

Luftbåren laserscanning til støtte af klima - og miljøovervågning

Rene Forsberg, Danmarks Rumcenter

Luftbåren laserscanning er i de senere år blevet udbredt i forbindelse med udarbejdelse af nøjagtige højdemodeller, til kortlægning, visualisering etc. Med en højdenøjagtighed på få cm og tæt fladedækning (op til mange punkter/m²) er laserdata potentielt af stor interesse til miljøovervågning, f.eks. til bestemmelse af ændringer i strandflader og vådområder, og specielt ændringer i sne- og isoverflader i polarområder, ændringer som direkte relaterer sig til klimaændringer. De laser systemer som anvendes til landmålingsmæssige projekter er typisk meget kostbare, og derfor ofte uden for økonomisk rækkevidde for mere forskningsprægede projekter. I denne artikel beskrives nogle erfaringer og anvendelser af et "low-cost" laserscanning system som i de senere år er udviklet af geodæterne på Danmarks Rumcenter (tidl. Kort og Matrikelstyrelsen), og specielt brugt i forbindelse med projekter i Grønland og Polhavet.

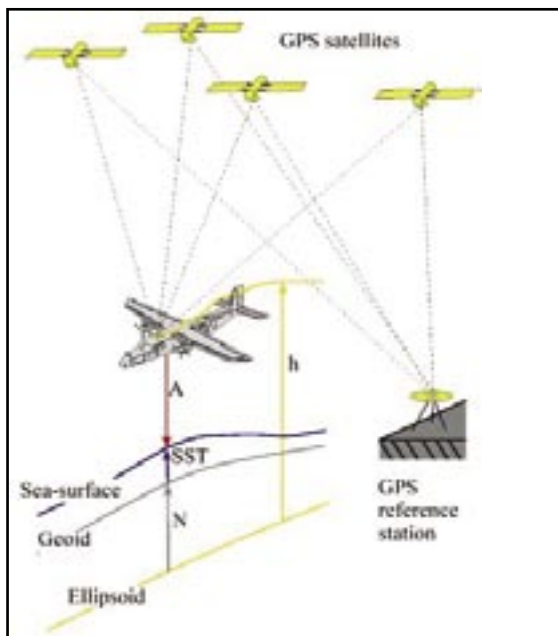
Baggrund

Laserscanning har udviklet sig rivende i de senere år i takt med udviklingen af laserteknik, GPS og – især – computere til at håndtere de store datamængder der genereres. Kommercielle systemer er meget produktive, men samtidig kostbare og ofte bundet til specielle flyplatforme. Indenfor den danske geodatabranch er både COWI og Blominform active som udbydere af laserscanning, men metoden er indtil videre i Danmark kun brugt over de større byer og udvalgte områder i det åbne land; i Holland er der foretaget landsdækkende laserscanning. Dominerende for kommercielle anvendelser er p.t. det tyske "Toposys" system og canadiske Optech ALTM. Disse er begge kostbare "black box" systemer hvor kunden ikke har tilgang til de enkelt systemkomponenter, men får leveret en "punktsky" af tætte Northing, Easting og højde data, ofte med en opløsning på få dm.

I denne artikel vil jeg fokusere på en parallel udvikling af et simplere, "gør-det-selv" laserscanning system, udviklet af geodæter i Geodynamikafdelingen på Danmarks Rumcenter (indtil 1/1 2005 del af Kort og Matrikelstyrelsen). Jeg vil især fokusere på projekter og nogle overordnede principper, og forhåbentlig inspirere læseren til at se de potentielle mangfoldige anvendelsesmuligheder for laserscanning. Artiklen er baseret på fælles arbejde af mange af mine kolleger i de senere år (se konklusionen).

Udviklingen af systemer til luftbårne geodætiske målinger startede i KMS i 1996, og er siden først og fremmest udnyttet i forbindelse med projekter i Grønland finansieret af europæiske og amerikanske kilder. Vores første erfaringer med luftbårne geodætiske målinger var i 1996-98 i et dansk-norsk-tysk-portugisisk EU projekt AGMASCO (Airborne Geoid Mapping System for Coastal Oceanography), hvor ideen var at udføre luftbårne tyngdemålinger og samtidig udføre laserhøjdemålinger over havet, hvorved man indirekte i princippet kan bestemme havstrømme (ændringer i havstrømme, saltholdighed og temperatur bevirker at havets overflade afviger op til 1 meter fra geoiden, som er højdeoverfladen svarende til det uforstyrrede ocean; geoiden bestemmes fra tyngdemålingerne).

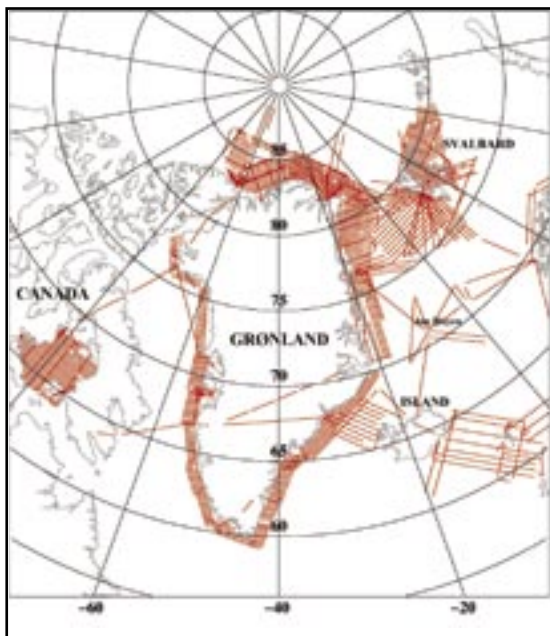
AGMASCO projektet havde feltkampagner i Skagerrak, i Fram Strædet mellem Grønland og Svalbard, og på Azoerne. Det var klart fra disse kampagner, at ikke alene virkede de luftbårne tyngdemålinger fortrinligt, men også det indkøbte Optech laseraltimeter gav gode data i op til 500 m over havet, og op til 1000 m over sneoverflader. Kombineret med kinematisk GPS og en retningssensor gav det højder af overfladen med en nøjagtighed på få dm, og blev derfor umiddelbart brugt også i nogle forskningsrådsprojekter på indlandsisen, hvor metoder til højdemåling af indlandsisen blev evalueret og testet (ECOGIS: Elevation Changes of the Greenland Ice Sheet).



Figur 1. Det grundlæggende princip ved AGMASCO projektet: GPS bestemmer ellipsoidehøjden h ; tyngdemålinger i flyet geoiden N ; lasermåling højden A . Herved kan havoverfladens topografi (SST) bestemmes; denne skyldes havstrømme, temperatur og saltholdighed.

I 1998 påbegyndte KMS egne luftbårne tyngdemålinger i Grønland (Fig. 2), og indsamlede samtidig laserhøjdemålinger over indlandsis og havis. I år 2000 fik vi mulighed for at teste en laser scanner enhed fra firmaet Riegl i Østrig over indlandsisen syd for Kangerlussuaq (Søndre Strømfjord); disse resultater viste at Riegl enheden sammen med GPS og vores daværende danskbyggede prototype IMU (Inertial Measuring Unit) reelt havde givet os et komplet laserscanning system til en brøkdel af hvad et kommercielt system ville have kostet.

Med senere software- og hardware opgraderinger (primært indkøb af en militær Honeywell-G764 INS inertiel navigationsenhed), er systemet i dag rutinemæssigt brugt til en lang række forskningsprojekter i Grønland og Arktis, primært finansieret af EU, det europæiske rumagentur ESA og danske forskningsmidler, ofte i samarbejde med andre danske



Figur 2. KMS's kombinerede flybårne tyngde- og lasermålinger i arktiske områder 1998-2003. Lasermåling af havisen nord for Grønland tillader bl.a. en nøjagtig måling af istykkelsen af pakisen, målinger som i de kommende år vil blive intensiveret i forbindelse med feltprogrammer for ESA's polare overvågnings satellit CryoSat.

forskningsinstitutioner. Samtidig med udviklingen af laserscanning har vi videreudviklet det luftbårne tyngdemålingssystem, især i forbindelse med en række større internationale opgaver. Disse opgaver omfatter bl.a. bestemmelse af nationale geoidmodeller (Malaysia 2002-3, Mongoliet 2004-5) samt marine geoidbestemmelser, bl.a. til understøttelse af satellit radar altimetri og GPS-nivellement i kystområder (feltkampagner i bl.a. Østersøen, Nordatlanten, Middelhavsområdet og Australien).

Det nuværende laseropmålingssystem er karakteriseret ved at være modulært og mobilt, og det kan installeres i forskellige fly på en dags tid, hvis blot der er et passende hul til laseren i bunden af flyet (et fotofly er derfor særligt velegnet). Vi har indtil nu haft erfaringer med lasersystemet i en lang række flytyper, bl.a. danske fotofly fra både Scankort



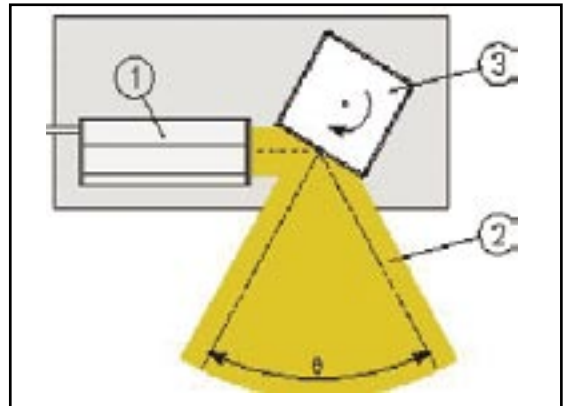
Figur 3. Air Greenland Twin-Otter på Jan Mayen under tyngde- og lasermålinger 2003. Vulkanen Beerenberg ses i baggrunden (krateret blev opmålt med laser som led i flyvningerne). Foto D. Solheim, Statens Kartverk, Norge.

og Kampsax, såvel som i fly af typen Dornier-228 og DHC-6 Twin-Otter (Air Greenland og Chiles luftvåben). Vores primære flypartner har gennem årene været Air Greenland, hvis Twin-Otter OY-POF har været chartret af KMS til en lang række vellykkede tyngde- og laserprojekter i såvel arktiske som mere fjerne egne fra hjemmebasen i Grønland (bl.a. Østersøområdet og Mongoliet).

Principper for laserscanning

Det grundlæggende princip for laserscanning er relativt simpelt: Man positionerer sit fly præcist med differentiell GPS, finder flyets orientering (pitch, roll og heading) med inertielle sensorer, og måler afstand og retning til et givet punkt på jorden i forhold til flyets "body system" (et koordinatsystem med x-akse i flyets længderetning, y-akse langs højre vinge, og z-akse positiv nedad). Denne måling af afstand og retning kan gøres på mange måder: med et vibrerende spejl (f.eks. NASA's ATM system), med fiberoptik (Toposys systemet), eller med roterende spejle (Riegl og Optech's systemer). Princippet i Riegl syste-

met er vist i Figur 4: Et firkantet spejlbelagt prisme roterer, og hver gang laserstrålingen reflekteres i et spejl, laves et "scan" hen over jorden på tværs af flyretningen.



Figur 4. Basalt princip for Riegl laser scanner. En laser (1) måler afstand med få cm nøjagtighed; der genereres et scan (2) med bredde svarende til flyhøjden over overfladen når spejlet (3) roterer.

Laserafstand, spejlvinkel og amplitude af refleksionen er den basale måling i Riegl systemet. Fra INS kan findes pitch p , roll r og heading a , og Riegl målingen af afstand r og vinkel a i flyets "body" system kan her ved omsættes til et lokalt (nord,øst,op)-koordinatsystem gennem en simpel geometrisk rotation, som typisk har et udseende som følger (en stump kode fra vores Fortran software til laserscanning):

$$\begin{aligned} dxg &= \cos a * \cos p * dx + (\cos a * \sin p * \sin r - \sin a * \cos r) * dy + (\cos a * \sin p * \cos r + \sin a * \sin r) * dz \\ dyg &= -\sin a * \cos p * dy - (\sin a * \sin p * \sin r + \cos a * \cos r) * dy + (\cos a * \sin r - \sin a * \sin p * \cos r) * dz \\ dzg &= \sin p * dx - \cos p * \sin r * dy - \cos p * \cos r * dz \end{aligned}$$

Når "offset" af jordpunktet i det lokale (N,Ø,U)-system er kendt, er det en simpel sag at kombinere dette offset med en kinematisk GPS position, og hermed fås geografisk bredde længde og ellipsoide højde af hvert eneste laserpunkt på jorden.

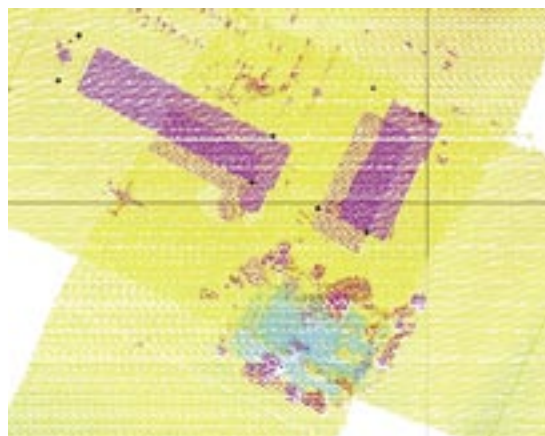
I vores nuværende Riegl LMS-140i system (som oprindeligt er designet til opmåling af mineskakter, og ikke flyanvendelser) foretager vi typisk 40 scans, med omkring 200 laserpunkter per scan. Dette svarer ved typiske flyvehastigheder og en højde på 300 m til ca. 1 laserpunkt pr m². Dette giver et datavolumen på over 1 GByte rå data på en typisk 5-timers flyvning i Grønland, så der er ved større feltkampagner tale om særdeles store datamængder. Det skal bemærkes at nyere og dyrere systemer kan typisk registrere 10 gange så tætte data, og også "waveforms" for laserpulserne; men så er prisen for systemet også derefter (1 mio Euro og opefter).

Nøjagtigheden af laserscanningen afhænger først og fremmest af nøjagtigheden i den kinematiske GPS positionering af flyet. I Grønland med lange afstande til referencestationer og stor ionæsfæreaktivitet er nøjagtigheden af laserscanning bedste fald omkring 20-30 cm (1 s) i højden; i Danmark er nøjagtigheden ofte 5-10 cm for en velkalibreret instal-

lation. I planen er nøjagtigheden typisk <1 m (afstanden mellem laserpulserne). Nøjagtigheden vurderes typisk ved fejlen i krydsende "swaths" over relativt flade områder (f.eks. indlandsisen og strandområder), samt ved målinger over bygninger og objekter med kendte koordinater. En god nøjagtighed hænger nøje sammen med en god kalibrering af installations offsets i pitch, roll og heading: Denne foretager vi typisk ved overflyvning af bygning med kendte hjørnekoordinater, samt overflyvning af en landingsbane med kendte højder (typisk bestemt med lokal kinematisk GPS i en bil). Figur 5 og 6 viser et eksempel på rå laserdata før og efter en sådan kalibrering, mens Figur 7 og 8 viser et par eksempler på laserscanning i Danmark og Arktis.

Aktuelle anvendelser af laserscanning ved DRK

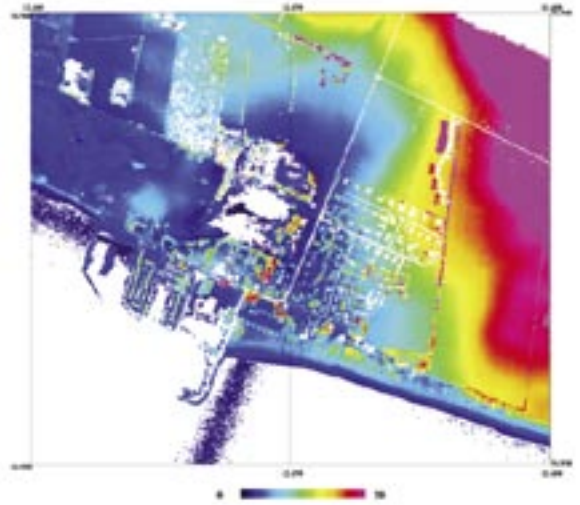
DRK's anvendelser af laserscanning er som tidligere nævnt først og fremmest rettet mod arktiske forskningsprojekter, både til validering og kalibrering af satellitter, og til overvågning af ishøjder af både indlandsis og havis med henblik på at detektere ændringer. Målingerne er primært finansieret af EU, ESA og forskningsrådene. Polarområderne er i



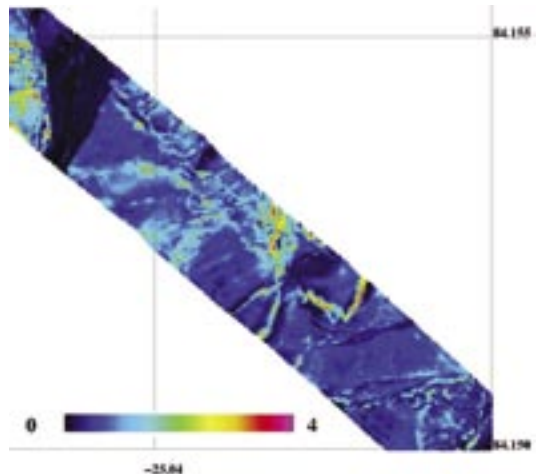
Figur 5. Eksempel på laserscanning før kalibrering af pitch, roll og heading offsets. Der er fløjet profiler over terminalen og brandstationen (øverste bygninger) i Roskilde Lufthavn i to retninger. Fra forskellen i bygningernes position kan systemets fejlorientering let bestemmes (K. Keller, flyvning med Scankort fotofly 2002).



Figur 6. Laserscanning af Roskilde lufthavn efter kalibrering med "low-cost" Riegl systemet. Terminalen (orange) er bygget sammen med kontroltårnet; syd for brandstationen (rød) ses et bevokset område. Bemærk parkeringsbåsene nord for terminalen og flyene på jorden. Ellipsoidehøjder i meter.



Figur 7. Laserscanning af Klintholm Havn, Møn; højder over havniveau i meter. Laserscanningen af nærtliggende vådområder er foretaget fra relativt stor højde, hvorfor sorte overflader (asfalt) ikke giver refleksion; havet giver tilsvarende også kun refleksion nær nadir.



Figur 8. Pakis i Polhavet nord for Grønland, og eksempel på typisk laserscanning (ca. 1.5 km langt segment) med højder i meter over havniveau. Der ses både en nyfrossen rende ("lead") og høje kompressionsrygge ("ridges"). Isens højder ("fribord" højder) er et direkte mål for istykkelsen.

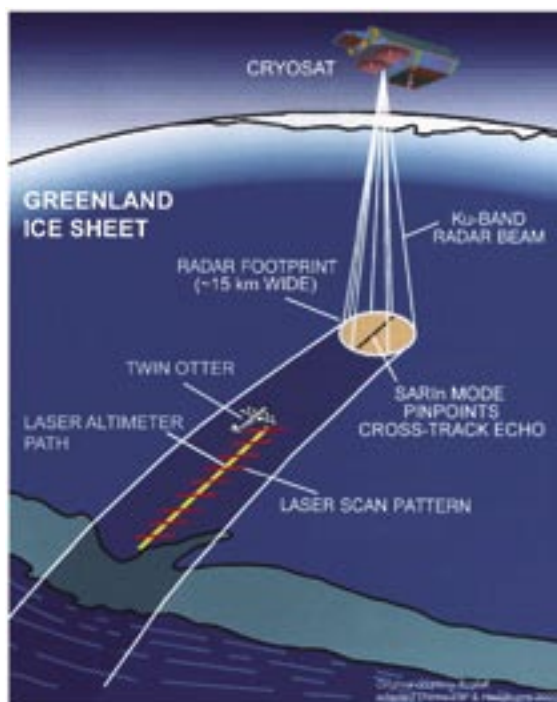
disse år udsat for markante klimaændringer, hvor Grønlands indlandsis i øjeblikket bortsmelter hastigt i randzonen (op til en meter om året i dele af Sydgrønland). Polhavets is er blevet væsentligt tyndere siden de første målinger af istykkelse fra "upward looking sonar" i atomubåde i 1960'erne, og forsætter de nuværende tendenser, kan det Arktiske Ocean være helt isfrit om sommeren sidst i dette århundrede. Et isfrit Arktisk Ocean vil betyde store omvæltninger i polaregnenes klima, men også byde på nye muligheder for Ressourceudnyttelse og skibsfart.

Den øgede opmærksomhed på klimaændringer i Arktis har givet udslag i nye satellitmissioner til overvågning af polområderne: NASA's ICESat (laseraltimetri satellit, opsendt 2002) og ESA's CryoSat (specialiseret radar altimetri satellit). CryoSat udnytter en ny interferometrisk radar teknik, som giver et meget snævert "målefordspor", som tillader at måle nøjagtige højder i indlandsisens hældende randzoner og polhavets "kaotiske" isoverflade (Fig. 8). For at forstå CryoSats signaler, herunder radar signalets uundgåelige indtrængning i de øverste meter af sneen, er det afgørende med kalibrering og validering, hvor radarindtrængningen bestemmes med "ground truth" fra en kombination af luftbårne målinger og in situ-data (Fig. 9). CryoSat blev desværre ødelagt under opsendelsen, men ESA har besluttet at opsende en ny forbedret CryoSat-2 i 2009.

Der blev allerede i både 2003 og 2004 udført omfattende "prelauch" aktiviteter i en profil over indlandsisen fra Ilulissat (Jakobshavn) østover til toppen af iskappen, foruden målinger i Polhavet nord for Grønland. Under disse aktiviteter Marts 2003 holdt vores laserscanner op med at virke ved -35°C på vej over indlandsisen; en hurtig ad-hoc opdatering af udstyret på Svalbard med elektriske snecooter-håndvarmer elementer fik dog løst problemet, og der blev efterfølgende gennemført en succesfuld ESA-kampagne over det Arktiske Ocean i samarbejde med tyske og britiske forskere. Denne type ad-hoc problemløsning har været helt typisk for udvikling af vores hardware og

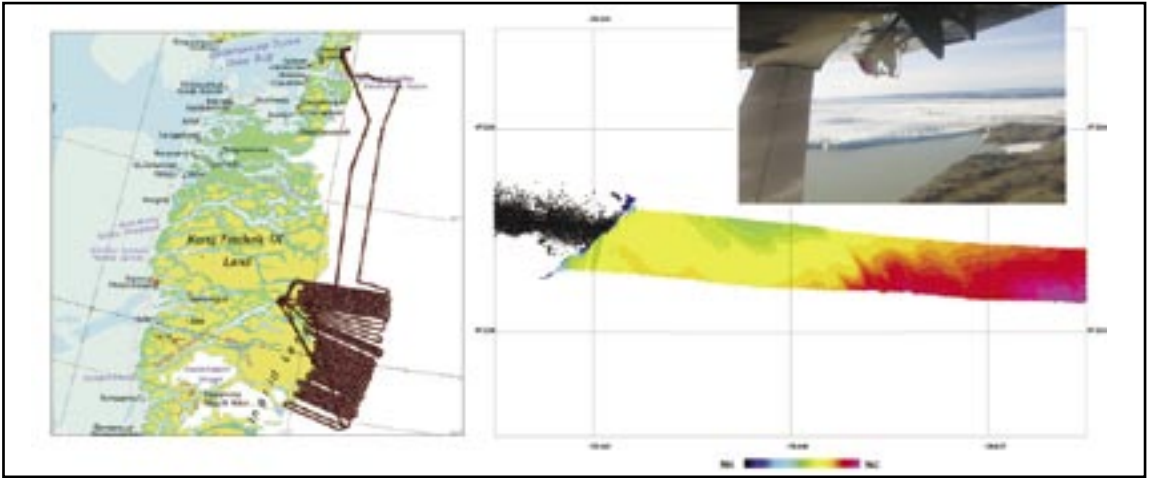
software gennem årene, og også medvirket til at vi stort set ikke har mistet data fra flykampanjer på grund af hardware fejl.

Fig. 10 viser et eksempel på flyvninger fra et andet type projekt, hvor lasermålinger udnyttes til detaljeret overvågning af en del af randzonen ved Søndre Strømfjord (bl.a. som led i et fælles forskningsprojekt med GEUS og DTU om vandkraftpotentiale i området). Profilerne er fløjet både 2000, 2003 og senest i august 2005. Højdeændringerne fra 2000 til 2003 var op til flere meter. Laserscanningen



Figur 9. Princip for CryoSat "cal/val"-program 2006-7. Når CryoSat er opsendt planlægges omfattende sommer og vinter aktiviteter på indlandsisen og i Polhavet nord for Grønland. Flybåren laserscanning og radar målinger giver mulighed for at bedre forstå CryoSats målinger af ændringer.

sikrer det fælles overlap mellem de forskellige år, og tillader interpolation mellem de tætte punkter i de underliggende "swaths" til samme geografiske positioner (det ville ikke være muligt hvis der kun foretoges simple profil-



Figur 10. Eksempel på laserscanning af et område af indlandsisens randzone i Vestgrønland (SPICE 2003, fælles projekt med GEUS og DTU). Kortet til venstre viser flyspor; til højre et eksempel på et "swath" med farveskala fra 501 til 562 m. En sø til venstre giver mere begrænsede refleksioner.

målinger). Målingerne over isen tillader tillige detaljerede studier af f.eks. smeltningsfloder på isen, og også til tider måling af dybden af blottede gletscherspalter. På grund af de massive datamængder har vi dog indtil nu kun udnyttet en brøkdel af informationen i de forskellige datasæt.

Udviklingsmuligheder for "forskningsmæssig" laserscanning

Det "low-cost" laserscanning system som DRC/KMS gennem årene har udviklet som en integreret del af et bredere geodætisk system til luftbåren jordobservation, har vist at laserscanning er muligt med relativt begrænsede ressourcer, både budget- og mand-skabsmæssigt. Med de nøjagtigheder som er opnået (5-10 cm i højden og 0,5-1 m opløsning afhængig af hastighed) er det klart at et sådant system har mange potentielle anvendelsesmuligheder, udover den klimamæssige overvågning af gletschere og havis. Anvendelser til digitale terrænmodeller er oplagte, selv om en egentlig fladedækning med vores type laserscanning vil være uøkonomisk; her vil kommercielle systemer med højere flyvehøjder og bredere "swaths" være mere velegnede. Anvendelser til ad-hoc kontrol af højdemodeller er dog oplagte, ligesom monitore-

ring af områder som ådale, vådområder og strandflader. Andre typer anvendelser som er under udvikling internationalt, er f.eks. måling af skovhøjder og biomasse.

En særlig variant af laserscanning med en grøn laser tillader måling af havdybder i lavvandede områder; et sådant system kunne have særlig interesse i Danmark med de mange lavvandede områder hvor søopmåling med konventionelle metoder er meget tidskrævende. Grønne laserdioder er kommet på markedet de senere år, men endnu ikke udviklet til brug i "simpel" laserscanning (de nuværende luftbårne bathymetri systemer som det australske LADS og nordamerikanske SHOALS bruger meget kraftfulde lasere og kræver store fly og særlige sikkerhedsforanstaltninger omkring øjenskader). Der er stadig forsknings- og udviklingsmæssige udfordringer på systemsiden, f.eks. forbedrede algoritmer til kalibrering af systemet, og – især – forbedrede metoder til kinematisk GPS positionering. Nye metoder som udnytter "clock" parametre til GPS satellitterne fra den internationale GPS service tillader nu positionering "absolut" af et fly uden referencestationer med en højdenøjagtighed på 20-30 cm; især ved operationer

over lange afstande i Grønland og det Arktiske Ocean har dette indlysende praktiske fordele. Endelig er kombineret GPS og INS navigation vigtig for at forbedre GPS løsninger, og sikre større immunitet mod cycle slips og andre GPS problemer som vi stadig ser relativt tit i praktisk flymåling, især i polarområderne.

På anvendelsessiden er de store datamængder fra laserscanning stadig en stor udfordring. Dette gælder både på klima- og miljøovervågningen, samt – især – på geoinformatiksidens. For anvendelser i bevoksede og bebyggede områder må huse og træer "fjernes" for at få en DEM; det er især på dette område at der p.t. udføres megen forskning internationalt. Bare det at importere laserscanning data i et almindeligt GIS system kan være lidt af en udfordring, og der er mange muligheder for software udvikling til f.eks. automatisk bestemmelse af bygningsgrænser- og højder, ændringsudpegning etc., og hermed reducere de typisk mange GByte data til meningsfulde information af relevans i det daglige GIS arbejde.

Konklusion

Jeg har i denne artikel beskrevet nogle anvendelser af DRC's nuværende "ad-hoc" laserscanningssystem, først og fremmest designet til anvendelser i polarområderne til overvågning af gletschere og havis, og til kalibrering og validering af satellitmålinger. Anvendelsesmulighederne er dog meget bredere, især inden for miljøovervågning (strande og vådområder), geomorfologi etc. På landmålingssiden kan systemet være et supplement til data fra kommercielle laserscanningssystemer; disse har dog typisk en bedre opløsning end vores system.

De mange data vi har samlet gennem årene i forskellige projekter er stadig langt fra fuldt udnyttet; her er der masser af information til fremtidige forskningsprojekter, ligesom der

også er mange muligheder for udnyttelse til speciale- og ph.d. projekter.

Det siger næsten sig selv at udviklings- og feltarbejdet i forbindelse med de luftbårne laser- og tyngdemålinger har været stort, og kun muligt på grund af dedikerede geodætiske kolleger, specielt Kristian Keller og Arne Olesen, foruden et antal ph.d. studerende og EU-forskningsassistenter gennem årene tilknyttet Geodynamik-afdelingen (Cecilia Nielsen, Sine Hvidegård, Lars Stenseng, Nynne Dalå og Henriette Skourup). De luftbårne tyngdeprojekter er udført i tæt samarbejde med Universitetet i Bergen (Arne Gidskehaug). De hardwaremæssige udviklingsopgaver omkring flyinstallation og IMU er sket i tæt samarbejde med Greenwood Engineering A/S (Leif Grønsvov og kolleger).

Referencer

Forsberg, R., K. Keller, S. M. Jacobsen: Laser Monitoring of Ice Elevations And Sea-Ice Thickness in Greenland. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, vol. XXXIV no. 3/W4, pp. 163-169, 2001.

Jacobsen, S.M. and R. Forsberg: Sea-ice Thickness from Airborne Laser Altimetry over the Arctic Ocean North of Greenland. Geophysical Research Letters, vol. 29, no. 20, pp. 1952-1955, 2002.

Keller, K, S. M. Hvidegård, R. Forsberg, N. S. Dalå, H. Skourup, L. Stenseng: Airborne lidar and radar measurements over sea-ice and inland ice for CryoSat validation: CRYOVEX-2003 final report. KMS Technical Report no. 25, 58 pp., 2004.

Krabill, W. et al: Greenland Ice Sheet Changes Measured by Airborne Laser Altimetry. Geophysical Research Letters, vol. 22, 2341-44, 1995 – bl.a. om NASA's konisk scannende ATM lasersystem. www.esa.int/esaLP/Lpcryosat.html - om Cryosat og feltkampagner www.optech.ca, www.toposys.com, www.riegl.com - laserscanner fabrikanter.

Om forfatteren

Rene Forsberg, Statsgeodæt, Geodynamikafdelingen, Danmarks Rumcenter, Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø, rf@rumcenter.dk

Kære medlem,

Ved du at stillingsopslag, der bringes på www.geoforum.dk rent faktisk bliver set?

En god grund er, at Geoforums side ofte bliver opdateret hos: Google, MSN, Yahoo og Jubii

Derfor når din annonce på www.geoforum.dk hurtigt den interesserede jobsøgende

GRATIS markedsføring!

Fortæl om:
dit nye produkt
din nye service
din nye nøglemedarbejder

i **geoforum.dk**

anvend Nyheds-formularen på www.geoforum.dk

Geoforum - et godt sted at blive set

Leica SmartPole Setup "on-the-fly" – start din måling uden indmåling af fixpunkter



Ved brug af Leica SmartPole, er det ikke nødvendigt at udføre en orientering først. Opstillingen bestemmes samtidig med dine detailmålinger.

- Leicas patenterede GNSS/TPS kompatibilitet gør nu System1200 helt unikt
- Den fælles controller kan håndtere alle komponenter i System1200
- Skift frit mellem TPS - GNSS via en trykknop
- Letteste system på markedet
- System1200 tager et skridt videre

Læs mere om Leicas andre produkter på www.leica-geosystems.dk eller ring på tlf. 44 54 02 02

- when it has to be **right**

Leica
Geosystems