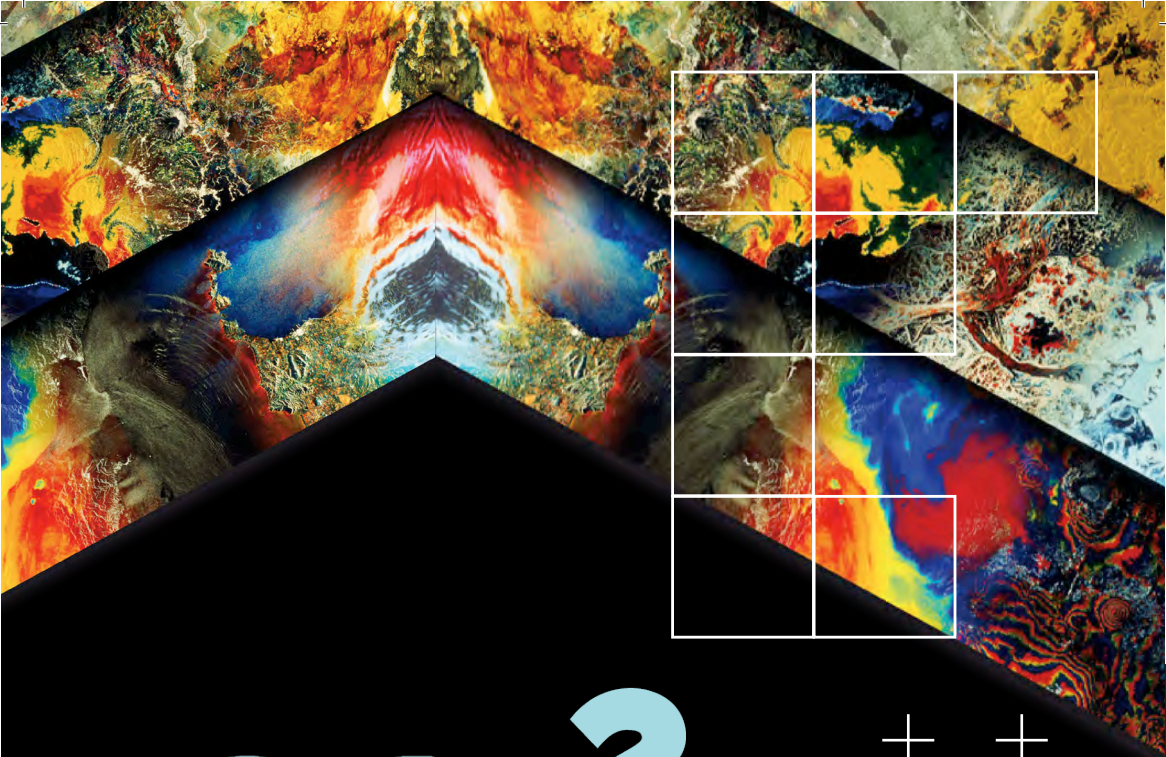




Gfg²®

+

+

**GNSS för globala
jordobservationer**



DETTA HÄFTE har producerats av Gfg2-projektet, en treårig koordineringsaktivitet finansierad av Europeiska kommissionens sjunde ramprogram inom dess miljötema. Projektets uppgift är att belysa värdet av jordobservationer med hjälp av globala navigationssystem (GNSS = Global Navigational Satellite Systems) för Global Environmental Earth Observation (GEE0) och GE0SS.

Editering och layout: Ingela Roos, Zacco, Göteborg, Sverige

Texter i den engelska originalversionen: Gunnar Elgered, Rüdiger Haas, Jan Johansson, Hans-Georg Scherneck, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige; Rob Jongman, Alterra, Wageningen UR, Nederländerna; Jens Wickert, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Tyskland; Matteo Mantovani, CNR-IRPI, Padua, Italien.

Översatt till svenska av: Gunnar Elgered, Rüdiger Haas, Jan Johansson och Hans-Georg Scherneck.

Gfg²-projektet (www.gfg2.eu) koordineras av **Starlab**, Barcelona, Spanien, och har dessutom följande deltagare:

Alterra, Wageningen UR, Nederländerna,
Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige,
GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Tyskland,
Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norge,
The University of Nottingham, Storbritanien,
University of Leicester, Storbritanien

Tryckt av Chalmers Reproservice,
Göteborg, Sverige, 2014.

Inledning

GLOBALA NAVIGATIONSSYSTEM (GNSS) kommer troligen i framtiden att utgöra en ännu viktigare infrastruktur i samhället jämfört med i dag. Det amerikanska GPS (Global Positioning System) som var det första operationella systemet är välkänt för de flesta.

Vad som är mindre känt är, att förutom att bestämma en position, med en noggrannhet av några få meter, så har GNSS redan visat sig vara ett kraftfullt verktyg för att observera viktiga param-eterar rörande jorden inom geovetenska-pen. I detta häfte ger vi några exempel på sådana tillämpningar relaterade till observationer av vår planet. Dessa obser-vationer sker i olika geometrier. GNSS-

satelliterna rör sig i banor runt jorden på en höjd av lite mer än 20.000 km. Det medför att satelliterna roterar ungefär två varv runt jorden under ett dygn. När det gäller placeringen av mottagarna av GNSS-signalerna, råder en stor frihet. De kan placeras på jordytan, eller i flyg-plan, eller ombord på andra satelliter.

Dessa geometrier beskrivs på de föl-jande två sidorna, och därefter kommer exempel på olika tillämpningar. Sist i häftet finns en lista med vetenskapliga artiklar och länkar, som har bidragit med inspiration till våra exempel. De kan också vara en bra källa för den intresse-rade, som vill tränga djupare in i dessa områden.

Innehåll

- | | |
|------------------------------|--|
| 3 Innehåll | 18 Infrastruktur för tid |
| 4 Observationsgeometrier | 20 Jonosfärens dynamik |
| 6 Jordbävningar och tsunamis | 22 Väderprognoser |
| 8 Vulkaner och jordskred | 24 Klimatforskning |
| 10 Landhöjning | 26 Snödjup, vegetation,
och markfuktighet |
| 12 Glaciärer och havsis | 28 Vattennivåer i hav och sjöar |
| 14 Följa fåglar och däggdjur | 30 Referenslista och länkar |
| 16 Digital höjdmodell | |

Geometrier vid

Fyra olika geometrier används för att observera jorden med GNSS-signaler.

1. Position och tid

Position och tid för en GNSS-mottagare bestäms genom att mäta utbredningstiden för signaler som sänds från minst fyra GNSS-satelliter. Genom att ha många satelliter på himlen, och många mottagare på marken, erhålls fördelaktiga geometrier, och en mycket noggrann positions- och tidsbestämning kan då erhållas.

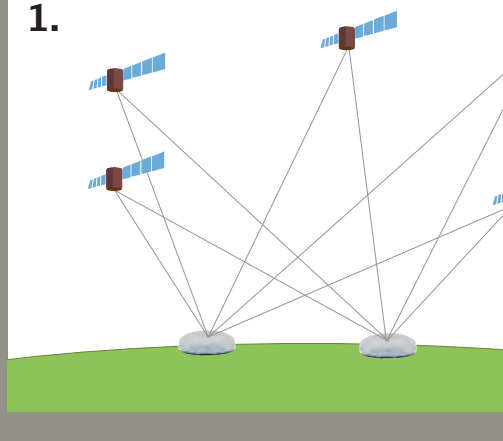
2. Fjärranalysmätningar av atmosfären från marken

GNSS-signaler som färdas genom atmosfären är fördröjda (jämfört med ljusets hastighet i vakuum). Jonosfären, från ungefär 80 km till 1000 km höjd, innehåller fria elektroner. Antalet fria elektroner kan mätas genom att använda GNSS-signaler på två frekvenser. I den neutrala atmosfären, som sträcker sig från marken upp till jonosfären, kan mängden vattenånga mätas, eftersom de mottagna signalerna utbreder sig via flera olika horisontvinklar, och därmed går genom de olika lagren av vattenånga längs olika långa sträckor.

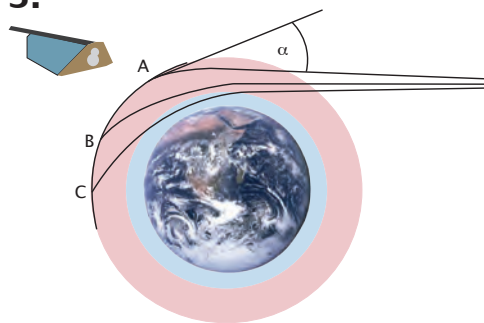
3. Atmosfärsmätningar med hjälp av ockultationer

Genom att placera GNSS-mottagare på satelliter i låg bana runt jorden (LEO = Low Earth Orbit) kan globala mätningar

1.

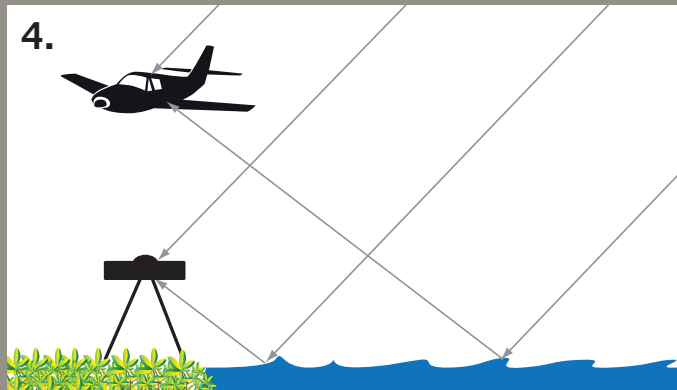
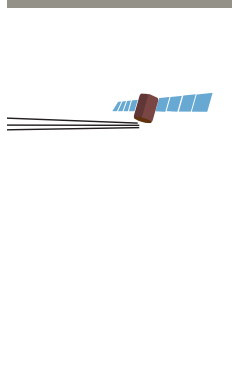
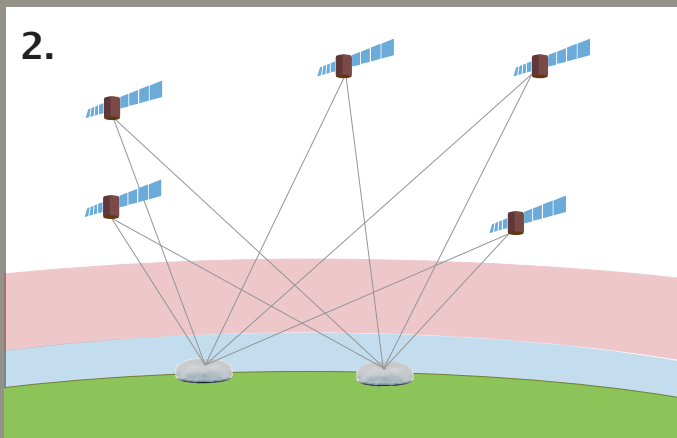
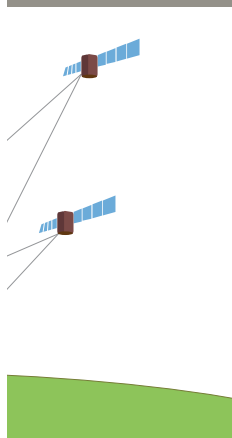


3.



av atmosfären utföras. Tekniken kallas radioockultation. Böjningen av signalvägen från den sändande GNSS-satelliten till den mottagande LEO-satelliten är själva observationen. Vertikala profiler av elektrontäthet, temperatur och vattenånga kan beräknas från tidsserier av böjningsvinklar.

jordobservationer



4. Avstånd till, och egenskaper hos, reflekterande ytor

Reflekterande ytor och objekt kan observeras genom att kombinera direkta och reflekterade GNSS-signaler. Vi kan tänka oss flera fall. Mottagaren kan använda en antenn för båda signalerna, eller en optimerad antenn för varje signal, beroende på tillämpning. Antennen kan

fixeras på en viss höjd över marken, där den reflekterade signalen kommer att ge information om förändringar i exempelvis snötäcke, vegetation, eller avståndet till det närliggande havet. Det är också möjligt att montera mottagaren på ett flygplan, eller på en LEO-satellit, för att studera reflektioner från större områden, exempelvis havsytan.

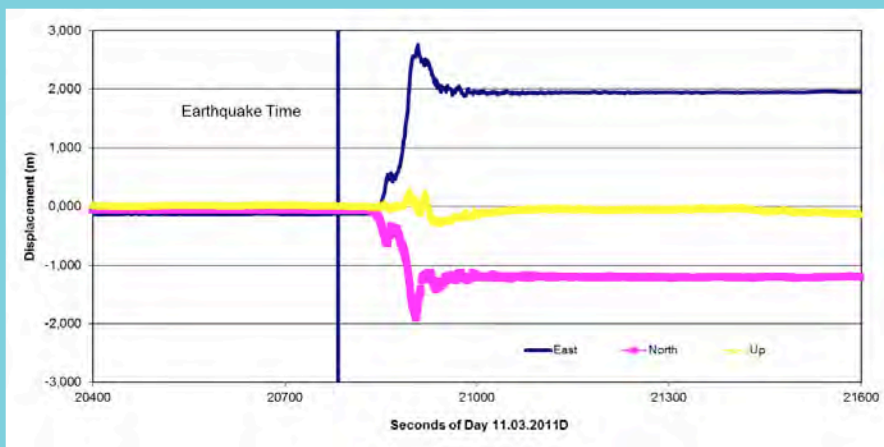
Jordbävningar

Stora jordskalv kan kräva hundratusentals offer i befolkningen. Genom att övervaka jordskorpan rörelser med omfattande GNSS-nät, kan forskare idag varna för en annalkande tsunami. Ett långsiktigt mål att kunna varna innan stora skalv och därmed kunna rädda många liv.

VARJE ÅR SKER cirka 100,000 kännbara jordskalv. De största av dem, kanske ett tiotal, förorsakar stor ödeläggelse. Skalvet vid Thailand och Sumatra i Indiska oceanen 2004, och det i Stilla havet öster om Tohoku och Fukushima i Japan 2011, med alla dödsoffer och skador på samhällena är ännu i färskt minne. Jordskalv har studerats under lång tid med seismometrar, men under de senaste decennierna har de faktiska rörelserna också övervakats av omfattande nät av

mottagarstationer för GNSS-signaler i många regioner i världen (se exempel i bilden nedan). Motivet är att få en bättre förståelse för jordbävningar, med det långsiktiga målet att möjligen kunna göra korrekta förutsägelser.

San Andreas-förkastningen i Kalifornien är ett bra exempel på en region där ett GNSS-nät har byggts upp under de senaste 10–20 åren. GNSS är bara ett av flera olika typer av mätsystem. Det är en av ett flertal komponenter i en forsk-



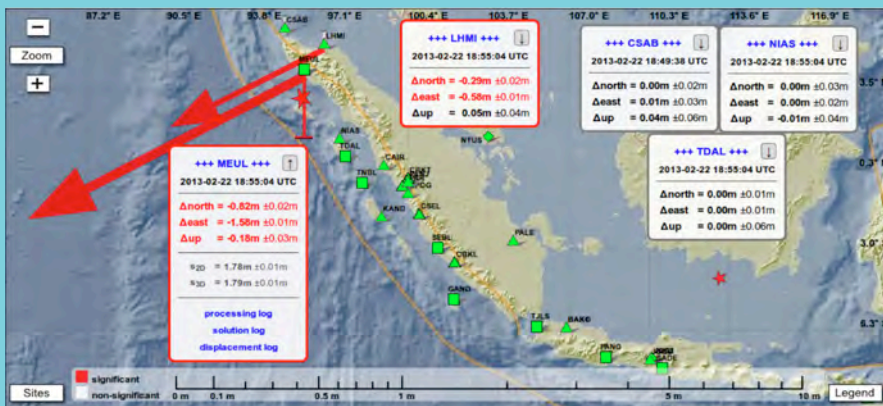
Stationsrörelser i tre koordinaterna (nord, ost, upp) uppmätta med höghastighetsdata från GPS. Diagrammet visar förloppet i samband med Tohoku-skalvet i mars 2011 utanför Japan, en jordbävning med magnitud M_w 9.0. Det är möjligt att leverera denna typ av rörelsedata med centimeternoggrannhet i realtid. Med tillstånd av M. Ge, GFZ

och tsunamis

ningens infrastruktur i USA kallad Plate Boundary Observatory, ett nätverk med geodetisk och geofysisk instrumentering som övervakar både snabba och långsamma deformationer i litosfären (jordskorpan och övre delen av manteln) i västra USA och i Alaska.

ETT AUTOMATISKT system för att i nära realtid bestämma och visualisera markrörelser, och deformation av jordytan, och sedan kartera seismisk aktivitet, har utvecklats av forskningscentret för geovetenskap i Potsdam, Tyskland (GFZ) inom projektet "German Indonesian Tsunami Early Warning System" (GITEWS). Systemet kan leverera 3D-rörelser för platser med GNSS-utrustning i området kring epicentrum för en jordbävning, med en

fördröjning på bara några minuter. Dessa vektorer är till hjälp för att bestämma de tektoniska rörelserna i samband med jordbävningen. Dessa måste vara kända för att kunna göra tillförlitliga förutsägelser, och i ett tidigt skede varna för tsunamis. Nyligen har ett så kallat Ground Tracking System (GTS) installerats, ett system med GNSS-mottagare på marken för att övervaka rörelser i jordskorpan i Indonesien. Systemet har sedan november 2008 sitt operativa centrum i Jakarta. Nedan visas en ögonblicksbild från en av övervakningsskärmarna i Jakarta. Det som visas är rörelser som beräknats från GNSS-data vid tillfället för det förödande Sumatra-Andaman-skalvet och den följande tsunamikatastrofen den 26 december 2004.



GTS och de flesta GNSS-stationerna som visas på kartan (trianglar = GITEWS realtid referensstationer, kvadrater= tidvattenmätare med GNSS) installerades efter 2005 och simulerade GNSS data har använts i denna figur (d.v.s. tidstämplat från 2013 - uppgifter från A. Babeyko, GFZ). Lateral och vertikala förskjutningskomponenter visas som pilar respektive barer. Med tillstånd av C. Falck, GFZ

Vulkaner och

Vulkaner och jordskred är allvarliga hot i vissa regioner. Markbaserade GNSS-nät bidrar med noggranna prognoser för rörelser, vilka förhoppningsvis kan minska de mänskliga och ekonomiska förluster som ofta följer.

VID ÖVERVAKNING AV VULKANER används en mängd olika mättekniker för att monitorera förändringar på ytan av vulkanen. Sådana förändringar kan indikera ett ökat tryck i magmakammaren och spänningar i berget som orsakas av förändringar i magmans sammansättning och tillflöde. Generellt är ett vulkanutbrott lättare att förutsäga jämfört med jordbävningar. Ändå har historien visat att det finns ett mått av överraskning.

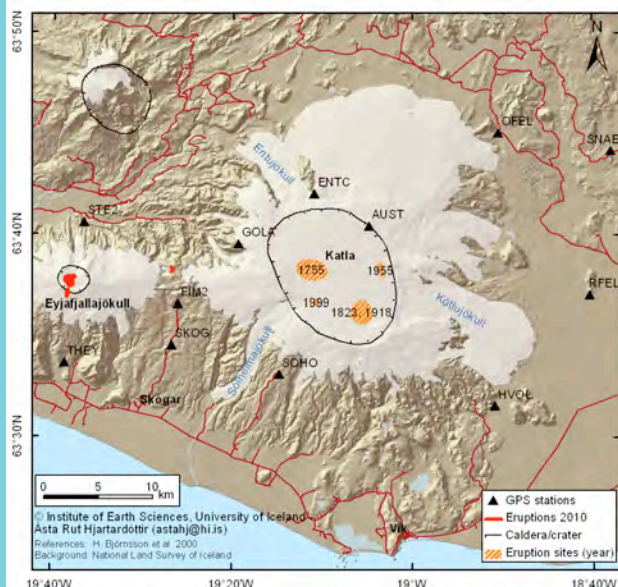
I Europa finns det två områden som studerats under lång tid: Island (och dess vulkaner) och vulkanen Etna på ön Si-

cilien i Italien. Faktum är att många aktiva vulkaner i världen har försetts med GNSS-stationsnät.

En annan viktig teknik för att kartlägga en vulkans föränderliga topografi är "Interferometric Synthetic Aperture Radar" (InSAR)), en bildgivande teknik. Fördelaktigen kalibreras InSAR-baserade rörelsekartor med GNSS vid stationspunkterna.

JORDSKRED är relativt vanliga geologiska händelser. De har hög rankning som naturkatastrofer på grund av mänskligt li-

dande och ekonomiska konsekvenser. Avskogning, minarelexploatering, nya bosättningar och infrastruktur som direkt konsekvens av en befolkningstillväxt, och en ökande frekvens av extrema väderhändelser, t.ex. i samband med klimatförändringar, kan leda till allvarigare och mer frekventa hot mot människors liv, hälsa och samhällets



Övervakning av vulkanen Katla på Island.

jordskred

infrastruktur i en nära framtid. Risken kan reduceras genom olika typer av motåtgärder, både strukturella och icke-strukturella. Dels kan man direkt påverka riskområdet för jordskred, dels skydda närliggande samhällen, dess infrastruktur och omgivning.

Motåtgärder har ändå ofta visats vara otillräckliga, speciellt i fall där områdets storlek, rörelser och jord- och lermassors strukturella egenskaper som gör dem svåra att stabilisera. I dessa fall finns det i princip två alternativ: Evakuering ur riskzonen, eller en noggrann kännedom av utvecklingen av hydrogeologiska instabiliteter med hjälp av ett övervakningssystem. Ett korrekt och tillförlitligt system för övervakning, är ett kraftfullt verktyg för att hantera potentiella nödsituationer.

ÖVERVAKNINGSSYSTEM för jordskred och vulkaner delar en rad aspekter. Ett nät av GNSS-mottagare installeras i och runt det farliga området. Skred kan vara av olika typer. Vissa är mer eller mindre i ständig rörelse. Andra inträffar plötsligt utan förvarning, och det är uppenbarligen den typ av händelse som kan medföra de allvarligaste typer av skador. Viktiga observerbara parametrar som kännetecknar ett jordskred är typen av jord och lera, och variationer i grundvattnivåer.

GNSS-observationer, rörelsekartering med InSAR och flygfoto­grammetri kompletterar de markbundna teknikerna, som även omfattar de klassiska geo-



Jordskred i Tessina i de östra italienska alperna 1992, var ett reallt hot mot byn Funes. Skredet var 3 km långt och upp till 500 m brett, och volymen skattades till cirka 7 miljoner m³.

Med tillstånd av CNR-IRPI, Padua, Italien

detiska metoderna med teodolit, vinkelgivare, och elektroniska avståndsmätare.

Exempel på befintliga GNSS-nät som installerats för att övervaka områden där det råder en hög risk för jordskred, finns i Dolomiterna i Italien, östra Pyrenéerna i Spanien, och San Juan Mountains i Colorado, USA.

Landhöjning efter

Den tjocka inlandsisen under den senaste istiden pressade jordskorpan nedåt med hundratals meter i vissa regioner. När isen smälte började jordskorpan att åter höja sig. Återhämtningen pågår fortfarande.

SEDAN 2,5 MILJONER ÅR tillbaka var stora områden i Nordamerika och norra Europa tidvis isbelagda. Avsmältningen upphörde för ungefär 9000 år sedan. Före avsmältningen var istäcket upp till fyra kilometer tjockt, vilket innebar att jordskorpan pressades nedåt med flera hundra meter. Den efterföljande landhöjningen, eller den postglaciala isostatiska anpassningen, pågår fortfarande, och illustreras av flygfotot nedan. Fotot visar kustlinjen vid en liten by på den svenska ostkusten. Flera sjöbodar, byggda i mitten av 1700-talet, ligger inte längre vid vattenbrynet. Var kustlinjen befinner sig bestäms av jordskorpans läge och havsnivån, och båda är föränderliga över tiden. Baserat på iakttagelser i själ-

va landhöjningsområdet framfördes på 1700-talet teorin att havsvattnet var på väg att försvinna, och vilken väg vattnet tog var föremål för en rad fantastiska teorier. Mer storskaliga observationer längs kusterna bidrog ungefär hundra år senare till den mer realistiska slutsatsen: Att jordskorpan fortfarande återhämtar sig efter den snabba—sett i en geologisk tidsskala—avsmältningen av ismassorna.

MÄTNING AV GEODETISKA positioner med GNSS-teknik vid väl definierade platser på jordskorpan, så kallade referensstationer, är en unik metod för att bestämma rörelsen i förhållande till jordens gravitationscentrum. Figuren på den högra sidan visar de resultat som erhållits



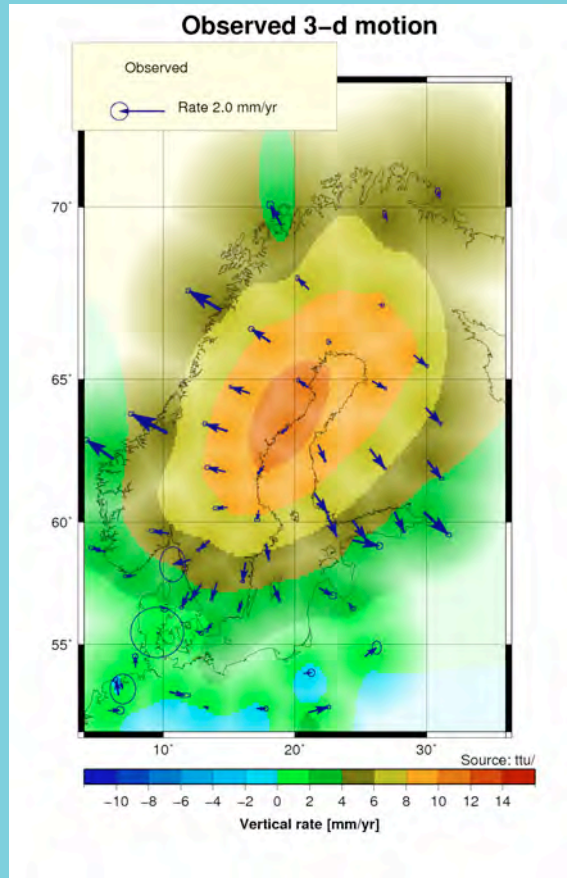
Bårhus, byggda i mitten av 1700-talet på Brämön, söder om Sundsvall, på Sveriges östkust. På grund av landhöjningen är nu husen långt ifrån strandkanten. © Lantmäteriet

r senaste istiden

Observerad landhöjning i Fennoskandien. Resultaten i bilden baseras på 14 år med GPS-data. Hastigheterna har skattats från dagliga positionsbestämningar. Landhöjningen är färgkodad och de horisontella rörelserna visas med pilar. Med tillstånd av H.-G. Scherneck, Chalmers

för jordskorpan återhämtning i Fennoskandien, d.v.s. regionen som omfattar den skandinaviska halvön, Finland, Karelen och Kola-halvön.

NOTERBART ÄR att om vi vet den fasta jordskorpan rörelser kan vi korrigera havsnivåmätningar och därmed dra slutsatser om pågående förändringar av havens volym i absoluta tal. De data som använts för att producera figuren består av 14 år av kontinuerligt insamlade GPS-data, där positioner skattats varje dygn för att slutligen beräkna de pågående rörelserna. Stationerna med de längsta mätserierna har en repeterbarhet för vertikala rörelserna på 0,2 millimeter per år. Det är också intressant att notera de horisontella rörel-



serna, som är riktade bort från centrum av landhöjningen.

Även om det är ett förväntat resultat, som kan förutses baserat på geofysiska modeller som kombinerar isens utbredning och avsmältning med jordskorpan och mantelns mekaniska egenskaper, var det först med GNSS-tekniken som dessa kunde detekteras och mätas.

Glaciärers och ha

Pågår det en global uppvärmning som smälter jordens glaciärer, och reducerar utbredningen av isen i Arktis? GNSS erbjuder en noggrann metod för att följa ismassors rörelser och förändringar.

STORA MÄNGDER AV jordens färskvatten finns i form av is. Glaciärernas och havs-isarnas rörelser är intressanta ur många aspekter för förståelse och modellering av jordens klimatsystem.

Drar glaciärer sig tillbaka? Minskar deras totala massa, och i så fall med vilken hastighet? Vad händer med isen i Arktis, d.v.s. både havsisen och den grönländska inlandsisen? Ismassornas volym

på Grönland uppgår till cirka 3 miljoner km^3 vilket skulle medföra att den globala havsnivån stiger med mer än 7 m, om hela ismassan smälter. Dessa frågor kan adresseras genom att använda GNSS som ett noggrant positioneringsverktyg.

För att studera dynamiken hos glaciärer med stora rörelser, har ett forsknings-projekt genomförts under somrarna 2006–2010 på Helheim-glaciären

Höger: Utplacering av en SATICE-boj. Med tillstånd av P. Elosgui, Jeonke Han, SATICE-projektet



Nedan: Installation av en GNSS-mottagare på glaciären Helheim på Grönland. En röd flagga placerades ut för att 50 dagare senare hitta stationen från helikoptern.

Med tillstånd av M. Nettles, L. Stearns, SERMI-projektet



havsisens rörelser

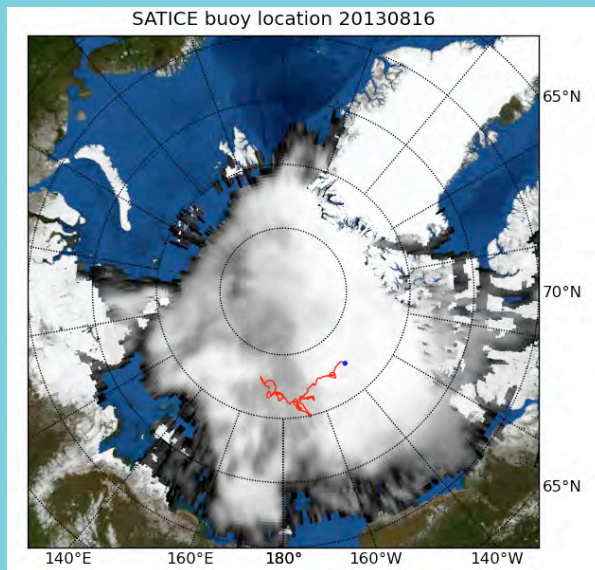
och Kangerdlugssuaq-glaciären, på sydvästra Grönland.

Totalt sett var närmare 100 GNSS-stationer utplacerade på glaciärerna under 5-årsperioden (se bild, föregående sida).

De skattade GNSS-positionerna avslöjade töjningseffekter hos glaciärer som rörde sig snabbast, med hastigheter som kan öka från cirka 10 m om dagen längre upp på glaciären, till ungefär tre gånger snabbare vid ändpunkten, där glaciären kalvar stora isberg som sedan fyller fjorden.

Ett annat resultat var att det upptäcktes steglignande förändringar i hastighet, som sammanföll med "glaciär-jordbävningar", motsvarande kalvningshändelser. Dessa observerades även som tsunamivågor i fjorden, och registrerades av en närliggande seismometer.

ETT EXEMPEL PÅ forskning rörande havsisens rörelser är SATICE-projektet. Det är det första experiment i Arktis där positionerna bestäms med hög noggrannhet och hög uppdateringsfrekvens. Projektet använder bojar utrustade med sensorer för mätning av olika fysikaliska parametrar, såsom luftens och vattnets tempera-



Rörelserna för en SATICE-boj under ett år, från augusti 2012 till augusti 2013.

Med tillstånd av P. Elosegui, M. Olsson, SATICE-projektet

tur, lufttrycket vid havsnivån, relativ fuktighet, snödjup och istjocklek.

Bojarna är också utrustade med kameror och GNSS-utrustning. Installationen av en boj på isen visas i den övre bilden på föregående sida. Varje boj samlar kontinuerligt in GNSS-data för 3-dimensionell positionering. Alla data skickas via en satellitlänk till en central dator, nästan i realtid, där uppgifterna behandlas för att skatta bojarnas positioner. Tidsvariationerna används för att studera, till exempel, hur havsisen driver (se bilden ovan), isdeformation, sprickbildningar, tjockleksvariationer, tidvatneneffekter och övriga havsrörelser.

Följning av fåglar

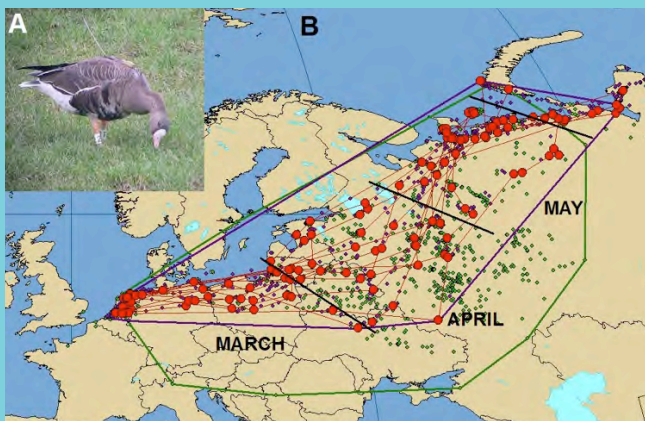
Det saknas kunskap om hur djur flyttar. Studier av deras livscykel kan hjälpa oss att förstå och förutsäga hur smittsamma sjukdomar, som bärs av flyttande arter, kan spridas över världen.

FÖLJNING AV VILDA djur är en svår uppgift. Exempelvis så häckar europeiska storkar i norra Europa, och tillbringar vintern i Afrika, vilket betyder att de rör sig 10.000 km varje år. Att följa dessa djurs rörelser kräver uppfinningsrikedom, uthållighet och stora investeringar i utrustning och tid. Tidigare genomfördes spårning främst för att studera migration, förekomst och val av habitat. Men med nyligen utvecklad spårnings-utrustning baserad på GNSS-teknik, kan även mer komplexa frågeställningar studeras.

Det finns flera skäl för att spåra flyttande arter. Den mest uppenbara är att bevara arter som har överenskommit i konventionen rörande skydd av vilda djur. Å andra sidan, kan vilda arter

bära sjukdomar, som fågelinfluensa eller svinpest. Detta påverkar naturligtvis den globala spridningen av sjukdomar, och kan utlösa ångest hos allmänhet och politiska beslutsfattare. Att kunna spåra djuren gör att deras beteende kan förstås bättre. Baserat på rörelsen hos värd-djuren, kan vi förstå och förutsäga hur sjukdomar kan spridas över världen.

FLERA FORSKNINGSPROJEKT använder och utvecklar GNSS-utrustning och tillhörande analysverktyg för studier av förflyttning av djurs rörelser och för mer sofistikerad forskning rörande vilda och tama djurs beteende. I en studie förseddes 30 bläsgäss med GNSS-mottagare och sändare i speciella kragar under perioden 2006–2008. Sändarna skickade GNSS-positioner till satelliter varannan



Följningar av bläsgås under 2006–2008. Röda prickar representerar GNSS-positioner, medan gröna punkter är andra observationer.

Med tillstånd av www.blessgans.de

ar och däggdjur



Tracking of a domestic cow with a Lotek collar in the E-track project.

Med tillstånd av www.project-e-track.eu

dag. Under de tre åren har 13 kompletta migrationsspår dokumenterats, vilket illustreras i bilden på vänstersidan.

E-track-projektet använder sig av en annan typ av GNSS-kragar och det så kallade "European Geostationary Navigation Overlay Service" (EGNOS) som ger högre noggrannhet för de skattade positionerna än konventionell GNSS-positionering. Detta kombineras med snabb datainsamling i syfte att uppnå både hög upplösning i både tid och rum, vilket ofta erfordras vid försök att spåra djurs beteende på fältet. Under 2012 utvecklades så kallade Lotek-kragar, som använder EGNOS-korrekationer, som sedan testades på ett öppet fält med nio kor, se bilden ovan.

De kragar som utvecklades var inställda för att ge en ny position varje minut, eller en gång varannan sekund. Observationer av kornas beteende utfördes samtidigt för att korrelera rörelsemönster med beteendemönster. Analysen visade att boskapens beteende framgångsrikt

kunde förutsägas på grundval av positionsdata som erhållits med GNSS-kragarna, och att hastigheter, och rörelsevinklar, kan användas som indikatorer för att förutsäga beteendet.

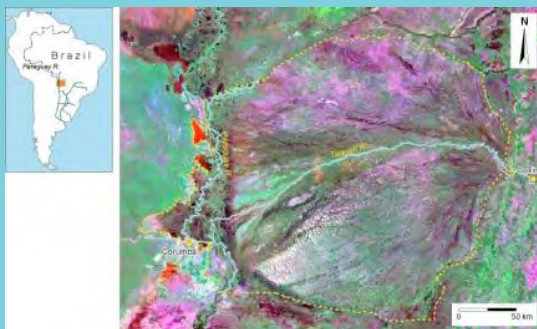
DET FINNS MÅNGA ANDRA tillämpningar för tekniken, eller vidareutvecklingar av tekniken. Till exempel kan tekniken vara till hjälp med att bekämpa tjuvjakt genom att möjliggöra spårning av hotade arter, och studera deras rörelser i riskområden för tjuvjakt. Ytterligare tillämpningar inom andra områden kan ha ännu större samhällseffekter, som i djurhanteringen i jordbruket. Det kan också ge nya möjligheter för folksamlingar i festivaler, eller fotbollsmatcher, och för effektivare masstransporter genom förbättrad logistik på flygplatser och tågstationer. Värt att notera är dock att för många samhällseliga tillämpningar, måste också nya juridiska och etiska aspekter studeras och utvecklas samtidigt.

Digital höjdmodell

Brasiliens våtmarker i Pantanal är ett världsarv. Deras rika ekosystem är beroende av översvämningar av flera floder. För att förstå störningar som sker, är det nödvändigt med kunskap om vattenflödet i regionen.

PANTANAL ÄR den största våtmarken i världen som inte är beskogad. Ungefär åttio procent av Pantanalns flodslätter är under vatten under regnperioden, vilket resulterar i en häpnadsväckande biologisk mångfald av vattenväxter och en extremt varierande fauna. Pantanal är omgivet av högplatån i Cerrado, där det för närvarande bedrivs ett intensivt jordbruk.

Alla floder i Pantanal har sitt ursprung i Cerrado. Störningar uppströms har konsekvenser nedströms. Kunskap om hur systemet fungerar kan förebygga problem nedströms. För att kunna skilja mellan naturliga flodprocesser och externa effekter orsakade



Pantanal-området. Med tillstånd av R. Jongman, Alterra, Wageningen UR

av människan, måste man förstå vad som påverkar vattenflödena och varför.

Vattenflödena i floderna och på land beror på höjdskillnaderna. Därför behövs en digital höjdmodell (DEM) — en tre-dimensionell representation av terrängen. Men hur gör man en topografisk

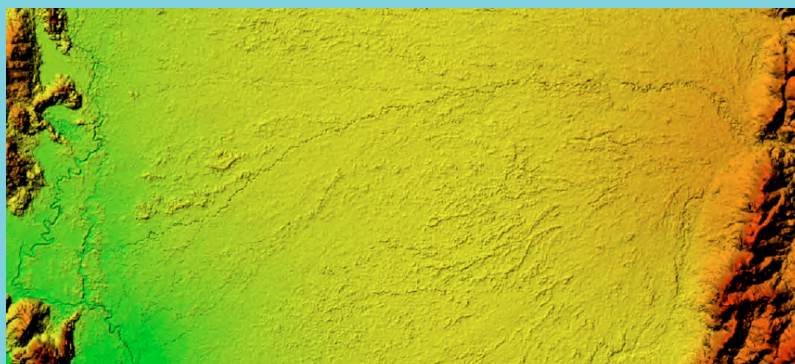


Pantanal är ett naturvärldsarv, den största icke skogsbeväxade våtmarken i världen — med en storlek motsvarande Storbritannien. Det är ett hem för alligatorer, pumor, jaguarer, jätteuttrar och hundratals fiskarter, många av dem migrerar.

Med tillstånd av R. Jongman, Alterra, Wageningen UR

II för våtmarker

Med tillstånd av R. Jongman,
Alterra, Wageningen UR



Den slutliga digitala höjdmodellen för Pantanal.

modell av ett landskap som är platt som en pannkaka och dessutom glest befolkat? Eller, hur kan vi modellera systemet och mäta förändringar i flodstränderna med en noggrannhet i höjd på centimeter-nivå, över en sträcka på 500 km?

ETT PROJEKT FÖR ATT skapa en digital höjdmodell av Pantanal genomfördes under 2003 och 2004. Fjärranalysbilder tagna från satellit i olika internationella och nationella projekt var redan tillgängliga. Preliminära höjddata erhöles till exempel från GTOPO30, en digital höjdmodell av jorden, från rymdfärjans "Shuttle Radar Topographic Mission" (SRTM). Den vertikala absoluta mätosäkerheten var dock ibland så låg som 16 m (90 % tillförlitlighet). Därför behövde dessa resultat kalibreras under en fältkampanj med användande av GNSS, så att korrekationer erhöles för SRTM-modellen. Det var dock inte möjligt att använda basstationer och rörliga stationer för tillräckligt noggranna

realtidsmätningar. Därför användes av efterbearbetningstjänst för GPS-data: "Scripps Orbit och Permanent Array Center". Resultatets kvalitet beror till stor del på tillgången och närheten till de närmaste tre basstationerna, samt tillgången på noggranna satellitbanor och klockkorrekationer. För validering användes två välbestämda geodetiska punkter—en i Enschede, Nederländerna, och en i Corumbá, Brasilien.

När projektet genomfördes, var GPS det enda tillgängliga systemet för satellitpositionering. Med ytterligare system, t.ex. Galileo, kommer fler signaler att kunna användas, vilket resulterar i en ännu högre noggrannhet vid bestämning av tredimensionella positioner. Det innebär att tekniken kommer att bli ännu mer attraktiv för forskningen. Detta erbjuder förbättrade möjligheter att planera markanvändning, även om kvalitetssäkring och kvalitetskontroll fortfarande kommer att behövas.



Infrastruktur för tidshållning

Noggrann tid är oundgänglig i dagens globaliserade och digitaliserade värld. Många högteknologiska tillämpningar, inklusive jordobservationer, skulle knappast vara möjliga utan den extremt noggranna tid som tillhandahålls av GNSS.

BEHOVET AV TID uppkommer när händelser skall dateras. Förr i tiden var årstider, tid för sådd och skörd, födelser, krigslag, katastrofer och himlakropparnas positioner på himlavalvet händelser som reglerade civilisationen. Idag är detta beroende mycket större vilket har drivit fram häpnadsväckande noggrannhet vad gäller tidshållning. Protokoll för tidsöverföring genom datornätverk, flygledning, börsen, rymdnavigering, satellitsystem, mobiltelefoner och säkerhetssystem gör oss tidsberoende idag.

Användningen av GNSS-mottagare för tidsjämförelser, infördes på 1980-ta-

let, och var en stor förbättring för att skapa och sprida tidsskalor. Metoden består av att använda den signal som sänds ut från GNSS-satelliterna, vilken inkluderar tids- och positionsinformation. Det kallas en en-vägs-metod, när signalen sänds från en satellit och mottages av utrustning installerad i ett tidslaboratorium. GNSS-mottagare utvecklats och kommersialiserats för att användas specifikt för tid- och frekvensöverföring.

Som ett resultat av hårdvaruutveckling av GNSS-mottagare och förbättrad databehandling och modellering, har osäkerheten i klocksynkronisering, via

EXEMPEL PÅ TIDSHÅLLNING INOM TELEKOMMUNIKATION

- Telefonnät använder GNSS-tid som en primär referensklocka.
- Cellulära telefonsystem använder mikrosekund för att synkronisera cellplatser för att möjliggöra sömlös växling.
- Kanalåtkomstmetoden CDMA kräver mikro timing och använder GNSS för att samordna tid mellan basstationer.
- Network Time Protocol (NTP) används för att synkronisera datorer till milli- och andra nivån och finns i alla operativsystem.
- IP-baserade tillämpningar som strömmande ljud och video behöver exakt tid.
- Precise Timing-protokollet kan ge undermikro timing över en anläggning.

GNSS-mottagare, reducerats från ett par hundra nanosekunder i början av 1980-talet, till cirka en nanosekund idag.

TELEKOMMUNIKATIONSINDUSTRIEN

är en stor användare av GNSS-tid för att stödja en mängd olika tillämpningar, se faktaruta. De flesta av de cirka 500.000 basstationer i drift runt om i världen är försedda med inbyggd GNSS-utrustning.

Noggrann tid är viktigt också vid överföring av elkraft—fasen för växel-strömmen måste synkroniseras i elnätet eftersom stora färfel kan leda till skador och kraftavbrott, och redan små färfelaktigheter minskar effektiviteten vid kraftöverföringen. Historiskt har fäfsynkronisering åstadkommits genom att justera fäsen hos lokala kraftverk, för att matcha fäsen i elnätet.

GNSS-baserad utrustning för fäfsynkronisering börjar nu att installeras globalt. Dess högre noggrannhet i tids-hållningen ger högre effektivitet för elkraftöverföringen, färre strömbavbrott och bättre och snabbare identifiering av uppkomna fel. Identifiering av fel i kraftledningar åstadkommes ofta med hjälp av GNSS-tid, för att mäta avståndet till ett avbrott i ledningen. Detta medför att tiden för att hitta avbrottet, och att återställa tjänsten, reduceras avsevärt.

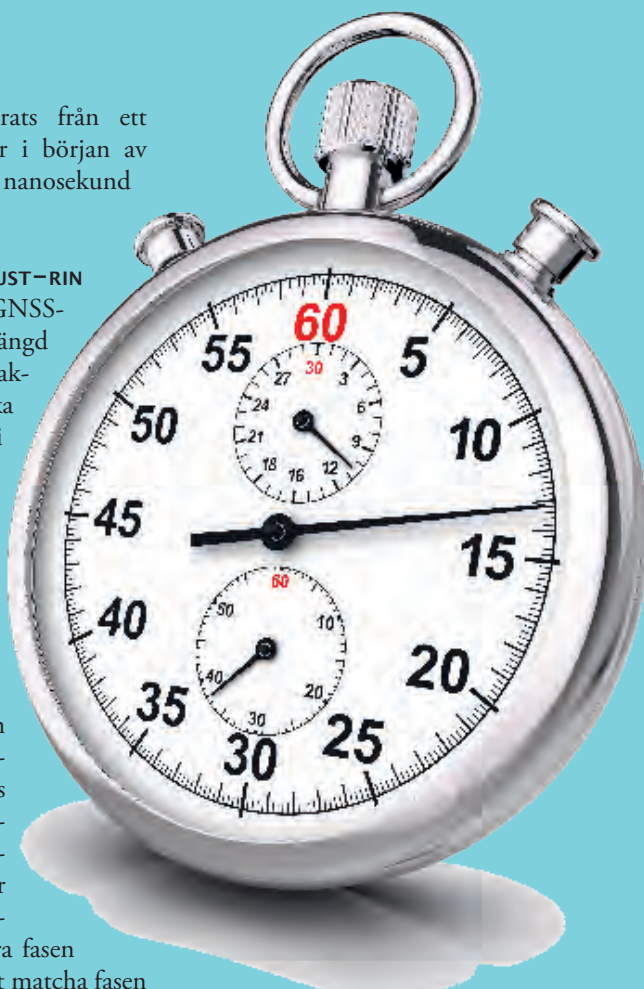


Foto: Shutterstock

I finansvärlden, genomförs miljarder penningtransaktioner per dag. I och med framväxten av en helt automatiserad datorhandel, är noggrann tids-hållning extremt viktigt. En felaktig tidsstämpel på en transaktion, kan leda till att en otillbörlig fördel vunnits, eller medföra en inkomstförlust. Idag är tidskravet på spårbarhet i storleksordningen en sekund, och inom några år kommer en noggrannhet på millisekunds-nivå att krävas, för att stödja datorbaserad handel med hög hastighet.

Jonosfären

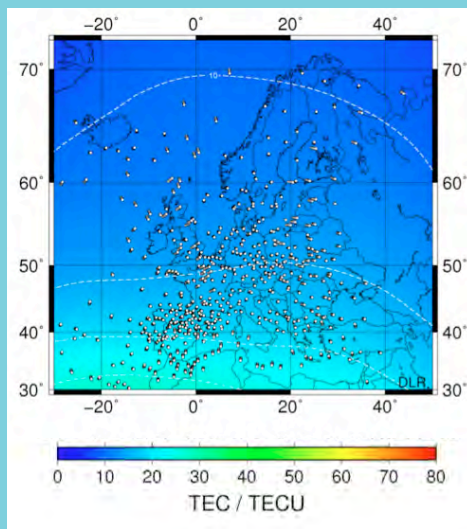
Dåligt väder i jonosfären kan orsaka allvarliga störningar i kommunikations-, navigations- och energisystem. GNSS hjälper forskare att förstå de processer som sker i jonosfären.

FÖRHÅLLANDENA PÅ solen, i solvinden, i magnetosfären, och i jonosfären, kan påverka vårt dagliga liv genom de effekter de har på satelliter, kommunikations- och navigationssystem, och vår energidistribution. Forskare studerar nu rymdväder med många olika tekniker, för att förstå mer om de fysikaliska och kemiska processer som äger rum i den övre atmosfären och där utanför. Ett sådant hjälpmedel är användningen av GNSS-signaler.

Satellitensignalerna färdas genom jonosfären på väg till mottagarna på jordytan. De fria elektronerna påverkar utbred-

ningen av signalerna, och ändrar deras hastighet och utbredningsriktning. Genom att bearbeta data från GNSS-mottagare vid två olika signalfrekvenser är det möjligt att beräkna hur många elektroner signalen påträffar längs vägen. Denna parameter kallas det totala elektroninnehållet (TEC = Total Electron Content), och ger information om jonosfärsaktiviteten. Den definieras som antalet elektroner i en vertikal kolumn med tvärsnittsarean en kvadratmeter.

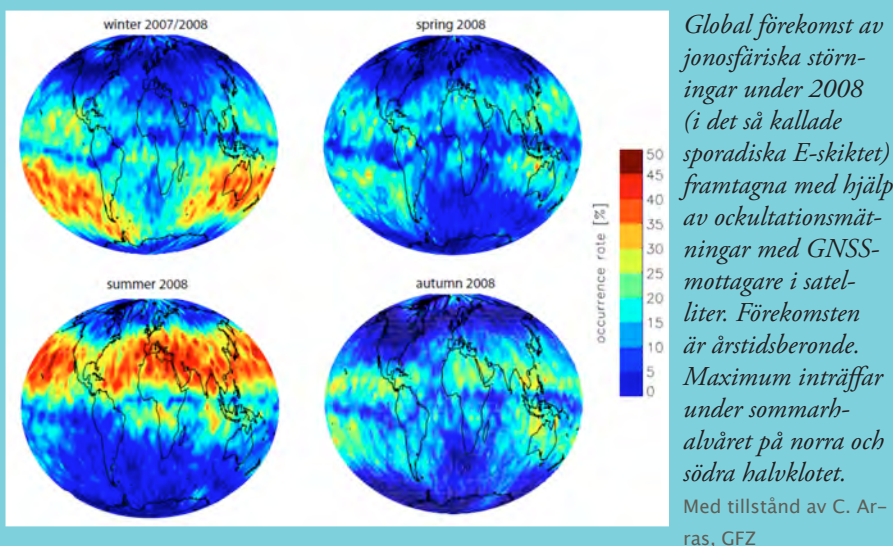
Ett nät av markbundna kan då ge TEC över ett område, se bilden nedan. TEC varierar normalt långsamt mellan dag och natt. TEC ökar på solsidan, då atmosfären joniseras av solens ultraviolettera strålning, och TEC minskar på nattsidan, genom kemisk rekombination. Men precis som i den lägre atmosfären, kan det storma i jonosfären. Långsamma variationer i



Det totala elektroninnehållet (TEC) över Europa beräknat från markbase-rade GNSS-observationer. Resultatet presenteras i TEC-enheter (1 TEC = 10^{16} elektroner/m²). De vita cirkelarna visar positionen där signalen från GNSS-satelliten till markstationen går igenom jonosfären på höjden 400 km.

Med tillstånd av N. Jakowski, DLR (länk på sid. 31)

dynamik



det totala elektroninnehållet kan ersättas av snabba fluktuationer, och vissa regioner kan uppleva betydligt högre eller lägre TEC-värden än normalt. Idag används GNSS-data flitigt, för att studera solstormar, och för att öka förståelsen av den kopplingen mellan solen och jorden som sker i jonosfären.

GNSS-DATA ÄR KRAFTFULLA för att studera rymdväderfenomen när resultaten bearbetas för att studera jonosfärens variationer i tid och rum. Fortsatt övervakning av rymdvädet med hjälp av GNSS kommer att ytterligare öka vår förståelse av de dynamiska processer som äger rum i jonosfären och dess effekter på kommunikation och navigering, elektriska kraftnät och andra tekniska system.

Ett ämne relaterat till GNSS-observa-

tioner och jordbävningar är möjligheten att det sker förändringar i atmosfären i området ovanför en jordbävning. Det har hävdats av vissa forskare, att både en ökad infraröd strålning, på grund av elektriska fält orsakade av ett utflöde av radon, samt ovanligt hög TEC-variabilitet har observerats *innan* stora jordbävningar, emedan andra inte anser att bevisen för detta håller. Mindre kontroversiellt är att TEC-variationer har observerats *efter* en stor jordbävning. Dessa antas vara orsakade av akustiska vågor och gravitationssvågor, som utbreder sig från jordytan och uppåt i atmosfären. Självklart är att om variationer i jonosfären skulle kunna användas för att förutsäga jordbävningar, skulle det vara till stor nytta. För närvarande kan vi bara dra slutsatsen, att det behövs mer forskning.

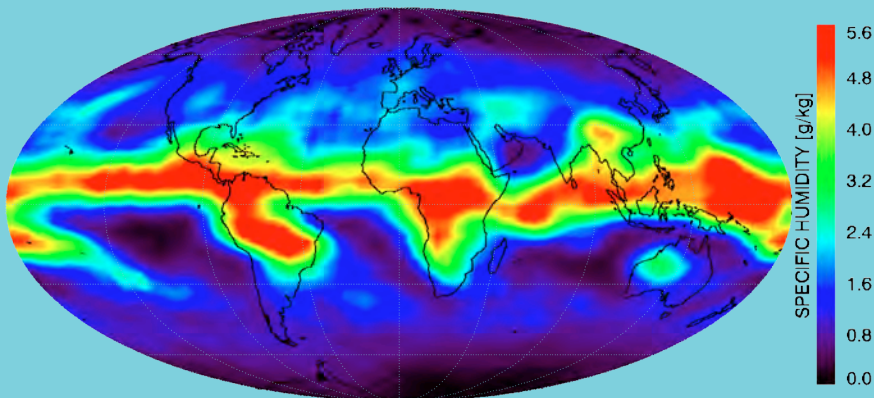
Väder- prognoser

Väderprognoser fyller en allt viktigare funktion i samhället, och det pågår ett ständigt arbete med att förbättra deras kvalitet. Relevansen och kvalitén på de meteorologiska observationerna, som prognoserna baseras på, är av fundamental betydelse.

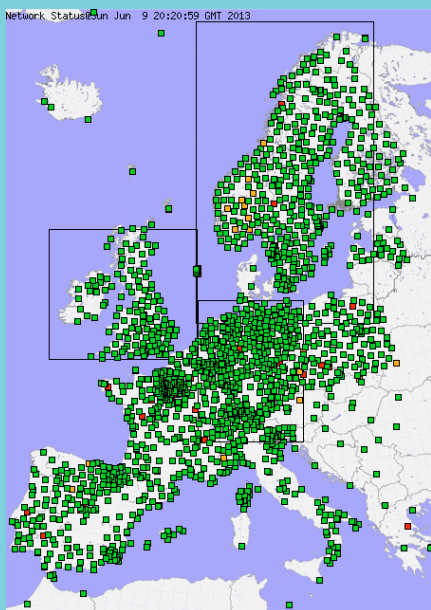
GNSS-SIGNALER påverkas på sin väg genom jordens "neutrala" atmosfär, vilket resulterar i en fördröjning av deras ankomsttid, jämfört med om utbredningen skett i vakuum. Fördröjningens storlek beror huvudsakligen på luftens tryck, temperatur och fuktighet. Ockultationsmätningar med GNSS-signaler ger temperaturens variationer med höjden, och tillsammans med andra data också vattenångans höjdprofil. Med hjälp av markbaserade observationsnät kan man bestämma mängden vattenånga i atmosfären ovanför varje GNSS-mottagare.

Det lämpligaste området för studier av atmosfärens fuktighet med ockultationsteknik är i mitten av troposfären. Detta beror på att kvalitén på data är sämre långt ner i troposfären, där dämpningen av signalen är större, särskilt i tropikerna. I den översta delen av troposfären är det mycket små mängder av vattenånga, vilket betyder att effekten på GNSS-signalen blir för liten för att detekteras.

Vertikala profiler av luftfuktighet från ockultationsmätningar ger unika resultat



Globala månadsmedelvärden för mängden vattenånga vid trycknivån 600 hPa, vilket motsvarar en höjd av cirka 5 km, för oktober 2006. Resultaten är baserade på ockultationsmätningar med GNSS. Med tillstånd av S. Heise, GFZ

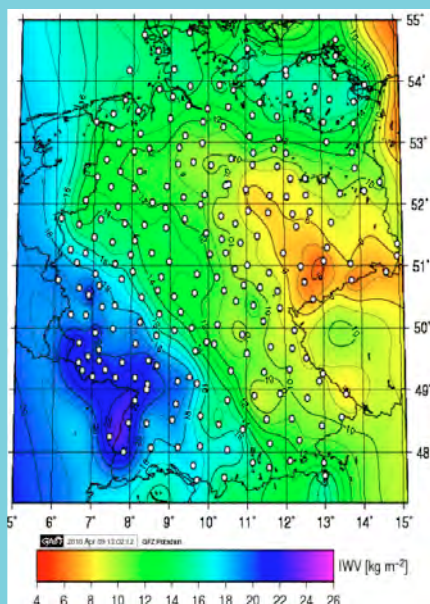


Det europeiska observationsnätet med GNSS-stationer för väderprognoser. Med tillstånd av E-GVAP (länk på sid. 31)

för att kartlägga vattenångans fördelning globalt. Bilden på föregående sida visar ett exempel på detta.

ETT ANNAT EXEMPEL PÅ ockultationsmätningar är temperaturprofiler som beskrivs på nästa uppslag rörande klimatstudier. Med tanke på att databehandlingen kan göras i nära realtid och att observationerna är globala har det visats att dessa temperaturobservationer har medfört signifikanta förbättringar i operationella väderprognoser.

Idén att även använda markbaserade GNSS-mottagare för att mäta vattenånga i atmosfären var, liksom många andra vetenskapliga upptäckter, en bieffekt. Vid mätningar av rörelser i jordskorpan, blev forskare experter på att beräkna och ta hänsyn till inverkan av atmosfären som



Mängden vattenånga över Tyskland mätt med markbaserade GNSS-stationer. Med tillstånd av G. Dick, GFZ, Potsdam, Tyskland

introducerar en fördröjning av ankomsttiden för den mottagna signalen. Den huvudsakliga orsaken till variationerna i denna fördröjning är mängden vattenånga längs signalens utbredningsväg.

Sedan 2005 driver europeiska vädertjänster projektet E-GVAP, där många organisationer samarbetar med datainsamling och dataanalys. Det nuvarande observationsnätet, som levererar data i nära realtid, vanligtvis inom 2 timmar, visas ovanför till vänster. Alla resultat är tillgängliga för alla deltagande vädertjänster för att förbättra regionala väderprognoser. Bilden ovan till höger är framställd med GNSS-data, och visar mängden vattenånga över Tyskland. Dessa rekonstruktioner bidrar till studier av olika atmosfäriska processer, såsom konvektion och nederbörd.

Klimat-forskning

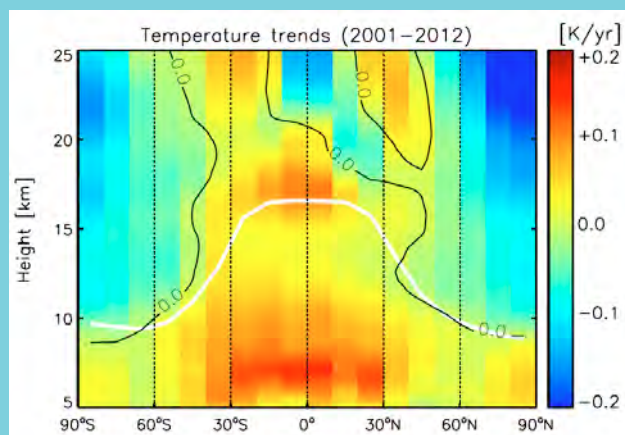
Trender i temperaturen är naturligtvis av största vikt för att studera frågan om global uppvärmning. Under den senaste tiden har GNSS-resultat visats ha potential att bidra med viktiga data för klimatövervakning.

GLOBALA TRENDER ÄR en stor fråga i debatten rörande global uppvärmning, dess möjliga orsaker, och scenarier för framtiden. Utan noggranna mätningar av vad som faktiskt händer, så blir frågor rörande framtiden svåra. Under de senaste åren har flera studier visat på möjligheter att använda såväl mark- som rymdbaserade GNSS-observationer för klimatövervakning.

Rymdbaserade ockultationsmätningar kan användas för att bestämma noggranna och detaljerade mätningar över temperaturens variationer i den övre troposfären, och den nedre stratosfären.

Bilden nedan visar en uppvärmning av den övre troposfären samtidigt med en nedkylning av den nedre stratosfären. Styrkan med ockultationstekniken för klimatforskning ligger i förmågan att generera stabila referensdata för temperatur och vattenånga, som nämns i väderprognosavsnittet på uppslaget innan. Sådana jämförelsedata kan också fungera som referens för att verifiera andra typer av klimatobservationer och på det sättet kan datamängder erhållas som täcker längre tidsperioder.

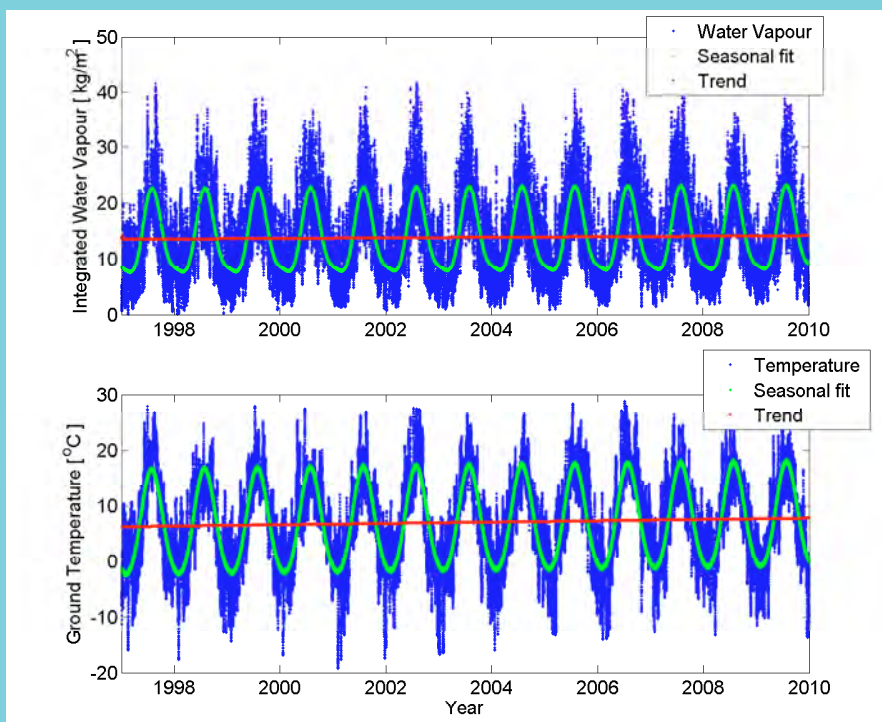
Markbaserade stationer med GNSS-mottagare mäter vattenångeinnehållet i



Temperaturtrender i den övre troposfären och den nedre stratosfären (5–25 km) för perioden 2001–2012. Höjdupplösningen är 100 m och upplösningen i latitud är 10°. Den vita linjen visar medelvärdet för gränsen mellan troposfär och stratosfär (tropopausen). Med tillstånd av T. Schmidt, GFZ

atmosfären över antennen. Noggranna mätningar av vattenånga i atmosfären är i allmänhet svårt och dyrt att genomföra med hög tids- och rumsupplösning över långa tidsperioder. GNSS-tekniken är därför mycket lovande. Den rumsliga upplösningen kommer att fortsätta att förbättras, då antalet kontinuerligt aktiva mottagare hela tiden ökar i antal. Många länder har idag nät med typiska baslinjelängder på 50–200 km. Ett exempel på en tidsserie av vattenånga visas nedan.

Slutligen måste det betonas att klimatet beskrivs av medelvärden och trender av atmosfärsparametrar under lång tid. Vädret är som alla vet mycket varierande, och i klimatforskningen är det praxis att medelvärden baseras på 30 års data. Det innebär att GNSS-tekniken ännu inte samlat in tillräckligt med data för att beräkna den första datapunkten. Å andra sidan, så är resultaten hittills mycket lovande, i den meningen att de verkar ge stabila tidsserier, utan stora systematiska mätfel, under mycket lång tid.



Atmosfärens vattenångeinnehåll och marktemperatur mätt under 14 år vid GNSS-stationen Onsala, Sverige. De blå punkterna är medelvärden under en timma. Anpassning av en linjär trend (röda linjer) och årstidsvariationer (gröna linjer) ger trenderna 0,5 kg/m²/decennium för vattenångeinnehållet och 1,1 °C/decennium, för temperaturen. Med tillstånd av T. Ning, Chalmers



Snödjup, vegetation och markfuktighet

För de flesta GNSS-tillämpningar är reflekterade signaler icke önskvärda och ett problem eftersom de stör mätningarna. Detta gäller dock inte alltid, då de kan användas för att mäta snödjup, vegetation och markfuktighet.

MAJORITETEN AV ALLA markbaserade GNSS-nät är utformade för att minimera effekten av möjliga reflekterade signaler till mottagarantennen. Detta motiveras av en önskan att nå högsta möjliga noggrannhet för mätning av tredimensionella positioner och atmosfärs effekter, t.ex. mängden vattenånga över platsen.

Ändå kommer några reflektioner alltid att vara närvarande, och för vissa

tillämpningar är det möjligt att optimera installationen för att erhålla förmånliga reflektioner från markytan. Målet är att utnyttja dessa reflektioner för att härleda parametrar så som snödjup, markfuktighet, och utvecklingen av vegetationen.

Även om sådana reflektionsgeometrier ofta är mer komplicerade att beskriva teoretiskt, jämfört med reflektioner i havet och i ytan på insjöar (se nästa två sidor), har det visat sig att information om snödjup kan erhållas. Den traditionella metoden för att mäta snödjup är genom att sätta mätpinnar i snön, vilket är ganska tidskrävande. Därför, om snödjupet kan fås som en biprodukt från många redan befintliga GNSS-stationer, kommer mycket ny information om vattnets kretslöpp att erhållas. Därmed kan t.ex. mer tillförlitliga prognoser för vattenförsörj-

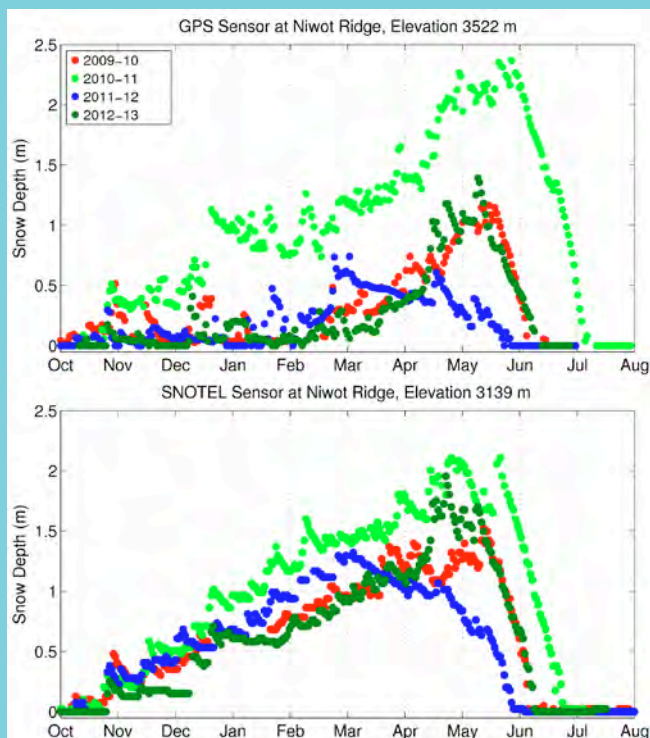


En GNSS-station speciellt etablerad för att studera snödjup vid Niwot Ridge i närheten av Boulder, Colorado, USA.

Med tillstånd av K. Larson, Univ. of Colorado

Mätningar av snödjup vid Niwot Ridge med hjälp av GPS (top) och en närbelägen plats med en traditionell mätmetod (SNOTEL) under fyra på varandra följande vintrar.

Med tillstånd av K. Larsson, Univ. of Colorado



ningen göras. Ett exempel från en plats nära Boulder, Colorado, visas i bilderna till vänster.

EN STUDIE RÖRANDE möjligheterna att inhämta information om utvecklingen av vegetation och markfuktighet gjordes under en mätkampanj från mars till september 2010, och därmed inkludera en hel växtsäsong, nära Florens i Italien. Korrelationer mellan olika reflektionskoefficienter för olika kombinationer av signalpolarisationer, sågs för både växternas vattenhalt och jordens fukthalt. Slutsatsen var att reflekterade GNSS-signaler kan användas för att studera fuktigheten i de översta centimetrarna i marken, och för att övervaka utvecklingen av vegetationen under växtsäsongen.



En GNSS-installation för mätning av vegetation och markfuktighet.

Med tillstånd av A. Egido, Starlab

Vattennivåer i hav

Översvämningar på grund av en stigande havsnivå är ett hot för miljontals människor som bor i låglänta kustområden. Övervakning och en ökad förståelse för lokala variationer hos en stigande havsnivå är av fundamental betydelse för invånarnas säkerhet i dessa områden.

EN GLOBAL UPPVÄRMNING påverkar havsnivån genom att stora ismassor kan smälta, och genom att havens volym utvidgas med vattnets temperatur. Detta kommer att få konsekvenser för människorna och samhället. Det förutspås att mer än 300 miljoner människor i kustnära och låglänta områden kommer att påverkas direkt av översvämningar från havsnivån inom en hundraårsperiod. Ett annan mätetal är att mer än 50 % av världens befolkning bor inom 60 km från kusten.



Övervakning och en ökad förståelse för hur lokala hydrodynamiska och meteorologiska förhållanden påverkas av en global höjning av havsnivån är därför avgörande för säkerheten för befolkningen i dessa områden.

Det traditionella sättet att observera havsytan är med mareografer, vilket resulterar i värden för havsnivån relativt den lokala kustlinjen. Jordskorpan är dock i kontinuerlig rörelse, och för att fullt ut förstå förändringsprocesser i havsnivån, är det nödvändigt med mätningar av havsnivån i förhållande till jordens tyngdpunkt. Med GNSS-observationer kan man relatera den lokalt uppmätta havsnivån och den lokala markytans höjd till jordens masscentrum.

OLIKA TEKNIKER existerar. Den minst kostsamma är att använda en enda installation i direkt anslutning till havet, som

En experimentstation för utvärdering av noggrannheten hos GNSS-observationer av havsnivån. Stationen består av två antenner, en uppåttittande för direkta signaler, och en nedåttittande för reflekterade signaler. Antennernas höjd över havet kan ändras för att studera olika geometrier.

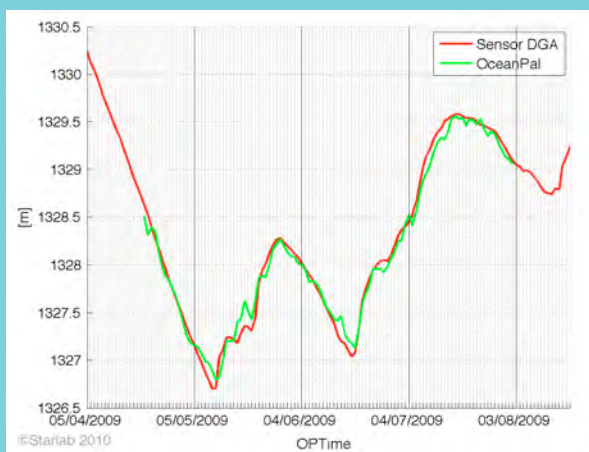
Med tillstånd av G. Elgered, Chalmers.

av och sjöar

tar emot GNSS-signaler som reflekterats i vattenytan. Från observerade variationer i signal-till-brus-förhållandet för signalen från en specifik GNSS-satellit (orsakad av interaktionen mellan den direkta och den reflekterade signalen), är det möjligt att beräkna det vertikala avståndet till havsytan. Tidsupplösningen med denna teknik är begränsad till cirka en halvtimma, beroende på geometrin hos installationen — synligheten av det öppna havet sett från GNSS-antennen — och antalet GNSS-satelliter som används.

Tidsupplösningen kan förbättras om två separata antenner används, med mottagare som följer fasen för GNSS-signalen. Denna typ av installationer gör det möjligt att beräkna avståndet till havsytan med en traditionell geodetisk dataanalys. En sådan installation visas i bilden på sidan till vänster.

OBSERVATIONER MED ett annat system, som kallas OceanPal®, har gjorts vid Laja sjön, i Bio-Bio-regionen i Chile under 2008. Dessa resultat visas i diagrammet ovan tillsammans med oberoende mätningar av den chilenska Water Manage-



GNSS-mätningar (OceanPal®) av vattenståndet i sjön Laja i Chile, från april till augusti 2008. Resultaten jämförs med oberoende traditionella mätningar utförda av den Chilenska vattenvårdsmyndigheten, Dirección General de Aguas (DGA). Med tillstånd av A. Egido, Starlab

ment Agency (DGA). Nivån på sjön har sitt maximum under sommaren, efter smältsäsongen. Under denna tid var överensstämmelsen mellan de två mätmetoderna bättre än 5 cm.

Tillämpningen att använda GNSS för mätningar av vattennivån i hav och sjöar är ganska ny. De flesta av de resultat som hittills erhållits använder enbart GPS-data. Det förväntas att noggrannheten förbättras väsentligt, när även signaler från GLONASS- och Galileo-satelliter används, eftersom det kommer att innebära fler reflekterade signaler och gynnsammare observationsgeometrier.



Referenser

Vetenskapliga publikationer

Positionering och tid

Hoechner, A., et al. (2013) Instant tsunami early warning based on real time GPS – Tohoku 2011 case study, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1285–1292, doi: 10.5194/nhess-13-1285-2013.

Freymueller, J.T. et al. (2010) Changes in the magma system during the 2008 eruption of Okmok volcano, Alaska, based on GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 115, B12415, doi:10.1029/2010JB007716.

Lidberg, M. et al. (2010) Recent results based on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST, *J. Geodyn.* 50 (1), 8–18.

Nettles, M., et al. (2008) Step-wise changes in glacier flow speed coincide with calving and glacier earthquakes at Helheim Glacier, Greenland, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24503, doi:10.1029/2008GL036127.

Schofield, G., et al. (2007) Novel GPS tracking of sea turtles as a tool for conservation management, *J. Exp. Marine Biol. Ecology*, 347, 58–68, doi:10.1016/j.jembe.2007.03.009.

Jongman, R., et al. (2006) Pantanal-Taquari: tools for decision making in integrated water management, Alterra report 1295, available from www.alterra.wur.nl.

Lahaye, F., et al. (2011) GNSS geodetic techniques for time and frequency transfer applications, *Adv. Space Res.*, 47, 253–264. doi: 10.1016/j.asr.2010.05.032

Atmosfärsmätningar

Arras, C. (2010) A global survey of sporadic E layers based on GPS radio occultations by CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3 / COSMIC. *Scientific Tech. Rep.*, 10/09, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ.

Jakowski, N., et al. (2011) Total electron content models and their use in ionosphere monitoring, *Radio Sci.*, 46, RS0D18, doi:10.1029/2010RS004620

Schmidt, T., et al. (2010) Variability of the upper troposphere and lower stratosphere observed with GPS radio occultation bending angles and temperatures, *Adv. Space Res.*,

doi:10.1016/j.asr.2010.01.021.

Wickert, J., et al. (2009) GPS radio occultation: results from CHAMP, GRACE and FORMOSAT-3/COSMIC. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 20, 1, 35–50, doi:10.3319/TAO.2007.12.26.01(F3C)

Ning, T., et al. (2013) Evaluation of the atmospheric water vapor content in a regional climate model using ground-based GPS measurements, J. Geophys. Res., 118, 1–11, doi:10.1029/2012JD018053.

Reflektometri med GNSS

Ozeki, M. and K. Heki (2011) GPS snow depth meter with geometry-free linear combinations of carrier phases. J. Geod., doi:10.1007/s00190-011-0511-x.

Gutmann, E., et al. (2012) Snow measurement by GPS interferometric reflectometry: an evaluation at Niwot Ridge, Colorado, Hydrol. Processes, 26, 2951–2961, doi:10.1002/hyp.8329.

Shuanggen, J., and A. Komjathy (2010) GNSS reflectometry and remote sensing: New objectives and results, Adv. Space Res., 46, 111–117, doi:10.1016/j.asr.2010.01.014

Larson, K., et al. (2013) Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver, Adv. Space Res., 51, 1301–1310, doi:10.1016/j.asr.2012.04.017.

Länkar

Gfg²-projektet: www.gfg2.eu

sid.6–7: <http://pbo.unavco.org/>

sid.8: <http://strokkur.raunvis.hi.is/~sigrun/KATLA.html>

sid.9: http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/i_2720/Projects/gpsmonitoring

sid.10–11: <http://www.chalmers.se/rss/SV/forskning/forskargrupper/geo/projekt/bifrost>

sid.12–13: <http://satice.icm.csic.es/index.html>

sid.14: www.blesgans.de

sid.15: www.project-e-track.eu

sid.20–21: <http://swaciweb.dlr.de/>

sid.22–23: <http://egvap.dmi.dk/>

pp.26–27: <http://xenon.colorado.edu/spotlight>



DETTA HÄFTE har producerats av Gfg²-projektet, en treårig koordineringsaktivitet finansierad av Europeiska kommissionens sjunde ramprogram under miljötemat. Dess uppgift är att belysa värdet av jordobservationer med hjälp av globala navigationssystem (GNSS = Global Navigational Satellite Systems) för Global Environmental Earth Observation (GEE0) och GEOSS.

Deltagare i Gfg2-projektet:

CHALMERS

Starlab®



UNITED KINGDOM • CHINA • MALAYSIA

www.gfg2.eu

Gfg²-projektet tackar för det ekonomiska stödet från EU-kommissionens sjunde ramprogram under miljötemat (2010) samt Stiftelsen Chalmers tekniska högskola för finansiering av tryckningen av den svenska upplagan.

