACE tyngdefelterne leveres med associerede fejlfelter, og metoden har den fordel at den giver et fejlskøn på de bestemte størrelser. På det inter-årslige signal er fejlen overalt på Jorden mindre end $0,4 \mu\text{Gal}$. Dette svarer til, at ændring i vandlagets tykkelse kan bestemmes med en nøjagtighed på 1 cm når vandlagets rumlige udbredelse er større end 1000 km. Fejlen bliver lavere ved højere breddegrader da der er flere observationer her.

Ændringer i mængden af vand og is er vist i figur 2 mellem 2002 og 2003 (top) og mellem 2003 og 2004 (bund). Et af de største signaler ses over Europa. Fra 2002 og 2003 forsvinder der masse svarende til en grundvandssænkning over det meste af Europa på mere end 7 cm og denne grundvandssænkning øges med yderligere 4 cm i 2004. En undersøgelse [2] har

påvist, at grundvandssænkningen i 2003 var en direkte konsekvens af hedeølgen i Europa i sommeren 2003. Hedeølgen havde de største temperaturer i Frankrig [7], men signalet ses ligeledes i store dele af Tyskland og Centraleuropa. Det skyldes at vi analyserer ændringerne mellem 2002 og 2003 og implicit antager at det ene år (2002) var et "normalt" år. Men 2002 var ikke "normal" i Centraleuropa. Centraleuropa var hærget af store oversvømmelser (anomal forøgelse af vandet) i forårmånederne i 2002.

I figur 2 lægger man også mærke til det vestlige Rusland, hvor vandmængden stiger både mellem 2002 og 2003 og mellem 2003 og 2004. Det er helt omvendt til situationen i Europa, hvilket formodentlig skyldes, at vejrfænomenerne over Europa og Rusland er relateret til hinanden.

Flere andre steder ses der store variationer fra år til år, som skyldes enten unormalt tørre eller våde år. Dette ses eksempelvis i Indien og Bangladesh, der var plaget af store mængder nedbør og oversvømmelser i 2003, men som oftest har disse signaler modsat fortegn mellem de to år.

I det Arktiske område ser man blandt andet over Østgrønland et klart signal der viser at tyngden formindskes i relation til afsmeltning af is fra 2002 til 2004. Undersøger man figur 2 nærmere ses det, at afsmeltning af is viser tiltagende styrke fra 2003 til 2004 i forhold til året forinden. Signalet er blevet nærmere analyseret [3] og svarer til en afsmeltning på mere end 80 km³/år over de to år. I Alaska kan man se et signal som følge af afsmeltningen og tilbagetrækning af gletsjere i det nordvestlige Canada og Alaska.

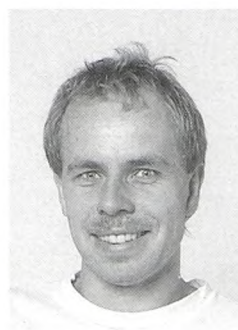
At GRACE virkelig observerer tyngdeændringer på grund af tørke og is-afsmeltning er blevet valideret [1] i bl.a. Europa, hvor resultaterne på årsbasis er blevet sammenlignet med variationerne i mængden af grundvand modelleret med den globale hydrologiske assimilations model kaldet Global Land Data Assimilation Scheme (GLDAS) [5]. Resultatet viste stor overensstemmelse på den nordlige halvkugle, hvor der indgår mange observationer i GLDAS modellen, men også store forskelle på den sydlige halvkugle, hvor der kun er få observationer. Dette viser GRACE konceptets store betydning til kortlægning af de globale hydrologiske variationer og forbedring af hydrologiske og klimatiske modeller i fremtiden. Der er yderligere foretaget direkte sammenligninger mellem GRACE og observationer foretaget med et super-ledende gravimeter [2], der måler tyngden med samme nøjagtighed som GRACE. Denne undersøgelse viste stor overensstemmelse mellem de forskellige målinger og fastslog, at GRACE faktisk observerede grundvandssænkningen som en konsekvens af hedeølgen i Europa i 2003.

Som nævnt ovenfor kræver den eksisterende undersøgelse, at ændringer i vandlaget på eller i Jorden har en rumlig udstrækning og tidslig udstrækning på 1000 km og månedlig tidsskala. En helt ny metode

er under udvikling i samarbejde mellem NASA og Danmarks Rumcenter [6, 7] der betyder, at man nu kan analysere GRACE i blokke med en størrelse helt ned til 400 km udstrækning og 1 uges tidsskala. Alternativt kan GRACE data analyseres i komplicerede områder, der eventuelt kan følge et vilkårligt dræningsbassin (dog større end 40.000 km² eller 200×200 km). Dette øger oplagt GRACEs potentiale indenfor hydrologisk og klimatologisk modellering i fremtiden.

Litteratur

- [1] Andersen O. B. & Hinderer J. (2005), Global Inter-Annual Gravity Changes from GRACE: Early Results. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No. 1, L01402 10.1029/2004GL020948
- [2] Andersen O. B., S. I. Seneviratne, J. Hinderer, P. Viterbo (2005), GRACE-derived terrestrial water storage depletion associated with the 2003 European heat wave, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18405, doi:10.1029/2005GL023574.
- [3] Forsberg, R. (2005) 85 kubik-kilometer indlandsis forsvinder hvert år. *Ingeniøren*, 18/11-2005 (nr 46), side 6-7.
- [4] Knudsen P. and Andersen O. (2002), Correcting GRACE gravity fields for ocean tide effects *Geophys Res. Lett.*, 29(8), 19-1 19-4.
- [5] Rodell, M., P. R. Houser, U. Jambor, J. Gottschalk, K. Mitchell, C.-J. Meng, K. Arsenault, B. Cosgrove, J. Radakovich, M. Bosilovich, J. K. Entin, J. P. Walker, D. Lohmann, and D. Toll (2004a), The Global Land Data Assimilation System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (3), 381-394
- [6] Rowlands. D. D. , S. B. Luthcke, S. M. Klosko, F. G. R. Lemoine, D. S. Chinn, J. J. McCarthy, C. M. Cox, and O. B. Andersen (2005), Resolving mass flux at high spatial and temporal resolution using GRACE intersatellite measurements, *Geophys. Res Lett.*, (32), L04310, doi:10.1029/2004GL021908,
- [7] Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A. & Appenzeller, C. (2004), The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, doi 10.1038,
- [8] Tapley, B.D., Bettadpur S., Ries J.C., Thompson P.F., and Watkins M.M.(2004) GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. *Science*, 305, 503-505.



Ole B. Andersen er seniorforsker i geodæsi ved Danmarks Rumcenter. Han arbejder med brug af satellit til kortlægning indenfor bl.a. geodæsi, oceanografi og hydrologi.