

## **En introduksjon til satellitter**

Pål Bjerke og Richard B. Olsen

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

15. september 2008

FFI-rapport 2008/01751

344901

P: ISBN 978-82-464-1451-5

E: ISBN 978-82-464-1452-2

## **Emneord**

Satellitt

Jordobservasjon

Satellittkommunikasjon

Navigasjon

Jordstasjoner

## **Godkjent av**

Richard B. Olsen

Prosjektleder

Vidar S. Andersen

Avdelingssjef

## **Sammendrag**

Denne rapporten gir en innføring i prinsipper for bruk av satellitter som går i kretsløp rundt jorden. Den presenterer sentrale begrep for satellittbaner, instrumenter og annen nyttelast, samt anvendelsene for disse. Til slutt gjennomgås noen av de viktigste aktørene og noen perspektiver for videre utvikling.

## English summary

This report provides an introduction to principles for using satellites in orbit around the Earth. We present basic nomenclature and concepts for satellite orbits, payloads and their application. Finally we take a look at some of the most important satellite operators around the world, and touch upon some views for future development in this field.

# Innhold

	<b>Forord</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Hva er en satellitt?</b>	<b>9</b>
2.1	Romsegment	11
2.1.1	Satellitters anatomi	11
2.1.1.1	Satellittbussen	12
2.1.1.2	Hjelpemotorer	12
2.1.1.3	Strømforsyning	13
2.1.1.4	Kommando- og telemetrisystem	13
2.1.2	Nyttelast	14
2.2	Baner	15
2.2.1	Banehøyde	15
2.2.2	Geostasjonær bane	16
2.2.3	Polar bane	17
2.2.4	Molniya bane	17
2.3	Oppskyting	19
2.3.1	Bærerakett	19
2.3.2	Oppskytningssted	20
2.4	Bakkesegmentet	21
2.4.1	Kontrollsenter	22
2.4.2	Nyttesignaler	22
2.5	Hvordan bygges en satellitt?	23
<b>3</b>	<b>Anvendelser</b>	<b>25</b>
3.1	Fjernmåling	25
3.1.1	Sensorer og elektromagnetisk stråling	25
3.1.1.1	Avbildning med synlig lys	26
3.1.1.2	Infrarød	28
3.1.1.3	Multispektral avbildning	28
3.1.1.4	Hyperspektral avbildning	31
3.1.1.5	Radar	31
3.2	Prosessering av fjernmålings-data	36
3.2.1	Elektrooptiske data	36
3.2.2	Radardata	36
3.3	Meteorologi	36
3.4	Oseanografi	37
3.5	Kartografi	38

3.6	Kommunikasjon	39
3.7	Navigasjon	42
3.8	Katastrofer	44
3.9	Militære anvendelser	44
3.9.1	Betydningen av oppløsning	46
<b>4</b>	<b>Dagens aktører og systemer</b>	<b>49</b>
4.1	Nasjonene	49
4.2	Kommersielle aktører	52
4.2.1	Fjernmåling	52
4.3	Omsetning av kommersielle satellittbilder	53
4.4	Militær nytte av kommersielle satellittbilder	54
<b>5</b>	<b>Utviklingen framover</b>	<b>54</b>
5.1	Teknologi	54
5.2	Policy	56
<b>Appendix A</b>	<b>Galileo: EUs satellittnavigasjonssystem</b>	<b>57</b>
A.1	Tjenester	57
A.2	Systemarkitektur	58
	<b>Forkortelser</b>	<b>61</b>
	<b>Referanser</b>	<b>63</b>

## Forord

I 50 år har vi skutt opp satellitter som hjelper oss gjennom vår hverdag. Vi har begynt å ta mange av satellittjenestene som en selvfølge, selv om ressursene som ligger i bunn for prosjektene fortsatt er formidable. Sammen med velutviklede metoder og avansert teknologi, kreves det spesialiserte kunnskaper over et bredt felt. For legfolk blir derfor satellitter og deres funksjoner en vanskelig tilgjengelig verden.

I denne rapporten vil en prøve å åpne denne verdenen i noen grad. På en forhåpentlig lett-fattelig måte er en innom de fleste av trinnene som inngår i en satellitts liv. En går ikke i dybden på temaene, men henviser de som har slike behov, til spesiallitteraturen. De fleste av temaene beskrevet i rapporten dekkes også av Internett på en god måte.





## 1 Innledning

Et legeme som går i bane rundt et annet legeme kalles en satellitt. Normalt benytter vi begrepet på himmellegemer. Et eksempel på en satellitt er månen, som går i bane rundt jorden. Menneskelagde satellitter (Figur 1.1), som er temaet her, kalles strengt tatt kunstige satellitter for å skille dem fra universets naturlige satellitter.

Den første kunstige satellitt, Sputnik 1, ble sendt opp 4. oktober 1957 av Sovjetunionen. Selv om satellitten var liten og primitiv, blir hendelsen i dag sett på som starten på romalderen. Satellittene som etter hvert fulgte de neste årene har dekket en rekke viktige samfunnsoppgaver som kommunikasjon, navigasjon og de fleste former for fjernmåling.

Vi benytter nå daglig satellitter for våre mest vanlige gjøremål uten alltid å være klar over det. Både privat og i jobbsammenheng har vi nærmest gjort oss avhengige av satellitttjenester som TV-sendinger, telefonsamtaler,

og navigasjon. Selv om bruk av satellitter har blitt vanlig, inneholder fagfeltet svært spesialiserte metoder og teknologier i tillegg til en meget avansert bruk av fysikkens lover. Det er ikke gitt for en legmann å beherske dette kompliserte fagfeltet, med mange fagretninger som hver krever en lang utdanning.

Dette skriftet vil dekke en oversikt av fagfeltet i sin fulle bredde, men gjør ingen forsøk på å gå i dybden. For dette formål henvises til spesiallitteratur.

## 2 Hva er en satellitt?

Satellitter kan være naturlige objekter, som planetene som går i baner rundt sola, mens andre satellitter blir laget av mennesker for å utføre en spesiell oppgave.

De kunstige satellittene har alle en funksjon å dekke. I noen tilfeller forbedrer eller effektiviserer den allerede etablerte funksjoner, mens i noen tilfeller oppnår vi ting som tidligere ikke var mulig ellers.



Figur 1.1 En satellitt i bane rundt moder jord.

Noen satellitter formidler radio og TV signaler. Signalet blir sendt fra en stasjon på jorda. Satellitten mottar signalet og sender det ut igjen til et langt større område enn hva senderen på bakken kunne ha dekket. Andre satellitter mottar og sender telefon, telefaks, Internet og datasignaler fra én sentral til en annen, eller til og med mellom personer. Noen satellitter avbilder jordens overflate og overfører bildeinformasjonen tilbake til jorden. Denne anvendelsen, som heter fjernmåling, dekker flere konkrete behov innen meteorologi, oseanografi og ressursovervåking. For navigasjon benyttes satellitter som sender ut svært presis tidskode. Egnede mottakere benyttes på bakken for å bestemme egen posisjon med stor nøyaktighet. De militære benytter satellitter til spesielle former for innsamling og overvåking, i tillegg til anvendelsene nevnt over.

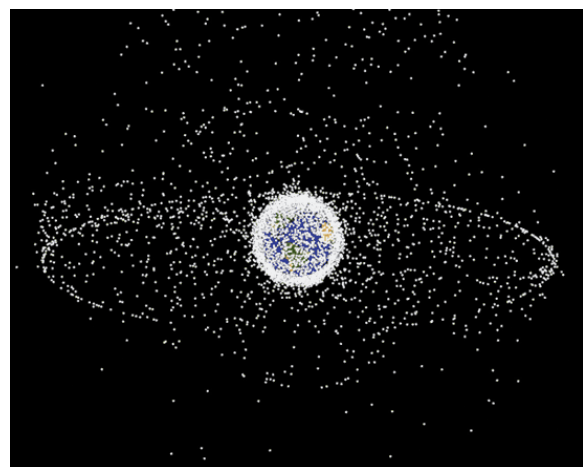
For å komme i sin bane må satellitten skytes opp. Til dette trengs en kraftig rakett (bærerakett) og et egnet oppskytningsområde. Hvordan satellitten skal gå i sin bane, avhenger av anvendelsen. Banehøyden og dekningsgraden (hvilke områder på bakken som "ser" satellitten) er viktige parametere. Når satellitten har kommet i sin bane må den ha regelmessig kontakt med jorden. Det må finnes anlegg på bakken (bakkestasjoner) som kan kontrollere og styre satellitten. I tillegg må brukerne kunne utnytte satellitten direkte eller via felles bakkestasjoner.

Verden har skutt opp satellitter siden 1950-tallet, og restene etter mange "døde" satellitter har begynt å bli et problem med muligheter for kollisjoner. Den amerikanske organisasjonen Space Surveillance Network (SSN) har fulgt romobjekter større enn 10 cm i diameter, siden 1950-tallet. Her er noen tall:

- Ca 5.000 kunstige satellitter er skutt opp
- Mer enn 26.000 objekter har blitt fulgt gjennom tidene (enkelte satellitter har gått i oppløsning)
- For tiden følges ca 9.000 romobjekter (Figur 2.1)
- Ca 2.500 kunstige satellitter er fortsatt i bane
- Ca 850 kunstige satellitter er operative (hvorav nesten 300 militære)
- Det antas at det finnes ca 100.000 rom objekter mindre enn 10 cm

For å unngå romsøppel prøver en i dag å planlegge avslutningen til satellittene som skytes opp. For geostasjonære satellitter benyttes en "begravelses" bane (graveyard orbit) noen hundre km utenfor den geostasjonære banen. Satellitter i MEO og LEO baner blir styrt inn i atmosfæren i en slik vinkel at de brenner opp.

I 1997 ble den første person på jorda truffet av "romsøppel". En bit av en Delta II bærerakett traff en dame i skulderen i Tulsa, Oklahoma, USA. Hun ble ikke skadet.



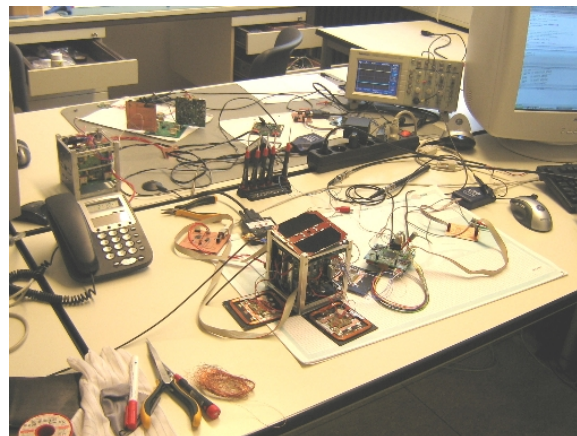
Figur 2.1 Kunstige satellitter og rester av disse. "Ringene" er satellitter i geostasjonær bane

Oversikt over satellittene som går i bane rundt jorda er viktig for å hindre potensielle kollisjoner, men har også en militær interesse. I forbindelse med militære operasjoner vil en prøve å hindre en motpart i å få innsyn, også mot sensorer plassert på satellitter. Mange nasjoner har trolig en form for varselingstjeneste for satellitter. Det finnes tre kjente amerikanske systemer. *Space Surveillance Network (SSN)* er verdensomspennende med både radarer og elektrooptiske sensorer. En av stasjonene finnes i Norge (Globus II, ref [6], [7]). SSN er en del av U S Strategic Command. *Air Force Space Surveillance System (AFSSS)* er et multistatisk<sup>1</sup> radarsystem. Systemet består av 3 sendere og 6 mottakere plassert rundt i USA. Satellittene detekteres gjennom radarprinsippet ved at utsendte pulser reflekteres av satellittene og blir mottatt av mottakerne. North American Aerospace Defence Command (NORAD) er en felles organisasjon for USA og Canada. Hovedhensikten er varseling av mulige missilangrep med fokus på interkontinentale raketter. Sensorene er hovedsaklig gigantiske landbaserte radarer. NORAD følger det meste av satellitter av alle sorter, og har en åpen rapporteringsservice med satellittenes baneparametere.

## 2.1 Romsegment

Satellitten og dens nyttelast kaller vi med et fellesord for romsegmentet. Det er naturlig å bryte ned romsegmentet i avgrensede moduler som kan betraktes som mer eller mindre selvstendige enheter. De vanligste delene i en jordobservasjonssatellitt er vist i Figur 2.3.

<sup>1</sup> I Multistatiske radarer brukes forskjellige antenner hhv til å sende og motta radarsignalene.

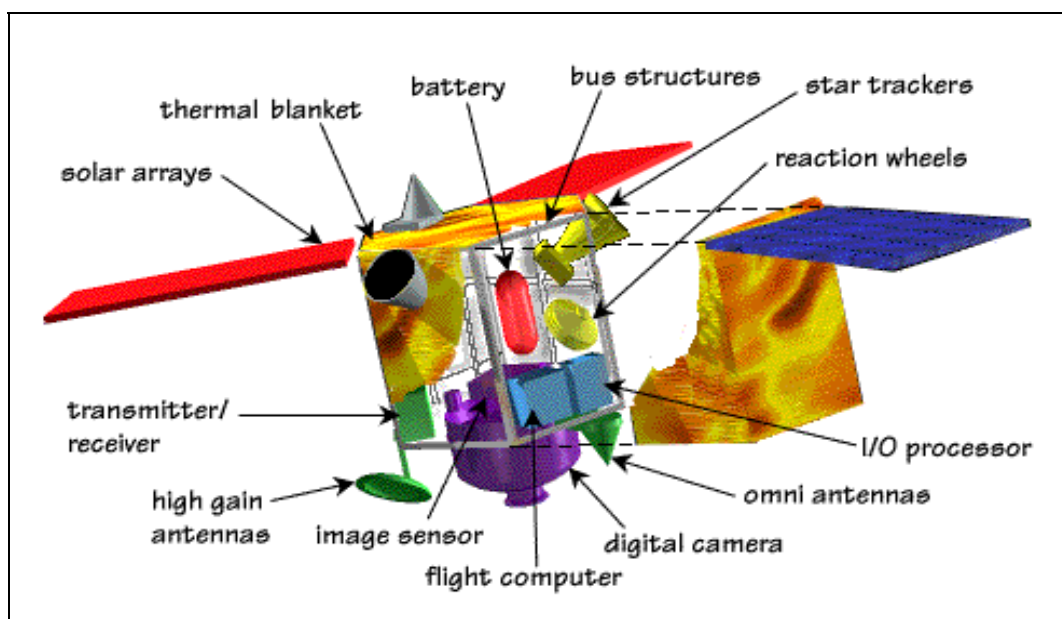


Figur 2.2 *Mindre og billigere satellitter har økt muligheten for produksjon "ved kjøkkenbordet"*

En utvikling har vært at de ruvende og kostbare satellittene fra tidligere tider har blitt mindre og billigere. Resultatet har vært at enkelte universiteter og forskningsmiljøer også har fått økonomi til å eksperimentere med satellitter. Figur 2.2 viser et eksempel.

### 2.1.1 Satellitters anatomi

En søker i første omgang å tilpasse en satellitts egenskaper til dens funksjon. En satellitt fungerer normalt som en plattform for en nyttelast. En bærerakett bringer satellitten med dens nyttelast opp til den banen som egner seg for å løse oppgaven. For å utføre oppdraget sitt, trenger nyttelasten energi, som satellitten må sørge for. Satellitten må også gi nyttelasten et miljø den kan fungere i. Her tenkes spesielt på de enorme temperaturforskjellene som må kompenseres for når satellitten beveger seg fra lys til skygge på forskjellige steder langs banen. Videre kreves normalt en forbindelse med bakken, som forutsetter både sender/mottaker og antenne. Fysisk størrelse følger automatisk av de forannevnte egenskaper. En viktig begrensning er at satellitten får plass i bæreraketten.



Figur 2.3 Skisse av en satellitts anatomi med dens typiske komponenter

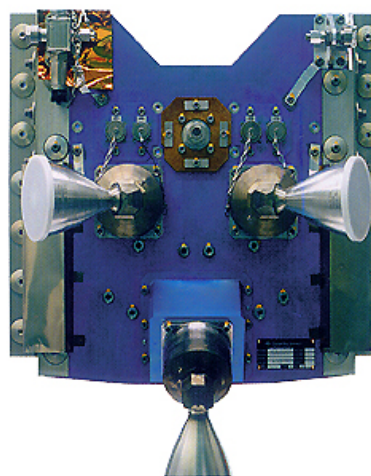
#### 2.1.1.1 Satellittbussen

Satellittbussen, ”satellite bus”, er navnet på satellittens chassis eller hovedstruktur, inkludert alle serviceelementer (se Figur 2.3). Alle satellittens deler er fysisk knyttet til satellittbussen på en hensiktsmessig måte. Satellittbussen har også som oppgave å bistå nyttelasten med en omgivelse og nødvendige hjelpemidler slik at hensikten med satellitten blir mulig. Satellittbussen inneholder derfor mekanismer som gir satellitten en kontrollert orientering gjennom sin ferd (attitude kontroll). Konstruksjonen av satellittbussen ivaretar de nødvendige elektriske forbindelser, som enhetenes tilgang til elektrisk kraft og overføring av elektriske signaler mellom enhetene. Satellittbussen har også mekanismer som overvåker og kontrollerer nyttelastens miljø og omgivelser som temperatur og strømforsyning.

#### 2.1.1.2 Hjelpemotorer

Elektriske eller kjemiske hjelpemotorer (se Figur 2.4) brukes for å justere satellitten inn

i sin endelige bane. Satellitten vil hele tiden påvirkes av eksterne krefter som gravitasjon fra jorden, solvind, magnetiske krefter osv. Med tiden vil derfor satellitten komme ut av sin ønskede bane. Igjen benyttes hjelpemotorene til å bringe satellitten tilbake i sin ønskede bane. Satellittens levetid er knyttet til mengden av drivstoff som medbringes til hjelpemotorene. Normalt er justeringene små og formålet er kun å holde satellitten i



Figur 2.4 Satellittmodul med 3 hjelpemotorer (thrusters)



sin bane. Bare for spesielle satellitter med gode energiressurser kan hjelpemotorene benyttes for å flytte satellitten til en ny bane.

### 2.1.1.3 Strømforsyning

Selv om satellitten selv har små behov for energi til egen drift, så kan nyttelasten ha betydelige energibehov. Dette gjelder ofte kommunikasjonssatellitter med kraftige sendere. Satellittens strømforsyning består av et solcellepanel (Figur 2.5), batterier og en reguleringskrets.

Når solcellepanelet belyses av sola lader dette opp batteriet i tillegg til å levere energi til det elektriske utstyret. For å utnytte sollyset optimalt er det viktig at solcellepanelet vender sin aktive flate mot sola. Størrelsen på solcellepanelet varierer etter energibehovet. Mindre og middels satellitter har solcellepaneler som leverer fra 10–500 watt, mens f.eks. romstasjonen ISS (International Space Station) kan levere imponerende 100 kW. Solcellepanelet har fysisk stor utstrekning, og ligger sammenfoldet til satellitten har kommet i sin bane. Utbrettingen av solcellepanelet er komplisert mekanisk, og er en nødvendig og kritisk prosess for at satellitten skal kunne fungere.



Figur 2.5 Inspeksjon av solcellepanel i monteringshallen

I skyggen av jorden må batteriene kunne levere nødvendig energi til det elektriske utstyret. Oppgaven krever ofte batterier som fysisk krever stor plass og som bidrar med betydelig vekt. Batteriene må også fungere med de store temperatursvingningene som oppstår når satellittene går ut og inn av sollyset.

Reguleringskretsen har som oppgave å overføre energien fra solcellepanelet til batteriene på en optimal måte. Den skal også styre belastningen fra nyttelasten slik at batteriene ikke belastes unødig. Siden batteriene skal lades opp og ut tusenvis av ganger, vil reguleringen av opp- og utladingen bidra vesentlig til å forlenge batterienes levetid.

Både amerikanerne og russerne benyttet for noen år siden atomkraft (termiske generatorer) i noen av sine satellitter, også for satellitter i bane rundt jorden. En har imidlertid senere vurdert at sikkerheten omkring atomdrevne satellitter ennå ikke er tilfredsstillende. For lengre ferder, som til de andre planetene lenger ute i solsystemet, vil antagelig atomkraft være eneste løsningen, fordi sollyset er mye svakere der.

### 2.1.1.4 Kommando- og telemetrisystem

Satellittens kommando- og telemetrisystem gjør det mulig for bakkekontrollen å kommunisere med satellitten. Signalene må være kraftige nok til at kommunikasjonen er sikker, og en bruker ofte store antenner som vist i Figur 2.6. For satellitter i lavere baner (ikke geostasjonære), vil bakkestasjonen kun ha kontakt med satellitten en kort periode i omløpet. Informasjonen må da overføres i løpet av kort tid. Dette oppnås ved komprimering av informasjonen og bruk av radiofrekvenser som gir overføring i stor hastighet. For å unngå uønsket tilgang fra

utenforstående, er det vanlig å kryptere informasjonen.

Kommandosystemet brukes av bakkekontrollen til å påvirke satellittens funksjoner. Det finnes en rekke systemer i satellitten som bakkekontrollen ønsker å styre. Enkle kommandoer starter eller stopper prosesser. Om prosessen er knyttet til baneendring, som f eks bruk av hjelpemotorer, kan utførelsen være svært tidskritisk. Mer avanserte kommandoer kan vedlikeholde satellittens programvare, som f eks endre verdier eller bytte/legge til programmer. Slikt vedlikehold er mindre tidskritisk, og satellittens rutinemessige gjøremål vil være prioritert. Muligheten til å påvirke satellittens systemer er avgjørende for at satellitten skal kunne utføre sine oppgaver tilfredsstillende. Når feil oppstår kan kommandosystemet være eneste mulighet til å rette eller eventuelt omgå feilen.

Satellitten vil ha en test- og evalueringsperiode etter at den har kommet i sin bane. En rekke prøver vil foretas for å forsikre om at alle satellittens funksjoner virker. Fra bakken vil det gis kommandoer som starter testsekvenser, og resultatene vil overføres til bakkekontrollen.

Satellitten rapporterer sin tilstand gjennom telemetrisystemet. En vesentlig informasjon er dens baneparametere dvs. hvor den er og hvor den er på vei. Annen viktig informasjon er f eks temperatur og energistatus. Telemetrisystemet vil også ”kvittere” for ordrer som satellitten mottar via kommandosystemet. Informasjon fra nyttelasten går normalt over en separat kommunikasjonskanal.

## 2.1.2 Nyttelast

Nyttelasten vil variere svært med anvendelsen, både når det gjelder volum, vekt og energibehov.

Nyttelastens størrelse vil begrenses av bærerakettenes størrelse. Rommet for nyttelasten i de største bærerakettene i dag (Atlas V), har en diameter på noe over 4 meter, og en lengde på ca 25 meter. Nyttelast med større utstrekning, som f eks antenner, må ”brettes” sammen i bæreraketten, og foldes ut når satellitten kommer i sin bane. Her benyttes finurlige konstruksjoner og mekanismer for å lykkes. Enkelte ting har til nå ikke vært mulig å demontere for å pakkes ut senere. Dette gjelder først og fremst optikken til de avbildende satellittene. Diameteren på speilene (optikken) er direkte proporsjonal med avbildningssystemets oppløsning på bakken, og en ønsker så store speil som mulig. Siden en økning av bærerakettenes diameter kan ligge noe inn i framtiden, har en i stedet startet forsøk med optikk som kan settes sammen når satellitten har kommet i bane, noe



Figur 2.6 Store antenner følger og kommuniserer med satellittene

som krever ekstrem presisjon i utfoldingsmekanismene.

Grensen for vekten av nyttelasten er knyttet til bæreraketts motorer. Pr i dag kan bæreraketter klare nyttelast på over 20 tonn (til lav jordbane). Det tyngste objektet en har plassert i bane, er romferja, som med sine 116 tonn måtte få en spesialkonstruert bærerakett. Det er sjelden at satellitter veier så mye. Snarere har det i dag blitt mer vanlig at satellittene er så små at vektkapasiteten til bæreraketten utnyttes til å bringe flere satellitter i bane samtidig.

Energibehovet til nyttelasten kan variere kraftig. Kommunikasjonssatellitter med kraftige sendere vil ha betydelige større energibehov enn f.eks. fjernmålingssatellitter.

## 2.2 Baner

Alle banene som er nevnt under er *geosentriske*, dvs. at satellittene roterer rundt jorda. Hvordan satellittene når banene sine avhenger av flere faktorer. Hvor de skytes opp, og i hvilken retning, har stor betydning. Som oftest vil medbrakte raketter være avgjørende for at de skal nå den endelige banen. Satellittene vil holde seg i sin bane gjennom den fine balansen mellom jordas gravitasjon som trekker satellitten mot jorda, og satellittens sentrifugalkraft (rotasjonskraft) som trekker satellitten vekk fra jorda. På grunn av friksjon mot gasser i atmosfæren vil satellitten etter hvert få sin hastighet redusert og sakte falle mot jorden. Dette må kompenseres for, slik at satellitten ikke skal komme inn i atmosfæren og brenne opp. Til formålet har satellitten medbrakt hjelpemotorer som f.eks. små raketter som kan avfyres og skyve satellitten tilbake på plass i banen.

Banens form er en tilnærmet sirkel som er mer eller mindre flattrykket (ellipse). Flattrykkningen varierer fra en nær sirkel til en svært avlang ellipse. For en elliptisk bane vil avstanden fra jorden til den korteste enden kalles *perigeum* og avstanden til enden lengst unna kalles *apogeum*. Banens form og høyde kontrolleres og utnyttes for at satellitten best mulig kan utføre sin oppgave. Vinkelen mellom jordens ekvatorplan og satellittens banelplan kalles *inklinasjonen* (se figur 2.7).

### 2.2.1 Banehøyde

Satellittbanens høyde er en viktig parameter som påvirker dens funksjon og levetid. Omløpshastigheten vil være bestemt av banens form og høyde.

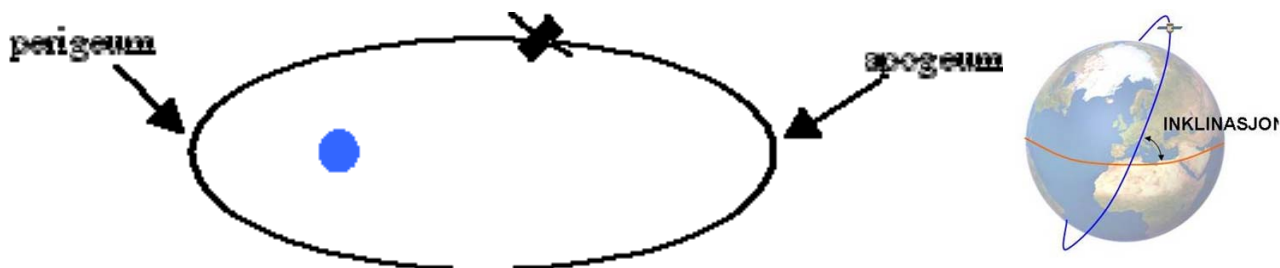
Mens de elliptiske banene kan variere sin høyde betydelig i løpet av et omløp, kan vi skille mellom 4 banehøyder for de (nær) sirkulære banene. Low Earth Orbit (LEO) angir baner med høyde opp til 2000 km. Her er hastigheten ca 8 km/s og et omløp rundt jorda tar ca 90-100 min. Medium Earth Orbit (MEO) angir baner med høyde fra ca 2000 km til opp under 35.786 km (høyden for de geostasjonære satellittene). Satellitter i 20.000 km høyde har en hastighet på ca 4 km/s og bruker ca 12 timer rundt jorda. Satellittene i geostasjonær bane, som går i 35.786 km høyde, har en hastighet på ca 3 km/s, og bruker akkurat 24 timer rundt ett omløp. Det vil si at den roterer med jorda, og vil henge omtrent over samme punkt hele tiden. Satellitter som går utenfor de geostasjonære satellittene sies å gå i High Earth Orbit. Det er noen som bruker forkortelsen HEO for slike baner. Det er imidlertid også vanlig å bruke HEO betegnelsen på svært elliptiske baner (Highly Elliptic Orbits). Bruk av HEO baner omtales mer i avsnitt 2.2.4.

Anvendelsen av satellitten vil i stor grad styre banehøyden. En vesentlig forskjell er av økonomisk art, og gjelder satellittens transport til sin bane. For en lav satellittbane behøver ikke bæreraketten være så kraftig eller bruke så mye drivstoff, som for en høyere bane. Dette vil gjøre bæreraketten enklere og billigere. En satellitt i en høy bane ”ser” et større område enn satellitter i lavere baner. Den samtidige dekingen er bedre jo høyere banen er. Når satellitten kommuniserer med bakken (nyttesignaler eller telemetri) vil forbindelse med satellitter i høye baner sette større krav til både sendere, mottakere og antenner. Dette fører til større, tyngre og mer kostbart utstyr både i romsegmentet og bakkesegmentet. Konsekvensen for brukeren på bakken er at enkle, bærbare antenner kan benyttes for forbindelse med satellitter i lave

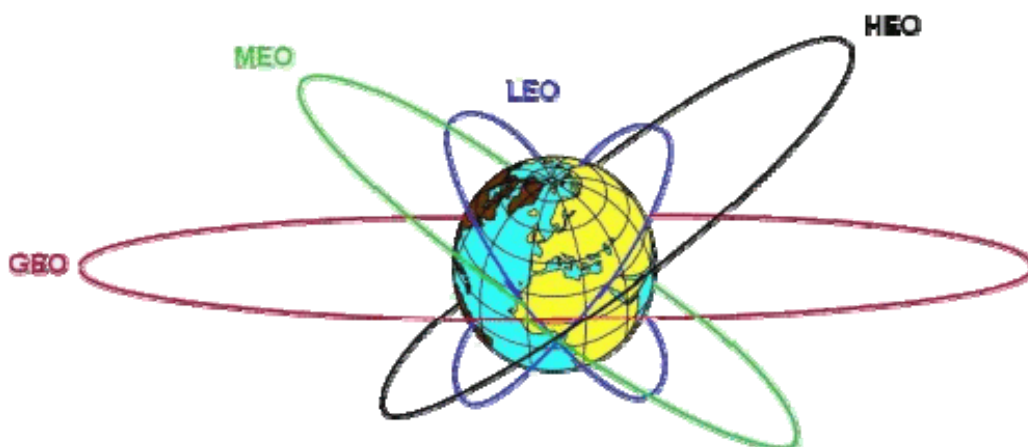
baner, noe som i dag ikke er mulig for satellitter i geostasjonære baner. Det samme gjelder for fjernmålingssatellitter hvor en i dag kun benytter lave jordbaner i området 250 – 900 km. Årsaken er at en ønsker en detaljoppløsning i avbildningen som avtar med banehøyden.

### 2.2.2 Geostasjonær bane

En satellitt i geosynkron bane er synkron med jordas omdreining. Den bruker 1 døgn på et omløp rundt jorda, og har derfor samme omløpshastighet som jorda selv. For å oppnå dette må satellittens bane være 35.786 km over jordoverflaten. Om banen i tillegg ligger i ekvatorialplanet og er sirkulær, kaller vi den geostasjonær. Navnet henviser til at satellitten alltid er på samme sted (stasjonær) i forhold til jorda. Private parabol-



Figur 2.7 Visualisering av begrepene perigeum, apogeeum og inklinasjon



Figur 2.8 De vanligste banetyperne



tenner (Figur 2.9) for radio og TV som er fast rettet mot himmelen, får sitt signal fra en geostasjonær satellitt.

Geostasjonære satellitter har fordelen av å kunne se eller ”dekke” områder på jorda på en permanent basis. Med ”dekke” menes her både å kunne ha forbindelse (kommunikasjon) eller avbilde (fjernmåling) jorda. En ulempe er at det er plass til et begrenset antall satellitter i geostasjonær bane. En utfordring er også den store avstanden som gir svake signaler, og krever retningsbestemte antenner (f eks parabolantennener, Figur 2.6). I tillegg vil signalet ha en tidsforsinkelse (0,24 s fra jorda til satellitten og retur) som for enkelte anvendelser er problematisk. Geostasjonære satellitter har heller ikke dekning rundt polområdene (se Figur 2.10).

I 2002 var det 249 geostasjonære satellitter i bane jevnt spredd langs ekvator, hvor hovedparten var kommunikasjonssatellitter.



Figur 2.9 *Pyntede parabolantennener i Amsterdam for mottak av radio/TV signaler fra geostasjonær satellitt*

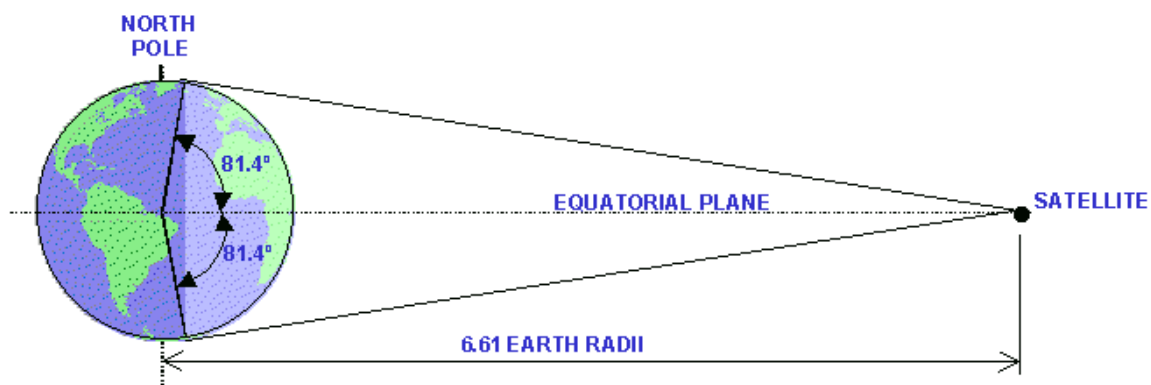
### 2.2.3 Polar bane

En satellitt i polar bane passerer over polene eller i deres nærhet (inklinasjon ca  $90^\circ$ ). For satellitter i lave jordbaner (LEO), vil omløpstiden være ca 90-100 minutter. Ved at jorda dreier kan satellitten etter hvert dekke hele jorda, se Figur 2.11. Derfor er polare baner svært ofte brukt for denne type satellitter. En variant av polare baner er sol-synkron baner. Disse passerer alltid et gitt punkt på jorda til samme tid, og har derfor tilnærmede samme lysforhold (synkron med sola) som er ønskelig for fjernmålingssatellitter.

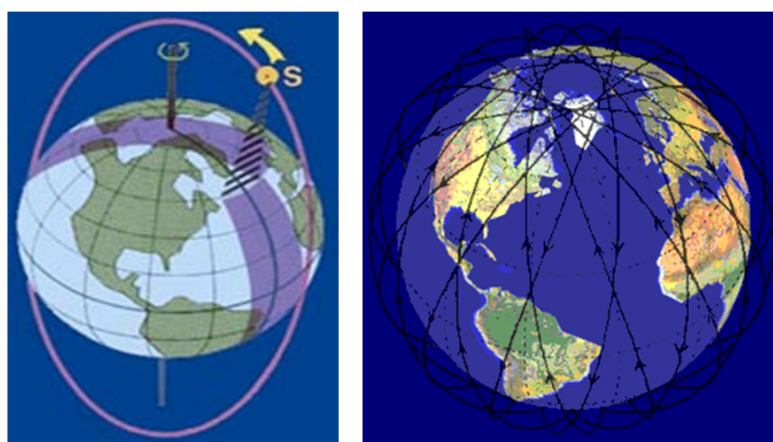
Fjernmålingssatellitter (avbildende satellitter) bruker nesten utelukkende polare baner for å oppnå den ønskede bildeoppløsning. Typiske banehøyder er 400-900 km for vestlige satellitter som har en beregnet levetid på 5-7 år. Russiske fjernmålingssatellitter har ofte hatt en lavere bane på 150-300 km, som har gitt satellitten en begrenset levetid, ned til uker og måneder, på grunn av den økte friksjonen i de lave banene.

### 2.2.4 Molniya bane

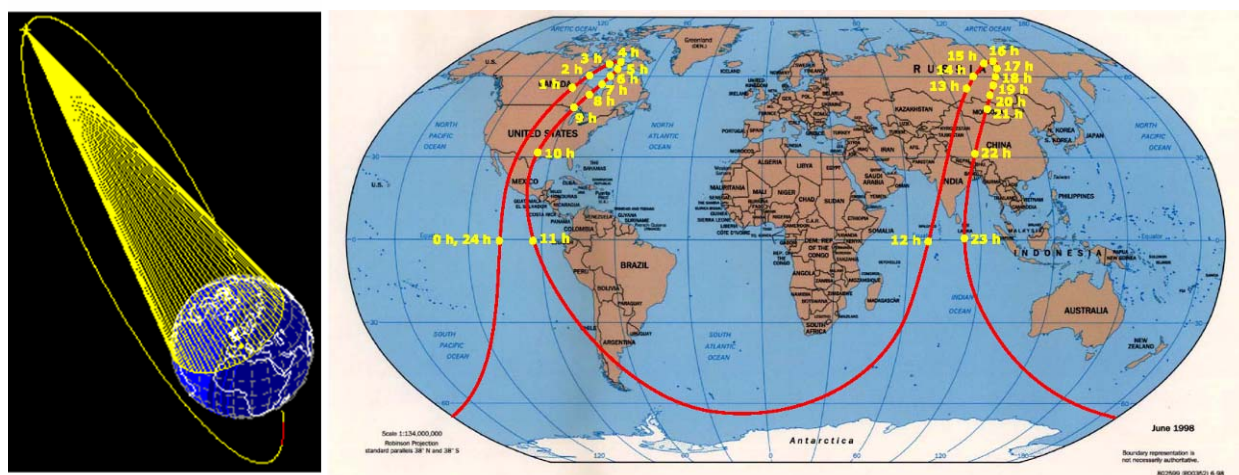
For å kunne oppnå nær permanent dekning i polområdene benyttes en spesiell type HEO (elliptiske) baner: Molniya baner. Slike baner er kraftig ellipseformet (apogeum ca 40.000 km og perigeum ca 500 km), og har en inklinasjon på 64 grader. Dette gjør at satellitten ser polområdet ca 11 timer av den 12 timer lange omløpstiden. Det har til nå vært nordområdene som har vært dekket på denne måten, og det har vært russerne, som fra 1960-tallet og utover, har utviklet og vært den største brukeren av Molniya baner. Hovedanvendelsen er kommunikasjon, og for å oppnå kontinuerlig dekning av polområdet må en benytte 3 satellitter i en konstellasjon.



Figur 2.10 En satellitt i geostasjonær bane vil "se" ca 40% av jorda på én gang



Figur 2.11 Satellitter i polare baner vil dekke jorda etter hvert som jorda roterer. Panelet til høyre viser hvordan en satellitt beveger seg i forhold til jordoverflaten når jorda roterer under den.



Figur 2.12 Molniya-bane og hvordan den dekker polområdet. den røde kurven på kartet viser hvordan punktet rett under satellitten flytter seg i løpet av ett omløp. Eksemplene på klokkeslett viser at satellitten bruker lang tid på delene av banen som er over nordlige halvkule, dvs. når satellitten er lengst unna jorden.

## 2.3 Oppskyting

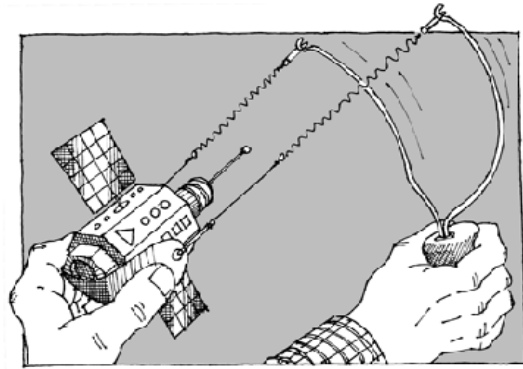
En satellitt har ingen egen evne til å komme fra jorden og opp i sin bane. Til dette trengs ekstern hjelp i form av en bærerakett. Det finnes et begrenset antall steder i verden hvor en slik bærerakett kan skytes opp. Dette på grunn av de spesielle kravene til et oppskytningssted med tanke på hvilken bane satellitten skal til, krav til sikkerhet for omgivelsene, og dominerende værforhold. Selve oppskytingen planlegges lang tid i forveien, og mange ting skal samordnes og klaffe for å oppnå suksess.

En utfordring er å bringe satellitten inn i den ønskede banen. Dette skjer normalt i flere faser, både for å kontrollere prosessen og for å utnytte brennstoffet til hjelpemotorene på en effektiv måte. Etter å ha plassert satellitten i en sirkulær parkeringsbane, startes en hjelpemotor. Denne bringer satellitten via en overføringsbane til den endelige banen (Figur 2.15).

### 2.3.1 Bærerakett

Bæreraketten har som eneste oppgave å bringe satellitten fra jordoverflaten til sin bane rundt jorden. Etter at oppgaven er utført vil bæreraketten brenne opp i atmosfæren. En rekke bæreraketter er vist i Figur 2.16.

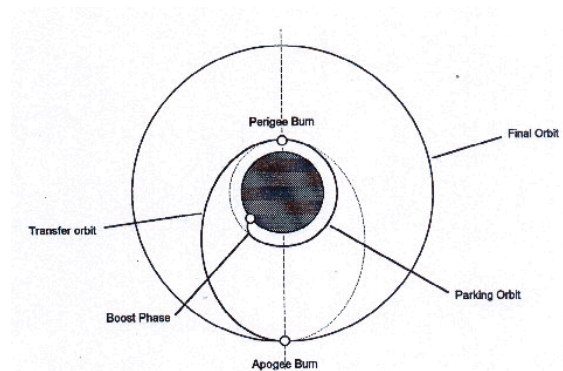
Den maksimale vekten av satellitten som skal bringes i bane er en viktig parameter for å karakterisere bæreraketten. Den russiske bæreraketten Soyuz 2, kan bringe en satellitt på 7 tonn til 200 km (lav jordbane). Den samme bæreraketten kan også bringe satellitter ut til 36.000 km (geostasjonær bane), men da kan ikke satellitten veie mer enn 1,5 tonn. Bæreraketten begrensede energi (drivstoff) setter grenser for kombinasjonen av vekt og banehøyde.



Figur 2.13 Å plassere en satellitt i bane er en kritisk prosess



Figur 2.14 En bærerakett starter ferden for å bringe en satellitt i bane.



Figur 2.15 Satellittens ferd mot den endelige banen



Bæreraketten som lages i dag har fra 1 til 5 trinn (Figur 2.17), dvs. rakettmotorer som startes etter hverandre. Flere trinn gjør at en kan bruke motorene mer fleksibelt, og optimalisere drivstofforbruket.

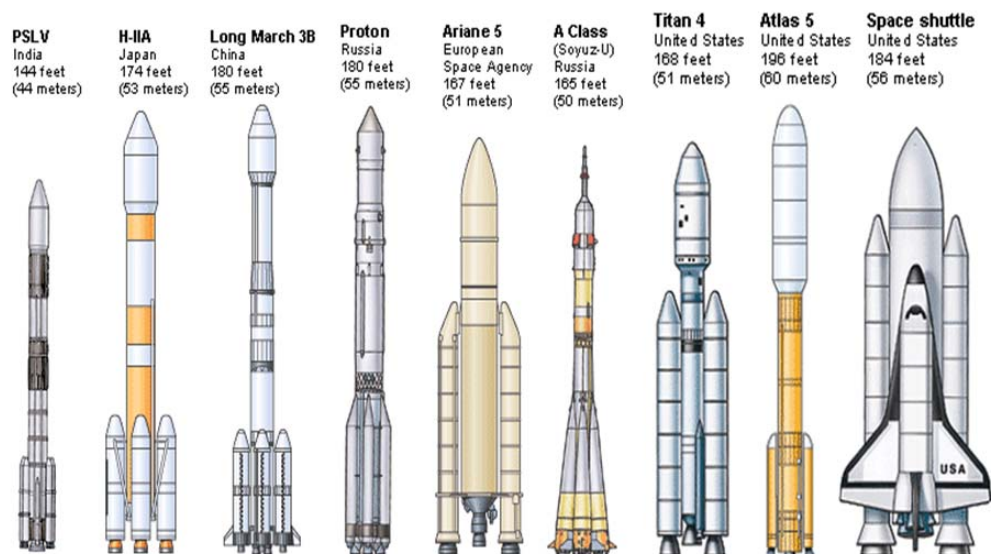
Det er i dag 10-15 land som har behov for, og økonomi til å produsere bæreraketter. I tillegg til de store landene (stormaktene), finnes det mindre land som har militære anvendelser for sine satellitter, og ønsker å

være uavhengig med hensyn til bærerakett.

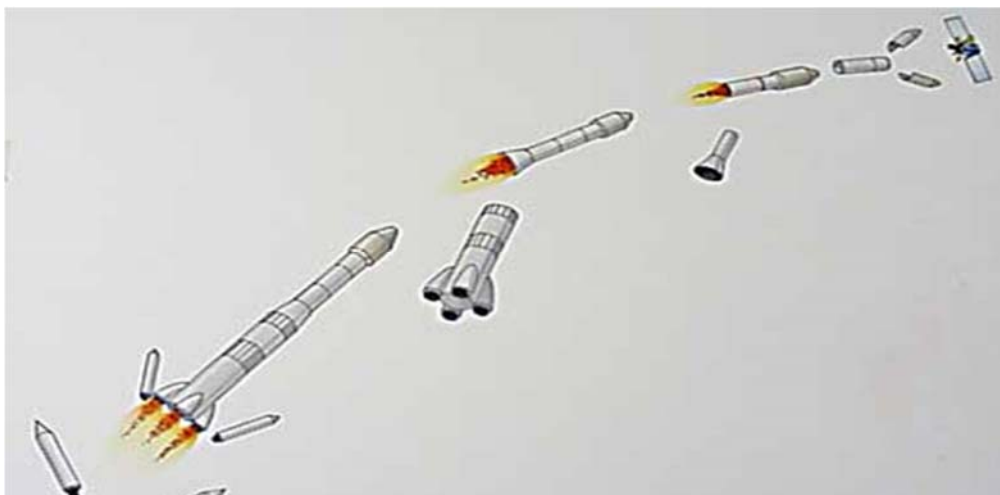
### 2.3.2 Oppskytningssted

Et oppskytningssted må ha god sikkerhet for det tilfellet at oppskytingen i noen grad er mislykket. Dette forutsetter ofte at oppskytingen må foregå mot åpent hav eller mot øde landområder.

Det er registrert 22 oppskytningssteder i verden, fra kjempeanlegg som amerikanske



Figur 2.16 Et utvalg av store bæreraketter



Figur 2.17 En flertrinns bærerakett

Cape Canaveral til vår egen Andøya skytefelt. Stedene er godt spredt med to eller flere anlegg i hver verdensdel.

Jordrotasjonen utnyttes ved oppskytingen ved at raketten pekes med jordas rotasjonsretning. Siden hastigheten på overflaten er størst ved ekvator og avtar mot polene, vil også bæreraketten få størst ”drahjelp” fra jorda nær ekvator. At avstanden fra ekvator har betydning kan vises ved at en Soyuz 2 bærerakett kan bringe ca 9 tonn i 200 km bane ved oppskyting fra Kourou (5 grader nord), og kun ca 7 tonn til samme bane ved oppskyting fra Plesetsk (63 grader nord).

For å kunne foreta oppskytinger fra ekvator begynte en i 1999 å benytte en modifisert boreplattform kalt ”Sea Launch”. Plattformen ligger i Stillehavet utenfor vestkysten av USA, og til nå er 24 raketter skutt opp. Norsk industri (Aker/Kværner) er medeier i prosjektet, og har ansvaret for plattformen og fartøyet som bringer raketten til plattformen.

## 2.4 Bakkesegmentet

Bakkesegmentet i et satellittsystem består av to hoveddeler som kan være fysisk atskilt eller samlokalisert: Den ene delen er en stasjon for å styre og kontrollere satellitten. Her gis kommandoer som påvirker satellittens drift, og her mottas signaler som beskriver satellittens tilstand. I dette elementet inngår ogsåfølging av satellittens bane (posisjon) til enhver tid. Til dette kan benyttes en radar eller laser i tillegg til peiling av signalene fra satellitten og GPS.

I tillegg vil satellitten ha en eller flere brukere som har behov for kontakt ved at de sender til satellitten, mottar fra satellitten, eller begge deler. Brukerne kan ha egne stasjoner

knyttet til nyttesignalene, helt ned til den enkelte person (satellittelefon).

Lokalisering av slike bakkestasjoner er ofte avgjørende for effektiviteten for hele satellittsystemet. Geostasjonære satellitter krever selvsagt at stasjonene som kommuniserer med den er i synsfeltet til satellitten. For andre baner vil satellittens posisjon endre seg, og det er snakk om enten å ha flere stasjoner fordelt rundt på planeten for å ha kontinuerlig kontakt via minst én av dem om gangen, eller at stasjonen(e) plasseres slik at satellitten kommer over dem så ofte som mulig. For polarbanesatellitter betyr dette at det er en fordel å ha stasjoner nær polene. Dette gjelder de fleste jordobservasjonssatellittene. De foretar 14-15 omløp i døgnet. SVALSAT stasjonen på Svalbard kan kommunisere med disse satellittene for hvert omløp. I Tromsø kan stasjonen der kontakte satellittene 10-11 ganger pr døgn. Det samme gjelder den nyanlagte stasjonen ved Troll basen i Antarktis. Stasjonene til Kongsberg Satellite Service er derfor svært attraktive for mange av satellittoperatørene globalt.



Centro de control - ESOC (ESA)

Figur 2.18 *Kontrollcenter*

### 2.4.1 Kontrollsenter

Kontrollsenteret er satellittsystemets hjerne. Her har personell full kontroll over satellitten ved at de til enhver tid overvåker satellittens tilstand, og kan styre dens viktigste funksjoner. Mange satellitter kan operere ulike nyttelaster til ulike tider, eller ha en nyttelast som kan slås av og på eller veksle mellom forskjellige operasjonsmodi. Kontrollsenteret har derfor ansvaret for å oppdatere og eksekvere operasjonsplanen for satellitten, generere kommandoer for opplink til satellitten, og analysere tilstandsdata som kommer tilbake fra romsegmentet. Det er svært viktig at kommandoene som skal opp til satellitten ikke inneholder feil. Det er derfor ikke snakk om å sette dem opp manuelt via tastaturet. Meldingene genereres som bestemte tegnstrenger som velges fra en meny som har vært gjennomprøvd, enten før satellitten ble skutt opp, eller ved kommandering av en nøyaktig kopi som oppbevares på bakken.

Overvåkings- og kommandofunksjonen kalles ofte for Tracking, Telemetry and Control (TT&C eller TTC). Mange kontrollsentra har egne antenner for å kommunisere med satellitten, men velger ofte å supplere med bruk av kommersielle stasjoner som SVALSAT eller den i Fucino (Italia).

### 2.4.2 Nyttesignaler

I forbindelse med satellittens funksjon utføres det normalt en utveksling av informasjon mellom satellitten og brukeren. For kommunikasjonssatellitter er dette satellittelefoner som f.eks. Iridium eller brukerterminaler som de forskjellige Inmarsat terminalene er eksempler på. For navigasjonssatellitter kommer alle GPS mottakere i denne kategorien.

For jordobservasjonssatellitter er det derimot ofte snakk om større installasjoner for nedlesing av store datamengder fra de ulike sensorene. Datamengdene på de mest avanserte satellittene kommer ned med 300 megabits per sekund eller mer. Det kreves spesialelektronikk for å håndtere slike hastigheter, noe som f.eks. er installert på Svalbard, i Tromsø og ved Troll-basen i Antarktis.

Med unntak av de geostasjonære satellittene og noen svært enkle LEO satellitter, må antennene være konstruert for å følge satellitten over himmelen i det den kommer over horisonten. Som regel vet stasjonen ca når satellitten kommer, og hvor den stiger opp over horisonten, ettersom dette kan beregnes fra satellittens banedata. Antennen for nedlesing må dermed pekes mot der satellitten kommer over horisonten, og være i lyttemodus. De mest avanserte antennene har flere mottakere der signalet kan analyseres fortløpende for å peile retningen til satellitten. ”billigere” versjoner må fortelles fortløpende ved hjelp av beregninger hvordan antennen skal dreies for å følge satellitten. Retningsfølsomheten til jordstasjonens antenne øker med økende diameter, slik at større antenner må ha en større pekenøyaktighet enn mindre antenner. Dette setter store krav til motorene og mekanikken som skal styre antenner på typisk 10-13 m i diameter. Spesielt når satellitten går ”rett over hodet” på jordstasjonen, endrer pekeretningen for antennen seg fort. Motorene til en 13 m ”tracking antenne” er derfor kraftige, og det er faktisk livsfarlig å komme for nær, spesielt når antennen er montert inne i en kuppel (radom) for å beskyttes mot vind og nedbør.

Signalene som mottas av antennen i jordstasjonen mates gjennom en mottaker for å digitaliseres. I første trinn blir det elektriske

signalet konvertert til bits (0'er og 1'er), som kommer ut sammen med et tidssignal. I eldre systemer (bygget på 1990 tallet) går signalet ut på spesielle magnetbånd i stor hastighet. Dette ble gjort fordi elektronikken for videre bearbeiding ikke var rask nok, og magnetbåndene måtte spilles av med ca ¼ av opprinnelig hastighet for at datamaskinen skulle kunne omforme bits til bytes og dekode signalet videre for lagring på disk. I dagens systemer går det fint å lagre til direkte til disk, og magnetbåndene brukes kun som reserveløsning. I forbindelse med skriveing på datadisen, analyseres signalet også for eventuelle feil som skyldes atmosfæreforstyrrelser under nedlesing og eventuelle andre uregelmessigheter i satellitten.

Når dataene er lagret på disk må de bearbeides videre for å lage bilder eller andre datafiler. Detaljene i prosesseringen avhenger av instrumentet som er brukt i innsamlingen. Vi beskriver detaljer rundt prosesseringen etter at instrumentkategoriene er omtalt nedenfor.

## 2.5 Hvordan bygges en satellitt?

Her gjennomgår vi fasene i utviklingen og byggingen av en satellitt – mest for å klargjøre noe av terminologien som kommer opp i vurdering av satellittbruk på Svalbard.

Vi tenker her på en satellitt som skal brukes – for eksempel av europeiske myndigheter – til miljøovervåking. Fremdeles er det sånn at svært få satellitter serieproduseres. Selv de vanligste kommunikasjonssatellitter og værsatellitter bygges i svært små serier, og endres en del under byggingen. Derfor bærer de fleste satellittprosjektene preg av å være utviklingsprosjekter med en betydelig teknisk og økonomisk usikkerhet. Prosjektet tar ofte vesentlig lenger tid enn planlagt.

RADARSAT-2 byggingen var et slikt prosjekt.

En satellitt utvikles gjennom flere faser. Er det en helt ny type sensor, kalles gjerne den første fasen Fase 0 (null). Merkelig nok betegnes de påfølgende fasene med bokstaver.

**Fase 0:** Utgangspunktet er at brukerorganisasjonen(e), som ofte uten satellittekspertise, har en vag idé om hva de vil observere fra rommet. Det må gjøres undersøkelser om dette lar seg gjøre (mulighetsstudie, feasibility study) og hva slags instrument(er) som trengs. Vurderingene gjøres kanskje ved hjelp av avanserte numeriske simuleringer eller ved å bygge en eksperimentell sensor for laboratorie- eller flyttester. Ofte medfører eksperimenteringen at nye løsninger eller metoder utvikles. Teknologien videreføres og modnes.

Dersom Fase 0 konklusjonene er positive kan den detaljerte planleggingen starte.

**Fase A:** I denne fase kartlegges detaljene om hva de fremtidige satellittbrukerne trenger. Hva skal måles, hvor ofte og med hvilken følsomhet og nøyaktighet? Dette har betydning for valg av sensor, bane, satellittbuss og bærerakett. Fase A avsluttes ofte med en såkalt Preliminary Design Review (PDR). Fase A har også stor betydning for hvem som blir valgt som leverandører for de forskjellige hovedsystemene.

**Fase B:** Nå kan de enkelte delene av systemet konstrueres i detalj. Dette gjelder satellittbuss, nyttelast, kommunikasjonssystemer, bakkestasjoner for både satellittkontroll og nedlesing av satellittbilder mm. Det gjøres flere eksperimenter med en mer realistisk testsensor. Fase B avsluttes med Critical

Design Review (CDR). CDR kan gjerne foregå i flere trinn, der de enkelte hoveddelene gjennomgås hos hver av leverandørene. CDR for systemet som helhet gjennomføres til slutt sammen med hovedleverandøren.

**Fase C:** I fase C starter byggingen av de enkelte hovedsystemene, for både bakke-segment og romsegment. For romsegmentet bygges som oftest en testversjon for å verifisere at alle beregninger om vekt og vektfordeling, robusthet mm stemmer. Denne versjonen går gjennom svært grundige mekaniske, elektriske og miljøtester. Her er det om å gjøre å fylleriste svakhetene ut av satellittkonstruksjonen! Den varmes opp, nedkjøles, utsettes for vakuumentester, og ristes tilsvarende betydelig større påkjenninger enn det som forventes under oppskyting. Komponenter som ikke har vært i rommet før utsettes for stråling for å sjekke robusthet og levetid. Alle kontrollsystemene for hjelpemotorer, kommunikasjon med bærerakett, bakkestasjoner, instrumenter mm må testes for å sjekke at de fungerer – både enkeltvis og sammen.

**Fase D:** I denne fasen bygges satellitten som faktisk skal opp. Også i denne fase gjøres det grundige tester – spesielt for å påse at det ikke foreligger produksjonsfeil i de enkelte komponentene. Instrumentene kalibreres og utfoldingsmekanismer gjennomgår de siste generalprøvene. Alt går gjennom såkalt Acceptance Testing, både hos underleverandører og hovedleverandør. Når alt er klart gjennomgås en Flight Readiness Review, og satellitten pakkes for utskipping til oppskytingsstedet.

**Fase E:** Denne kalles ofte for ”Launch Campaign”. Satellitten pakkes ut og kontrolleres før den monteres på bæreraketten. Sis-

te milepæl før oppskyting er ”Launch Readiness Review”.

**Fase F:** Fase F starter med selve oppskytingen. Denne første delen av Fase F kalles Launch and Early Orbit Phase (LEOP). LEOP fasen er spesielt kritisk fordi den for det første innebærer oppskytingen, der risikoen for katastrofale ulykker/feil er størst, og fordi den videre gangen i utplasseringen av satellitten krever at satellitten og bæreraketten skiller lag, at solcellepanelene folder seg ut for å generere strøm før batteriene utlades, og at kontrollstasjonen(e) oppretter forbindelse med satellitten og kan forta eventuelle nødvendige korreksjoner i satellittens orientering og bane for at den skal kunne fungere som planlagt. Svalbard har en unik plassering for å støtte LEOP fasen for alle polarbanesatellitter fordi den vil gi hyppige muligheter til å kommandere satellitten både rutinemessig og i nødssituasjoner i denne kritiske fasen. LEOP avsluttes normalt når satellitten er i sin endelige bane.

Det er først når LEOP fasen er avsluttet at satellittens instrumenter kan begynne å fungere. For en radar er det første som må skje at antennen foldes ut. For radaren er dette like viktig som utfoldingen av solcellepanelene er for hele satellitten. Dernest kan radaren slås på og de første systemtestene begynne. For små satellitter kan instrumentene slås på i løpet av de første 2-4 dagene. For større og mer kompliserte satellitter er det gjerne en uke eller mer før de første bildene kan tas.

Med tanke på eventuell militær nytte, er det derfor svært usannsynlig at en satellitt kan brukes i LEOP fasen – verken til militær eller andre anvendelser.



Etter LEOP fasen følger det gjerne en *Commissioning Phase* der satellitt-instrumentene gjennomgår utprøving i alle modi, blant annet for å kalibreres, bakkestasjonene ferdigtestes og prøvebilder er anvendt i tester hos brukerne/eierne av satellitten. Etter Commissioning Phase starter normale operasjoner som fortsetter gjennom hele levetiden til satellitten.

Når slutten på satellittens levetid nås, enten fordi den slutter å fungere som den skal, drivstoffet er oppbrukt, eller fordi den har gjennomført oppgaven den var tiltenkt, vil satellitten enten manøvreres til en bane hvor den ikke går i veien for andre operative satellitter, eller slik at den vil entre jordens atmosfære og brenne opp. Førstnevnte alternativ brukes for geostasjonære satellitter, mens jordobservasjonssatellitter i LEO bærer får sistnevnte skjebne.

Spesielt for satellitter som ikke forventes å falle ned og brenne opp innen få måneder eller år, er det blitt krav om at satellittene skal sikres mot kollisjoner og eksplosjoner. Dette er for å unngå ytterligere forurensning av rommet med tilhørende fare for operative satellitter og bemannede romfartøy.

### 3 Anvendelser

Anvendelser av satellitter kan grovt deles i fjernmåling, kommunikasjon og navigasjon. Fjernmåling består i å la satellitten bruke sensorer som registrerer det elektromagnetiske spektrum for å bestemme egenskapene til fenomener på jorden. Kommunikasjonssatellitter utnytter plasseringen på himmelen, hvor informasjonen som sendes opp kan ”speiles” ut over store områder. For navigasjon benyttes svært tidspresise signaler fra

satellitter som referanse ved bestemmelse av posisjon til f.eks. en GPS mottaker.

#### 3.1 Fjernmåling

Når observasjoner og målinger av et objekt eller fenomen skjer på avstand fra selve måleobjektet eller fenomenet, kaller vi det fjernmåling. Normalt er avstanden stor og sensoren plassert over hva som observeres. Eksempler på plattformer for fjernmåling er fly, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) og satellitt. Målingene består i å registrere elektromagnetisk stråling i varierende frekvensområder. Vi skiller mellom passive og aktive sensorer. De passive sensorene måler den naturlige strålingen fra objektene. Aktive sensorer bestråler objektet og registrerer tilbakestrålingen.

##### 3.1.1 Sensorer og elektromagnetisk stråling

Sensoren registrerer elektromagnetisk stråling i et spesifikt bølgelengdeområde, og gir ut en verdi som funksjon av strålingsintensiteten. Hvilke bølgelengdeområder som det måles på avhenger av hva som er tilgjengelig og hva som kan ha nytteverdi.

Elektromagnetisk stråling utsendes som bølger dvs. i et kontinuerlig oppadgående og nedadgående mønster (sinusbølge). Strålingen beskrives ved sin amplitude og bølgelengde. Amplituden er det maksimale utslaget i bølgen, mens bølgelengden er lengden av en repetisjon av bølgen. For å forstå at bølgen har en lengde, må en vite at all elektromagnetisk stråling utbres med lysets hastighet. Frekvens er en annen måte å beskrive hvor raskt bølgen svinger, og uttrykkes som antall bølgerepetisjoner pr tidsenhet.

Før elektromagnetisk stråling som benyttes i fjernmåling (hovedsakelig stråling fra sola) når jordas overflate, må den passere atmosfæren. Partikler og gasser i atmosfæren samvirker med elektromagnetisk stråling på flere måter, hvor absorpsjon og tilbakespredning påvirker strålingen mest. Ved absorpsjon tar stoffer opp strålingsenergien, mens ved tilbakespredning blir strålingen tilbakereflektert. I begge tilfeller hindres strålingen i å nå jorda.

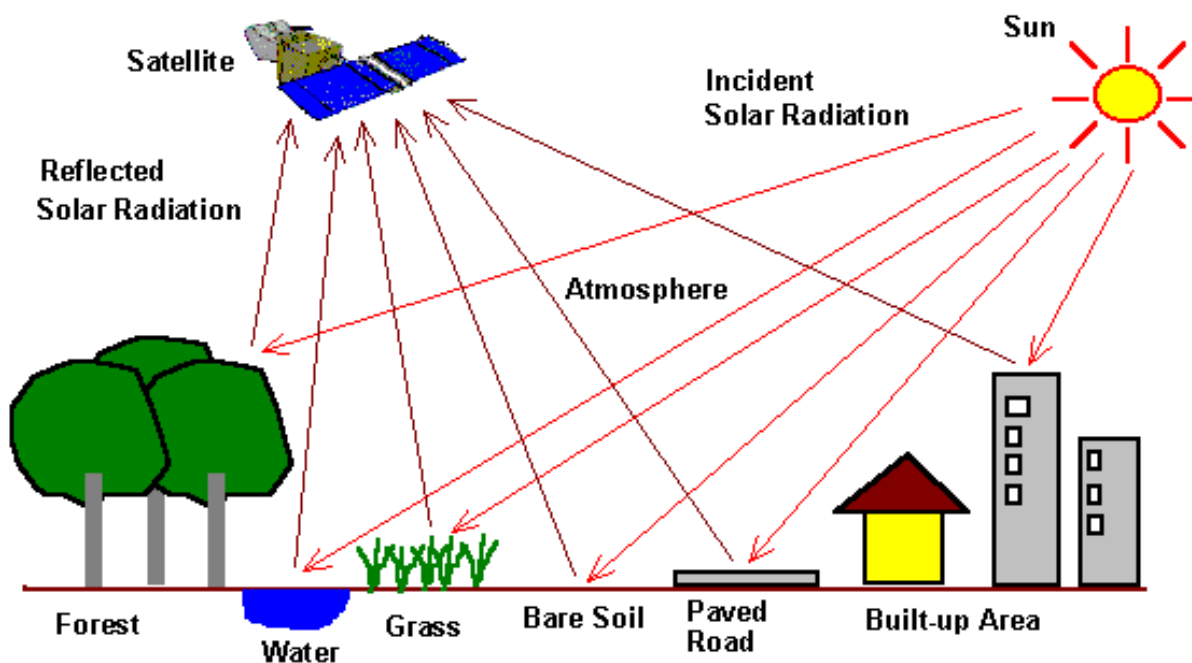
### 3.1.1.1 Avbildning med synlig lys

Elektromagnetisk stråling som kan oppfattes av det menneskelige øye, kaller vi synlig lys, eller bare lys. Bølgelengdeområdet for lys går fra ca 400 nm til ca 700 nm, hvor nm står for nanometer ( $10^{-9}$  meter = 0,000000001 meter, eller en milliondels millimeter). Vi må være glad for at naturen er slik innrettet at solen har sitt maksimum av stråling innen området for synlig lys, og at

atmosfæren er gjennomsiktig i dette bølgelengdeområdet (minimal absorpsjon og tilbakespredning unntatt i skyer). De fleste fjernmålingssatellitter avbilder synlig lys. Da tolker vi bildene best, siden dette er dette spektralbåndet hvor vi normalt opplever verden. Det er viktig å innse at dette er kun en liten del av den totale elektromagnetiske strålingen. Det finnes elektromagnetisk stråling, ikke synlig for det menneskelige øye, som inneholder mye interessant informasjon.

Fargebilder er knyttet til våre øynes fargeopplevelse av omverdenen. En lar sensoren gjøre en oppdeling av det synlige spekteret i et rødt, grønt og blått spektralområde. Disse fargene kalles primærfargene, og kan ved kombinasjon representere alle farger i spekteret.

Om vi ikke deler opp det synlige spektralområdet, men bare registrerer intensiteten i

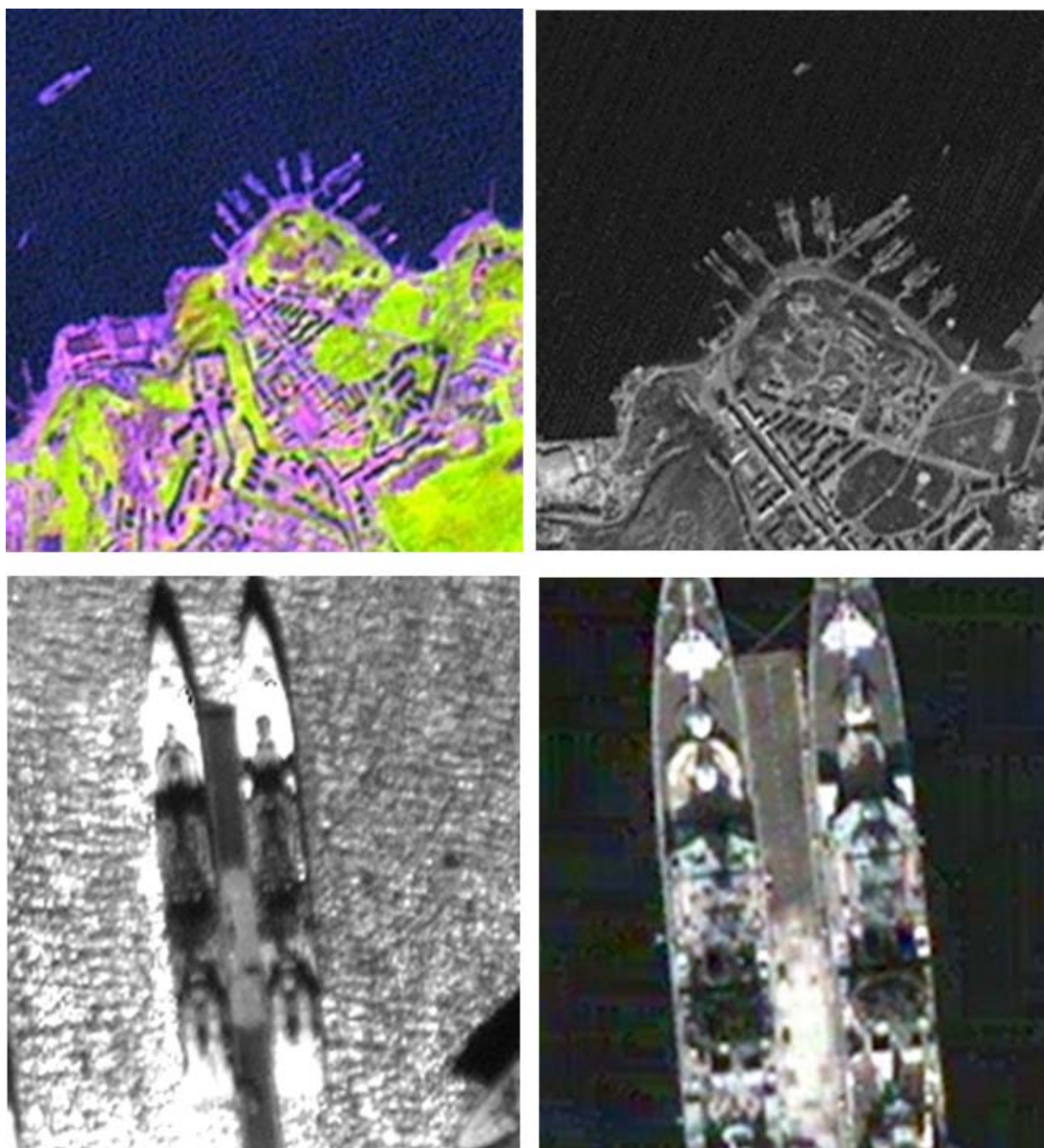


Figur 3.1 Skisse av hvordan stråling fra sola reflekteres fra jorda og avbildes fra en fjernmålingssatellitt

strålingen, mister vi fargeinformasjonen. Gråtoner kan representere intensitetsverdier, og vi får et gråtonebilde (svart/hvitt bilde).

Det er oppløsningen i bildene som avgjør detaljgraden (se Figur 3.2) og derav anvendelsesområdet. Digitale bilder, dvs. bilder

som er lesbare for en datamaskin og som kan vises på en skjerm, er oppdelt i bildepunkter (pikslar). En pikslars virkelige størrelse på bakken er bildets oppløsning. Dagens kommersielle fjernmålings satellitter har en beste pikseloppløsning på ca 50 cm. Det vil si at en piksel i bildet representerer en utstrekning på ca 50 cm på bakken.



Figur 3.2 Forbedring av oppløsning i kommersielle satellittbilder gjennom 15-20 år. Alle bildene viser den russiske marinebasen Severomorsk. Antall pikslar (bildepunkter) i hvert av bildene er det samme.

1. Landsat 32 m oppløsning
3. IKONOS 1 m oppløsning

2. SPOT 10 m oppløsning
4. Quickbird 0.6 m oppløsning

### 3.1.1.2 Infrarød

Strålingen fra bølgelengdeområdet over det synlige, fra  $0,7 \mu\text{m}^2$  (700 nm) til  $100 \mu\text{m}$  ( $100.000 \text{ nm}$ ), kalles infrarød (IR). Eksempler på bilde tatt i synlig lys og IR er vist i Figur 3.4-3.5. IR området kan deles i to kategorier etter strålingsegenskapene.

Det første området kalles reflektert IR, eller nær IR (NIR), og går opp til  $3 \mu\text{m}$ . Strålingen har den samme egenskap som lys, ved at strålingen kommer fra sola og når jordas overflate. Bølgeområdet har kartografiske anvendelser da det egner seg for å skille tørre og våte områder i bildet.

Det neste området kalles termisk IR, eller noen ganger bare IR, og dekker området fra  $3 \mu\text{m}$  til  $12 \mu\text{m}$ . Termisk IR er varmestråling



Figur 3.3 Avbildninger av BV-206 beltevoan. Øverst synlig lys, og nederst termisk IR.

fra jorda eller objekter på jorda. Meteorologiske satellitter benytter termisk IR for å måle temperaturen på jordoverflaten og på skyene. Varme er forøvrig knyttet til menneskelig aktivitet, og det termiske båndet kan derfor være av militær interesse, se Figur 3.3.

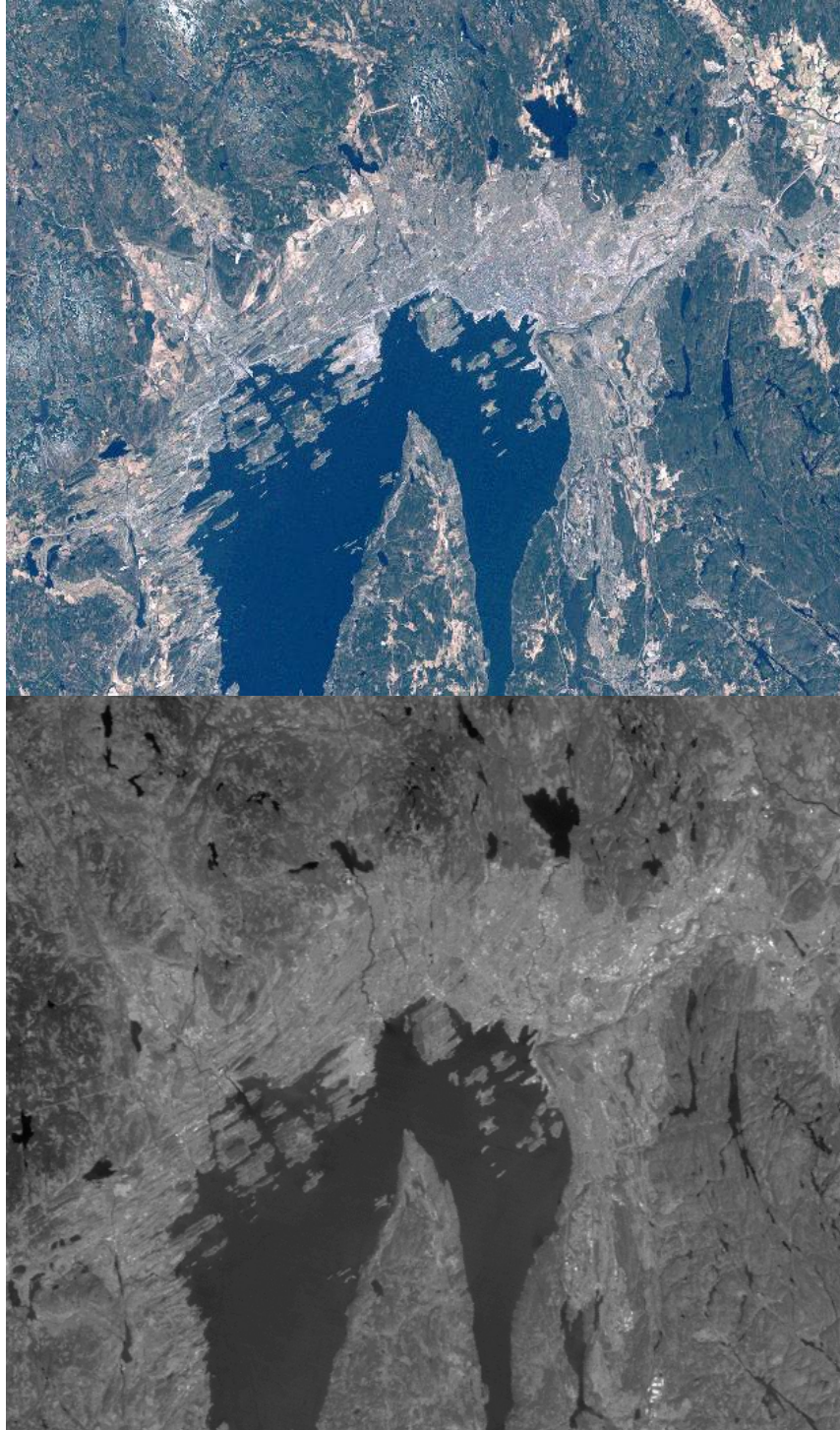
### 3.1.1.3 Multispektral avbildning

Den elektromagnetiske strålingen som mottas i sensoren er reflektert stråling fra sola. Det er objektet som reflekterer som setter sin "signatur" på strålingen ved å sende videre kun et utvalg av bølgelengder. En rød bil har mottatt den samme stråling fra sola som en blå bil ved siden av, men overflaten er forskjellig ved at den elektromagnetiske strålingen (innen det synlige området) kun reflekterer bølgeområdet vi forbinder med rødt. Utenfor det synlige området er det også elektromagnetisk stråling som vil reflekteres forskjellig, avhengig av egenskapene til stoffene som reflekterer.

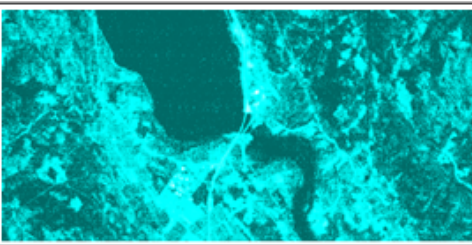
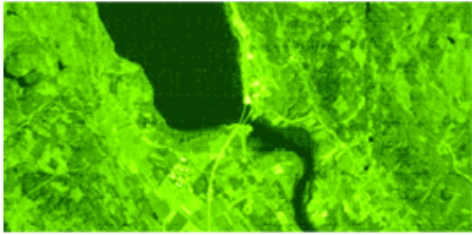
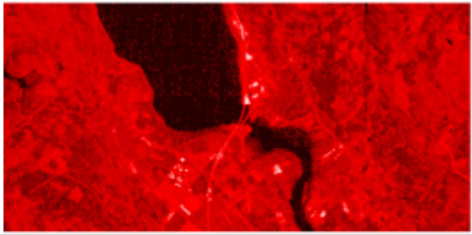
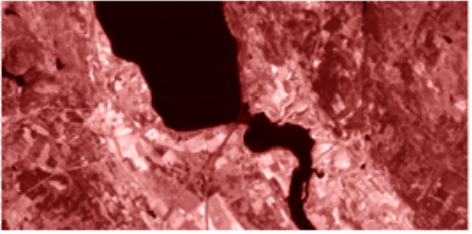
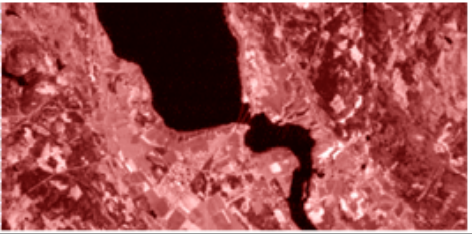
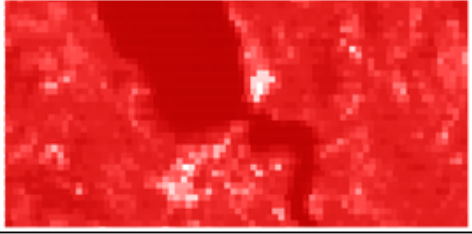
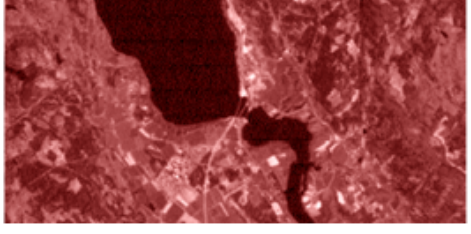
Satellittbasert multispektral avbildning har vært brukt i flere år for ressursplanlegging spesielt i den 3. verden. Anvendelsene er kartlegging av næringspotensial som jordsmonn, nyttevekster og avlinger. Det er også utviklet metoder som kan påvise forekomster av mineraler og olje.

<sup>2</sup>  $\mu\text{m}$ : Mikrometer, tusendels millimeter





*Figur 3.4 Satellittbilde tatt over Oslo 9. mai 2001. Satellitten LANDSAT 7 kan avbilde i 7 forskjellige spektralbånd. Øverst synlig lys. Nederst: Termisk IR.*

<p><b>Bånd 1: 0.45-0.52µm Blå/grønn</b></p> <p>Båndet har maksimal gjennomtregning i vann, og kan benyttes for kartlegging av dybder i grunt vann. Brukbar for å skille jordbunn fra vegetasjon, og løvskog fra barskog.</p>	
<p><b>Bånd 2: 0.52-0.60µm Grønn</b></p> <p>Båndet dekker refleksjonen i grønne planter, og kan benyttes for å vurdere deres tilstand.</p>	
<p><b>Bånd 3: 0.63-0.69µm Rød</b></p> <p>Båndet dekker absorpsjonen av klorofyll, og er viktig for å skille typer av vegetasjon.</p>	
<p><b>Bånd 4: 0.76-0.90µm Reflektert infrarød</b></p> <p>Båndet benyttes for å bestemme innhold av biomasse, og for kartlegging av kystlinje.</p>	
<p><b>Bånd 5: 1.55-1.75µm Reflektert infrarød</b></p> <p>Båndet indikerer fuktighet i jordbunn og vegetasjon. Gjennomtrenger tynnere skyer. Gir kontrast mellom typer av vegetasjon.</p>	
<p><b>Bånd 6: 10.40-12.50µm Termisk infrarød</b></p> <p>Båndet anvendes for termisk avbildning av jordoverflaten (land og vann). Avbildning i det termiske båndet har dårligere oppløsning (120 meter).</p>	
<p><b>Bånd 7: 2.08-2.35µm Reflektert infrarød</b></p> <p>Båndet dekker absorpsjonen av bestemte ioner i mineraler. Benyttes sammen med bånd nr 5 for analyse av mineralforekomster.</p>	

Figur 3.5 Eksempler på avbildning i 7 spektralbånd fra satellitten Landsat 7.

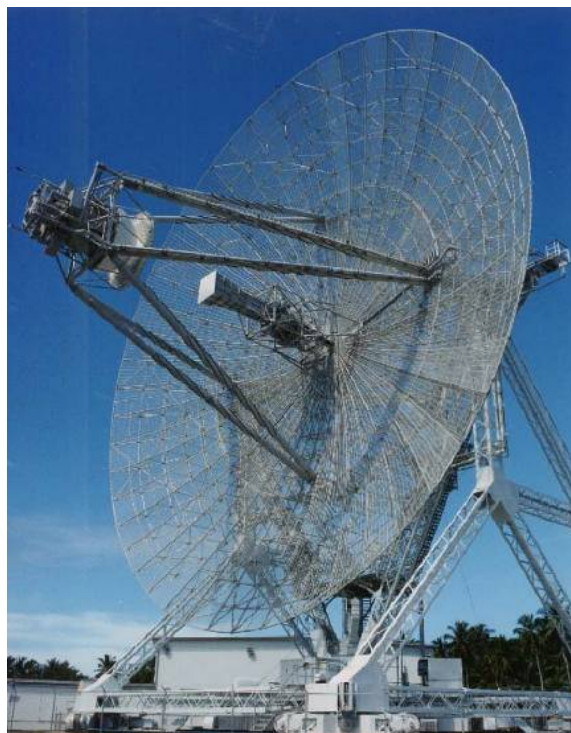


#### 3.1.1.4 Hyperspektral avbildning

Hyperspektral avbildning er fortsatt på forskningsstadiet som en videreutvikling av multispektral avbildning. Bølgeområdet fra synlig lys til nær IR benyttes, og deles opp i flere hundre smale bånd. Overflaten til objektene som reflekterer strålingen avgir sin "signatur". Objekter som er vanskelig å skjelle i forhold til omgivelser og bakgrunn i synlig lys og i radarbilder, kan ofte plukkes ut (detekteres) i hyperspektrale datasett. Om spektralsignaturen er entydig og kjent, er det i noen tilfeller mulig å bestemme objektets identitet. Metoden er både av sivil og militær interesse, og flere eksperimentelle sensorer er utprøvd på jordobservasjonssatellitter. Hyperspektral avbildning kan avsløre sykdommer i vegetasjon tidligere enn ved andre metoder. En kan bruke det til deteksjon av forurensning i vann, foreta artsbestemmelser av vegetasjon og alger, og avsløre noen former for kamuflasje. En utfordring er imidlertid at målingene produserer store datamengder, og krever omfattende dataanalyse. En prøver imidlertid å automatisere prosessen slik at den kan anvendes av personell uten spesielle forkunnskaper.

#### 3.1.1.5 Radar

De tidligere nevnte avbildninger er alle passive, ved at sensoren reflekterer stråling fra sola i utvalgte bølgebånd. Prinsippet for radar forutsetter imidlertid at bestrålingen av objektet skal foregå med elektromagnetiske pulser kontrollert i tid og form. Pulsene genereres og utsendes derfor fra sensoren, og radar kalles en aktiv sensor. Resultatet er en sensor som er uavhengig av dagslys og i noen grad skyer og nedbør (avhengig av frekvensen/bølgelengden som benyttes).



Figur 3.6 En radarantenne for luftovervåking.

Radar ble utviklet under 2.verdenskrig for militære formål, men anvendes i dag også for en rekke sivile formål. Mest kjent er navigasjonsradarer om bord i skip, værradarer for lokal værvarsling og overvåking av luftrommet for styring av flytrafikk. Radar anvendes også av privatpersoner til bruk i f.eks lystbåter.

I motsetning til anvendelsene nevnt over, vil radar fra satellitt benyttes mot jordoverflaten for å dekke store områder. Norske myndigheter benytter radarbilder fra satellitt til å overvåke de store havområdene som Norge forvalter.

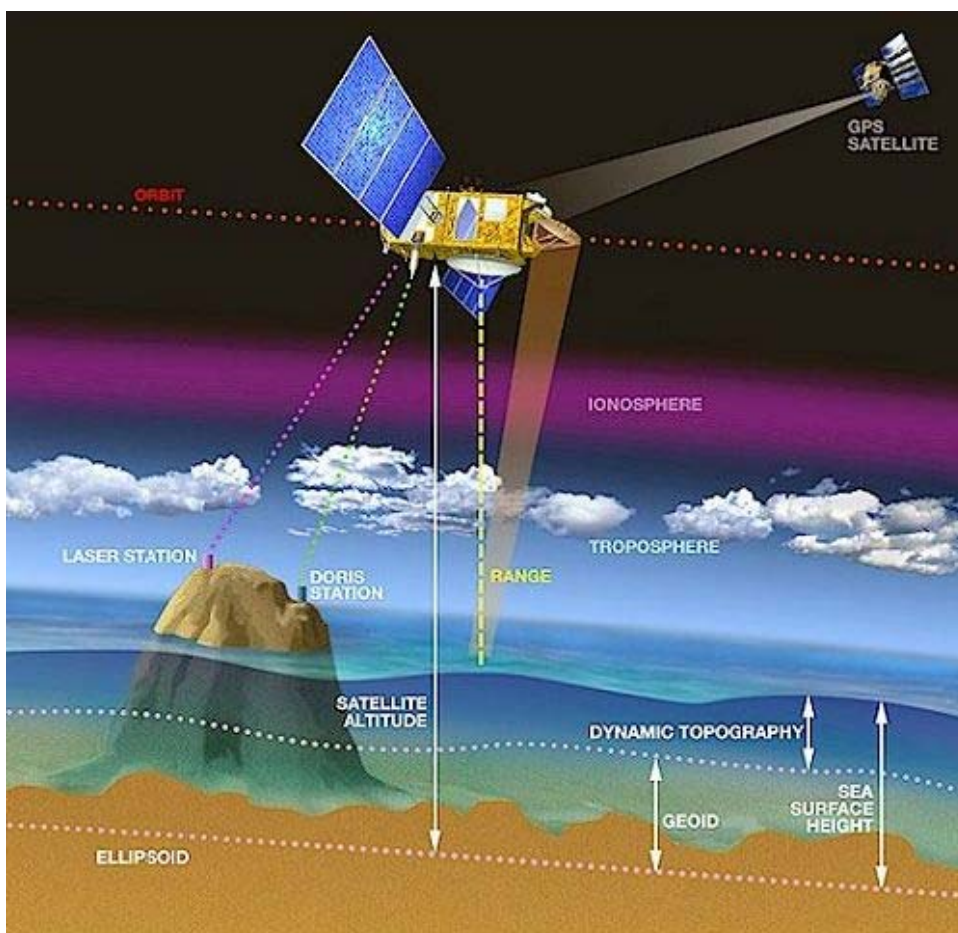
Det finnes flere typer radarer som brukes i satellitter. De mest vanlige er:

- Altimeter
- Scatterometer
- Syntetisk Apertur Radar (SAR)

Altimeteret er en høydemåler. Hovedprinsippet er å måle avstanden til jorda ved å sende en radarpuls rett ned mot jorda, og videre å måle tiden til pulsen er reflektert tilbake til satellitten. Altimeteret kan også brukes til å bestemme terrenghøyden på jorda med stor presisjon. "Fotavtrykket", radarpulsens dekning på jorden, vil være svært stor siden antennen på satellitten er relativt liten. Ved å utforme pulsen kan fotavtrykket reduseres, men er fortsatt flere km i utstrekning. Radar altimetre benyttes derfor hovedsaklig til å måle områder hvor høydevariasjonen er liten, som høyden på havet (se avsnitt 3.4) eller is høyden i polområdene. Ved å sette sammen enkeltmålinger med altimeter til striper, og stripene til arealer, dekkes tilslutt alle verdens hav. Det er flere satellit-

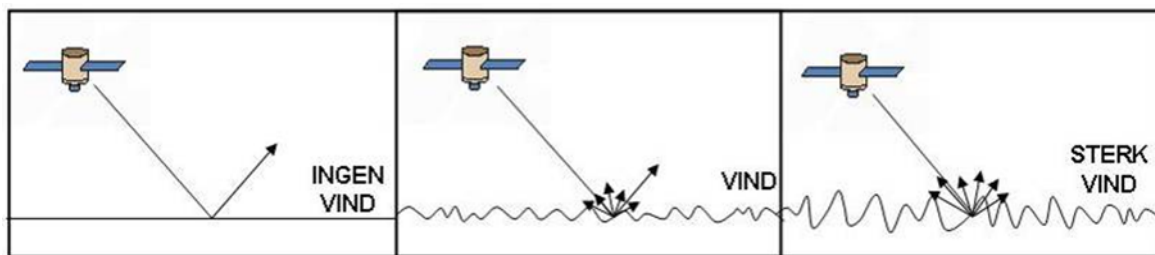
ter som foretar altimeter målinger: ERS-1 og -2, Geosat, ENVISAT, TOPEX og JASON-1 og 2 er noen av de mest brukte.

Et scatterometer (spredningsmåler) er en mer avansert og nøyere kalibrert radar, som brukes til å måle radarrefleksjon over større områder. Målingene gir blant annet informasjon om vindforhold på havoverflaten, samt overflatebeskaffenhets og fordeling av forskjellige typer vegetasjon på land. Hvis overflaten er blank, kommer det lite eller ingen signaler tilbake til radaren. Jo mer ujevn overflaten er, dess sterkere er det reflekterte signalet som kommer tilbake til antennen. Figur 3.8 viser hvordan dette virker på havoverflaten. Vindstille gir ingen refleksjon tilbake til satellitten. Når vinden



Figur 3.7 Måling av overflatehøyde fra satellitt





Figur 3.8 Radarrefleksjon (tilbakespredning) fra havoverflaten for forskjellige vindstyrker

Frekvens er et mål på hvor mange svingninger et signal (eller en pendel) har pr tidsenhet (typisk telles antall svingninger pr sekund. Vi måler da antall Herz (Hz)). Lyse (høye) toner har høy frekvens – Dype toner har lav frekvens.

Hvis en står på en båt som ligger for anker og teller bølgetopper som kommer forbi baugen i løpet av f.eks. 10 minutter, vil en få et mål på bølgefrequensen (0,1 Hz f.eks. betyr at det er 10 sekunder mellom bølgetoppene). Anta at bølgene er helt like over hele fjorden: Hvis båten kjører mot bølgene, vil baugen treffe flere bølger i løpet av 10 minutter enn hvis den ligger stille. For "bølgetelleren" på båten vil bølgene ha en høyere frekvens enn da båten lå stille. Det motsatte skjer når båten kjører med bølgene. Denne effekten kalles Dopplereffekten. Vi sier at signalet har en Dopplerforskyvning.

Likedan for lydsignaler: Når du sitter på et tog som kjører forbi en planovergang, har ringeklokken en lysere (høyere) tone når du nærmer deg overgangen enn når du har passert den og reiser vekk fra den.

Effekten gjelder også elektromagnetiske bølger i synlig lys og i radar signaler. Stjerner som beveger seg vekk fra vårt solsystem med stor hastighet har typisk mer høyfrekvent lys (rødere lys) enn de som nærmer seg.

Figur 3.9 Frekvens og Dopplereffekt.

øker, rettes en større andel av signalet tilbake mot radaren på satellitten.

Den mest avanserte bruken av radar består i å danne et bilde av bakken basert på dens refleksjonsevne for radarsignalene. Metoden kalles *syntetisk apertur radar* (SAR), og krever svært spesialisert og tidkrevende bearbeiding av de mottatte reflekterte signalene. Uttrykket syntetisk apertur kan oversettes til kunstig antennestørrelse. I stedet for å ha en lang antenne med tusenvis av antenne-

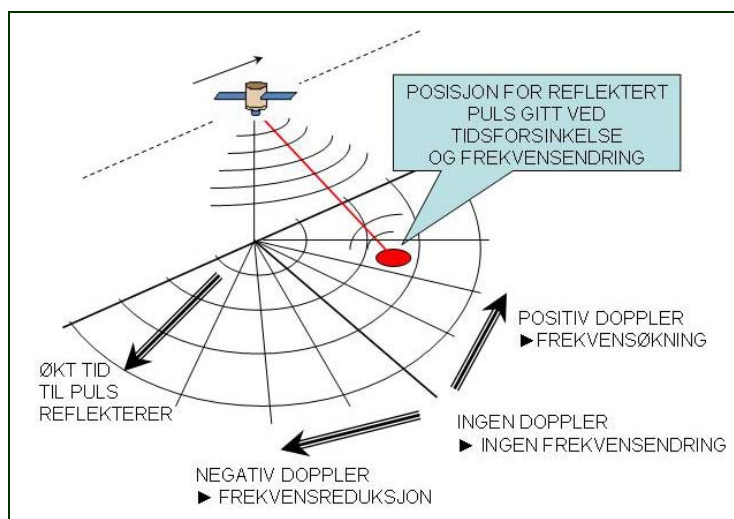
elementer etter hverandre, av antenneelementer (rekkeantenne), benyttes kun ett antenneelement som flyttes med satellitten bortover. En antar (later som) at ingenting beveger seg på jorda under opptaket. Om en tenker seg arealet som avbildes på jorda på skrå under satellitten, brukes tidsforsinkelsen fra radarpulsen sendes til den mottas, til å bestemme avstanden til punkter på bakken. Siden satellitten beveger seg vil det mottatte signalet ha en dopplerforskyvning (se forklaring i Figur 3.9) avhengig av hvor langt fo-

ran eller bak satellitten signalet ble reflektert. Det vil si at refleksjoner fra steder som ligger i forkant av satellittens bane vil returnere en høyere frekvens enn utsendt, og frekvensøkningen er større jo lenger foran det reflekterte punktet ligger (Figur 3.10).

Tilsvarende vil refleksjoner fra steder i bakkant av satellittbanen gi lavere frekvenser reflektert. Ved å kombinere informasjonen om hvor lang tid det tar før det reflekterte signal mottas (avstanden), og hvordan frekvensen har blitt endret (retningen), vil dette til sammen kunne stedfeste hvorfra signalet har blitt reflektert. Styrken av signalet viser refleksjonsevnen til punktet. Den begrensede oppløsningen oppnådd ved en enkelt puls, forbedres ved å bearbeide mange fortløpende pulser som dekker overlappende områder. Resultatet er en avbildning som viser refleksjonsevnen på jorda. Bildet ligner på mange måter et vanlig gråtonebilde (se Figur 3.11), men det er vesentlig å skjønne hvordan det er dannet for å kunne tolke det riktig. Lysere deler i bildet viser økt refleksjon for radar-pulsene, typisk representert ved metallisk materiale. Forskjellige stoffer vil reflektere ulikt, men som oftest oppnås en viss forstå-

else av bildet. En utfordring er hvordan refleksjonene i SAR bildene varierer med opp-taksvinkelen, og vanskeliggjør tolkningen av bildene. Den store fordelen med SAR er muligheten til opptak i mørke og gjennom skydekke.

SAR fra satellitt ble startet forsøksvis på slutten av 1970-tallet, og det finnes i dag flere SAR satellitter som benyttes operativt innen forskjellige anvendelser. Foreløpig er de fleste operasjonelle anvendelsene knyttet til overvåkning av havet, da tolkning av SAR bilder over land fortsatt er en utfordring, og krever mye spesialkompetanse. Det utvikles stadig nye og mer avanserte radar-instrumenter med nye kapasiteter. Ved å gå opp i frekvens (kortere bølgelengde) vil en kunne se mer detaljer. Det eksperimenteres også med flere polarisasjonsretninger, dvs. retningen på det elektromagnetiske feltet (horisontalt og vertikalt). En har sett at avbildningene endrer seg når en varierer polarisasjonsretningen.



Figur 3.10 Prinsipp for SAR. Skisse av en enkeltpuls. Fra tidsforsinkelse og frekvensendring bestemmes refleksjonsstedets posisjon.

Bølgebånd	Frekvensområde	Bølgelengdeområde
L-bånd	1-2 GHz	15-30 cm
C-bånd	4-8 GHz	3.75-7.5 cm
X-bånd	8-12 GHz	2.5-3.75 cm

Tabell 3.1 Bølgebånd benyttet for SAR.



Figur 3.11 Lillestrøm stasjon avbildet fra fly, 2. juni 2003. Synlig lys øverst, SAR nederst



I forskningsmiljøene bygger en seg nå opp en forståelse i bruken av forskjellige parametere, og hvordan de skal settes for å oppnå best mulig avbildninger under forskjellige forhold og til varierende anvendelser.

### 3.2 Prosessering av fjernmålingsdata

#### 3.2.1 Elektrooptiske data

Elektrooptiske data, dvs. data fra kameraer som tar bilder med synlig lys og IR, må som oftest gå gjennom enda en ”utpakking” før de kan brukes. På en vanlig datamaskin består hver byte av 8 bits. Bilder som vi ser på en dataskjerm består av en byte per piksel. Dagens kameraer er mer følsomme, og leverer ofte piksler med 10 eller 12 bits, hvilket er ukurant å bruke på en PC. Bildene må dermed justeres til 8 eller 16 bits pr piksel. For fargebilder må dessuten kanalen for hver farge skilles ut. Videre må kalibreringsdata anvendes på verdiene, slik at de kommer ut som fornuftige verdier, som f.eks. riktig skalert temperatur. En del systemer krever også korreksjoner for feil i kameraet. Bildene kan også være tatt på skrå, noe som gir skjevheter som må rettes opp. Til slutt tilføyes det tids- og lokalisering sin informasjon for opptaket, og detaljer om hva som er skjedd i prosesseringen, før bildene er klare til bruk.

#### 3.2.2 Radardata

Radardata må ofte gjennom utpakking tilsvarende elektrooptiske data. For å få den høye oppløsningen som oppnås med SAR, må de gjennom betydelig mer prosessering. Den syntetiske antennen må ”bygges” i datamaskinen, og måleverdien går gjennom digitale filtre som er avhengige av både satellittbanen og egenskapene til radarpulsene som er brukt. Da de første digitale SAR bildene ble produsert tidlig på 1980-tallet, tok

det ca 40 timer å produsere et bilde som satellitten brukte 15 sekunder på å ta opp. Da ble det også brukt mye spesialelektronikk. I dag går dette på 1-2 minutter på en litt kraftig arbeidsstasjon eller PC. Med spesialutstyr kan det gå på 15-30 sekunder, altså omtrent like fort som satellitten klarer å avbilde jorda.

### 3.3 Meteorologi

Meteorologi handler om de fysiske og kjemiske prosessene i de nederste lagene av atmosfæren, som vi populært kaller ”vær”. Værprediksjoner brukes av de fleste, fra fly- og skipsfart for å vurdere trygge ruter, til enkeltpersoner som vil planlegge påkledning og eventuell bruk av paraply. For å lage et værvarsel har meteorologene en modell, dvs. en beskrivelse av hvordan vær dannes, og trenger måleverdier å sette inn i modellen. Typiske parametere omfatter temperatur, trykk og fuktighet.

De vanligste satellittene for meteorologiske anvendelser benytter synlig lys (gråtone) og termisk infrarød (IR). Fra avbildning i synlig lys vil skyer og snø være lyse områder av meteorologisk interesse. Jordoverflaten vil være i mørkere gråtoner, mens innsjøer og hav vil være nesten sorte. Ulempen med avbildning i det synlige området er behovet for dagslys. Avbildning i det termiske bølgebåndet gir informasjon om temperaturen på jorda eller skylaget. Om temperaturskalaen i bildene bearbeides er det mulig å bestemme tykkelsen av skylagene. Ved å velge bestemte bølgebånd kan en bestemme vanndamp (water vapour) i øvre luftlag, som er viktig for bestemmelsen av det daglige vær.

Vær satellittene går både i polare baner og i geostasjonære baner. Satellittene i polare baner dekker jordkloden stripevis i løpet av 24 timer. Dette gjelder f.eks. de amerikanske

NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) satellittene som går i 860 km høyde og har en oppløsning på bakken på 1 km. Den europeiske meteorologiske institusjonen EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) har lenge hatt satellitter i geostasjonær bane med oppløsning med en oppløsning på 1 km (synlig lys). I 2006 fikk EUMETSAT sin første polarbanesatellitt, METOP-1, i bane. I tillegg til de ovenfor nevnte instrumentene har den et radar scatterometer for måling av vind på havoverflaten.

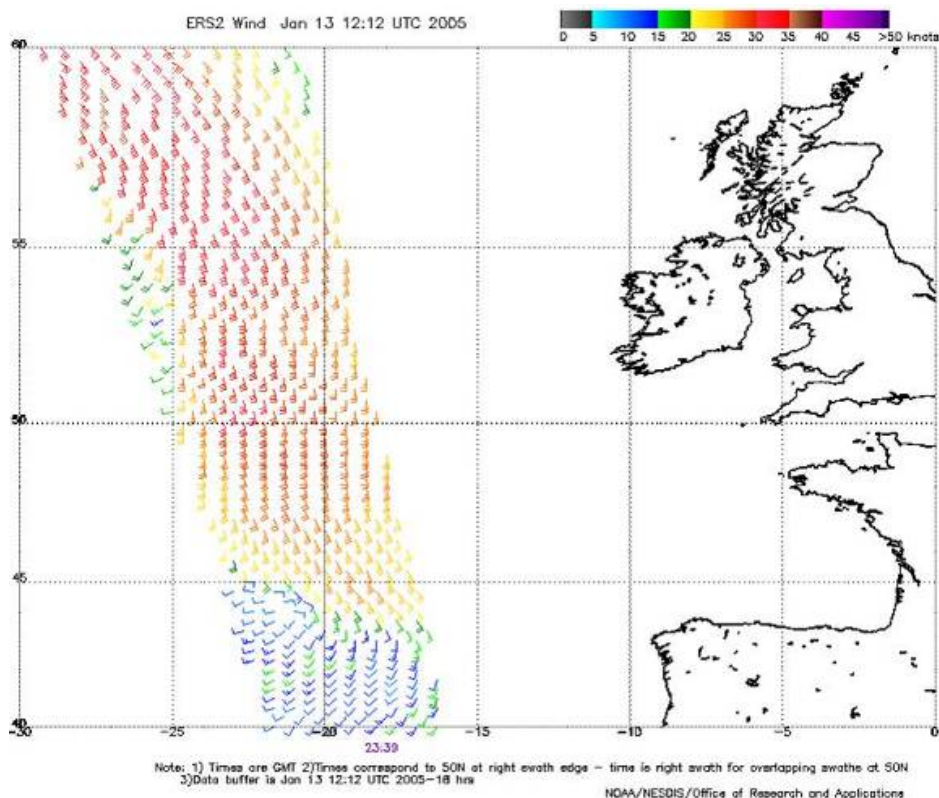
Vind setter opp krusninger og bølger på havoverflaten. Bølger vil ha varierende høyde og retning avhengig av vindens styrke og retning, og vil endre overflatens refleksjonsegenskaper for radarsignaler. Den reflekterte radarpulsen vil derfor inneholde informasjon

om vindforholdene (se Figur 3.12), om den tolkes riktig.

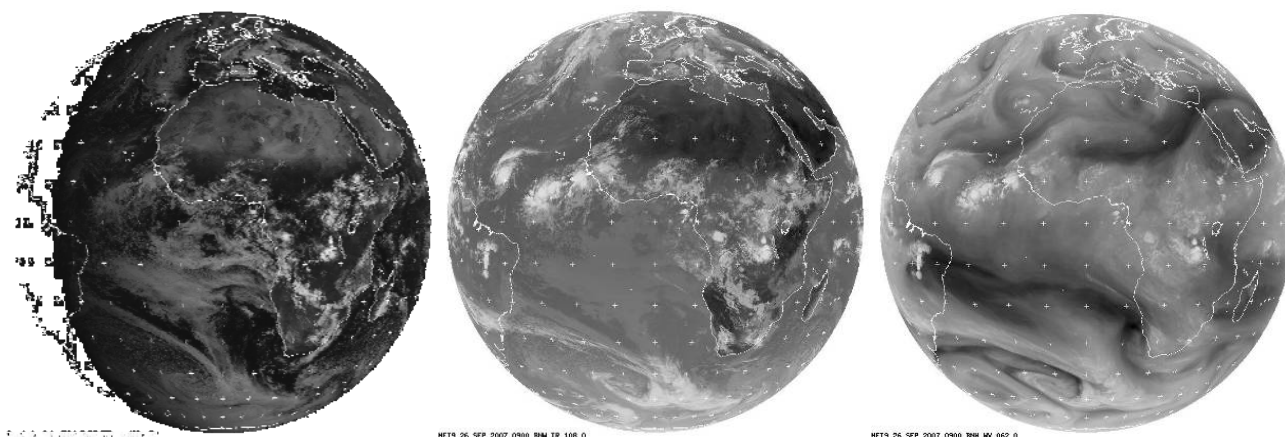
Meteorologi er en anvendelse som krever nær sanntids tilgang på sensorinformasjon. Kravet for leveranse av data fra de amerikanske vær satellittene er ca 20 minutter fra opptak til leveranse hos de store varslings-sentrene i USA. Dette gjelder mye av observasjonen som leses ned på SVALSAT.

### 3.4 Oseanografi

Oseanografi er studiet av havene. Faget kan deles inn fysisk og kjemisk oseanografi, samt marin biologi og for så vidt marin geologi. Satellittenes bidrag innen oseanografi er i hovedsak innen fysisk oseanografi, som har mye til felles med meteorologi, og til måling av planktonforekomster som en del av næringskjeden i marin biologi.



Figur 3.12 Vindstyrke og retning fra målinger med radar scatterometer



Figur 3.13 Bilder fra den europeiske, geostasjonære værsatellitten METEOSAT-9 på 26 sept 2007. Satellitten er plassert over nullmeridianen. Bildene illustrerer godt den begrensede dekningsen nær polene. Selv Nord-Norge er vanskelig å se.

Fra venstre mot høyre; synlig lys, infrarød, vanndamp (bearbeidet IR)

Satellitter med oseanografiske anvendelser overlapper ofte med satellitter med meteorologiske anvendelser siden typen sensorer er lik. Termisk IR benyttes for å bestemme overflatetemperaturen på havet. Nøyaktigheten er ca 0,5 grader, og relative endringer kan måles i brøkdeler av en grad. Bruken av satellitt framfor bakkebaserte sensorer er innlysende på grunn av de store områdene som kan dekkes fra satellitt, og mesteparten av jordas havområder dekkes daglig.

Vind og strømmer i havet vil avtegnes på overflaten ved variasjoner i bølgehøyden. Ved å bruke radar fra satellitt kan vi måle havets høyde. Det kan virke meningsløst siden havnivået nærmest pr definisjon er null, men det viser seg at havnivået varierer over kloden på grunn av temperaturvariasjoner, forskjeller i gravitasjon (massekonsentrasjoner) og påvirkning fra månen. Dessuten buler overflaten på grunn av variasjoner i vind og lufttrykk, og på grunn av havstrømmene, se Figur 3.14.

Målemetoden er beskrevet i avsnittet om radar.

Som for meteorologi er oseanografi en anvendelse som krever nær sanntids tilgang på sensorinformasjonen.

### 3.5 Kartografi

Oppmåling og produksjon av kart har hatt mye nytte av avbildende satellitter de senere år. Oppløsningen i de kommersielle satellittbildene har gått ned til ca 0,5 meter, som kan være godt underlag for kart i målestokk 1:50.000. For kart i mindre målestokker (mer detaljgrad), kan det være vanskelig å tolke mindre objekter i bildene på en sikker måte.

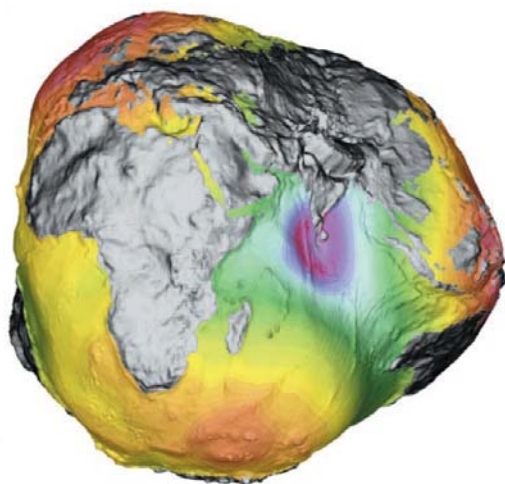
Siden kartproduksjon er en omstendelig prosess, har det også blitt produsert såkalte satellittbildekart, hvor satellittbildene har blitt brukt direkte som et alternativ til et kart. Bildene har da blitt geometrisk opprettet (fått utseende og egenskaper som et kart), fått rutenett og skalaer i tillegg til at enkelte karttemaer som høydekoter, elver og veier kan ha blitt lagt til. Satellittbildekart kan produseres i løpet av noen timer, og er mye brukt i militær sammenheng.

Det ble en stund spådd at satellittbilder skulle overta for flyfoto i forbindelse med kartografi. Det ser imidlertid ikke ut til å ha slått til. Bruk av flyfotografering for kartografi ser ut til å være godt innarbeidet, i tillegg til at satellittbildene ikke har oppløsning til å dekke de største kartmålestokkene (mest detaljerte kartene). Prisen på kommersielle høyoppløselige (1 m oppløsning eller bedre) satellittbilder har ligget fast på ca \$ 20 pr km<sup>2</sup> de siste årene. Selv om prisen burde være konkurransedyktig, er tilgangen til bilder forskjellig. Satellittbildene må tas når satellitten er over området av interesse uansett værforhold. Flyfotografering tas når væ-

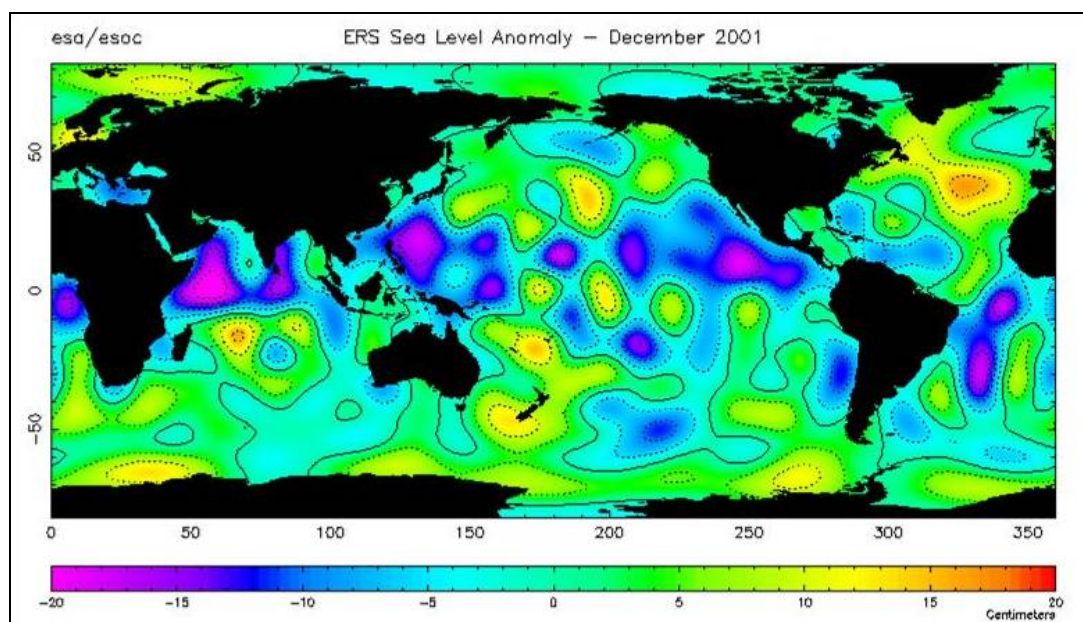
ret er godt, og da dekkes store områder samtidig. For kartprodusenten vil derfor flyfotografering være mer sikkert og kontrollert.

### 3.6 Kommunikasjon

Å kunne kommunisere sikkert på store avstander og til øde områder, har vært en utfordring hvor satellitter har gitt et betydelig bidrag. Begrepet kommunikasjon dekker en rekke anvendelser fra utsendelse av radio/TV, formidling av Internett til telefonsamtaler mellom enkeltpersoner. Det innebærer også livsviktig samband f eks mellom fly og bakkekontroll og muligheten til kontakt i nødssituasjoner.



Figur 3.14 Bildet til venstre viser sterkt overdrevet hvordan Jordas fasing er i gjennomsnitt. Bildet nedenfor viser hvordan havoverflaten "buler ut" i tillegg, i desember 2001. Tilleggsbulene endrer seg stadig, og skyldes atmosfærens og havstrømmenes effekt. Høyden er målt med satellitt altimeter (ERS-1 i 2001)

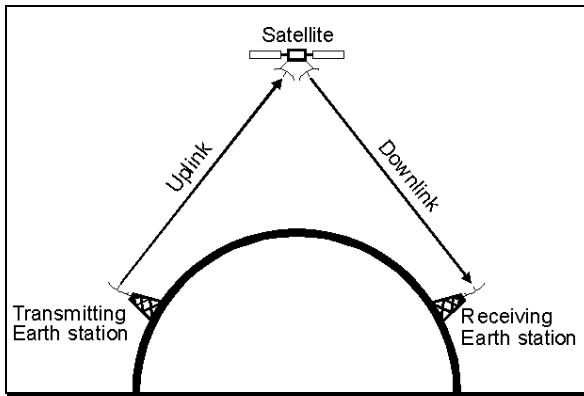






*Figur 3.15 Kjeller ved Lillestrøm. Bildet øverst er fra satellitten Quickbird tatt 2. juni 2002 (60 cm oppløsning). Nederst utsnitt kart i målestokk 1:50.000 for samme område.*





Figur 3.16 Prinsipp for kommunikasjonssatellitt

Ved satellittkommunikasjon benyttes satellitten som et slags speil (repeater), ved at det som mottas fra bakken sendes ut i retning av en mottaker på bakken (se Figur 3.16). Satellitten vil ha dekning over et mye større område, enn om utsendelsen skulle skjedd fra jorda. De fleste kommunikasjonssatellittene går i geostasjonær bane, og ligger fast et eller annet sted langs ekvator med sikt mot området de skal betjene. Med 3 satellitter i geostasjonær bane er det mulig å

dekke nesten hele jorda. Området rundt polene nås imidlertid ikke fra geostasjonære satellitter, men kan dekkes av satellitter i Molniya bane.

Kommunikasjonssatellitter har normalt mulighet til å peke mot ett eller flere avgrensede områder for å kunne utnytte sendereffekten effektivt. Regionsdekning kan f eks være Europa, og det benyttes en typisk åpningsvinkel på ca 5°. I modus for direkte peking (spot beam) kan åpningsvinkelen reduseres til ca 2°. Fordelen med smale stråler er at sendereffekten konsentreres inn i et område slik at signalet blir sterkere enn om et større område skulle dekkes. Dette reduserer kravet til mottakerutstyr på bakken, og spesielt til antennestørrelsen.

Telefonforbindelse via satellitt (mellom telefonsentraler) har vært i bruk siden 1960-tallet. Det var spesielt forbindelsen mellom kontinentene, som f eks Amerika og Europa, hvor kapasiteten var begrenset, som fikk en



Figur 3.17 Den europeiske kommunikasjonssatellitten EUTELSAT's dekning av Europa. Kotene viser signalnivået, som er sterkest over midten av Vest-Europa, og som faller utover i området

formidabel kapasitetsøkning. For den enkelte bruker merket en lite om samtalen var via satellitt eller på annen måte, og tjenesten har glidd inn som en selvfølgelighet. I vår tid med sterk utbredelse av mobiltelefoner, har problemet med sikker dekning, eller dekning overhode, vært en utfordring for operatørene.

Satellittefoni mellom mobile enheter ble introdusert tidlig på 1980-tallet. Tjenesten var kostbar, og ble benyttet av en begrenset brukerkrets hvor behovet for sikker mobil kommunikasjon var viktig. Etter hvert har det kommet flere operatører på markedet og konkurransen med reduserte priser har øket bruken av satellittefoner. Samtaler fra satellittelefon til fasttelefon/mobiltelefon koster i dag 5-10 kr pr min, mens å ringe fra fasttelefon/mobiltelefon er svært dyrt, fra 20-100 kr pr min. Satellitter for telefoni benytter både geostasjonære og polare baner (LEO). De geostasjonære satellittene krever større antenner, som oftest parabolantenne,

for å motta satellittsignalene. For å oppnå kontinuerlig dekning fra polare baner (LEO) kreves et stort antall satellitter, hvor f eks Iridium systemet benytter 66 satellitter.

### 3.7 Navigasjon

Å kunne bestemme egen posisjon er av stor viktighet i mange sammenhenger. Fartøyer og fly har lenge hatt behov for presis navigasjon, og i dag benytter vi også tilsvarende hjelpemidler når vi kjører bil. Etter 2. verdenskrig startet bruk av landbaserte, elektroniske navigasjonssystemer (DECCA, LORAN, Omega), og det første satellittbaserte systemet kom på 1960-tallet. Systemet het Transit, og ble brukt av det amerikanske forsvaret.

Dagens satellittbaserte system, det amerikanske Global Positioning System (GPS), ble utviklet på 1970-tallet, bygget og utprøvd på 1980-tallet, og ble operativt på 1990-tallet. Systemet består av 24 satellitter

Signalstyrke [dbW]	Antennediameter (parabol) [cm]
36	240 - 360
40	120 - 150
45	90 - 99
50	60 - 66
55	40 - 50

Tabell 3.2 Sammenheng mellom signalstyrke og nødvendig antennestørrelse

Bølgeband	Uplink	Downlink
C-bånd	ca 6 GHz	3.7 - 4.2 GHz
Ku-bånd	ca 14 GHz	10.9 - 12.75 GHz
Ka-bånd	ca 30GHz	18 - 20 GHz

Tabell 3.3 Bølgeband for satellittefoni



Figur 3.18 Konstellasjonen av GPS satellitter

i 20.000 km sirkulær bane (MEO), og kan gi posisjonen på bakken med en nøyaktighet på ca 10 m. Prinsippet baserer seg på å måle avstanden til satellittene ved å måle tidsforskjellen på utsendt og mottatt signal. I tillegg oppgir satellittene sin posisjon. Ved å ha kontakt med 3 satellitter kan mottakeren beregne egen posisjon på bakken (4 satellitter om høyde også skal beregnes). Det amerikanske forsvaret står bak satellitten, men

dens funksjonalitet er også åpen kostnadsfritt for det sivile markedet. Det finnes imidlertid to nøyaktigheter, hvor den beste kun er tilgjengelig for det amerikanske forsvaret og godkjente samarbeidspartnere, gjennom en spesiell kode. I tillegg kan myndighetene legge til en støy som reduserer posisjonsnøyaktigheten til ca 100 m. Posisjonsnøyaktigheten er også avhengig av geometrien til satellittene som mottakeren har kontakt med (satellittenes relative plassering i forhold til hverandre).

Russerne introduserte et system av navigasjonssatellitter på 1990-tallet kalt Glonass. 24 satellitter går i 19.000 km sirkulære baner (MEO), med en inklinasjon på 64.8°. Systemet har en nøyaktighet på 100-150 m for sivil bruk, og 10-20 m for militær bruk (kodet). På grunn av økonomiske problemer har systemet ikke blitt vedlikeholdt. Det synes nå som om et samarbeid med India vil få systemet på beina igjen til 2010.

European Union (EU) og European Space Agency (ESA) er i ferd med å bygge et sa-



Figur 3.19 Forskjellige generasjoner av GPS mottakere.



Figur 3.20 En Galileo satellitt under bygging

tellitnavigasjonssystem kalt Galileo (se Appendix A). En av de første satellittene er vist i Figur 3.20. Systemet vil bestå av 30 satellitter i 23.000 km sirkulær bane (MEO) med en inklinaasjon på 56°. Posisjonsnøyaktigheten er 5-15 m (10-40 m i høyde), mens et kodet signal kan gi nøyaktigheter ned til 1 m (ikke øremerket for militære, men for de som er villig til å betale!). En rekke land er partnere i Galileo-prosjektet, også land utenfor Europa. Systemet er planlagt å være operativt i 2010.

### 3.8 Katastrofer

Ved naturkatastrofer som jordskjelv og tsunamier er det viktig å få en rask oversikt over området. Dette for å kunne planlegge hjelpearbeidet på best mulig måte ved å kunne prioritere redningsarbeidet etter ressurser og skadeomfang. Ofte vil slike oversiktsbilder også indikere usikre områder hvor hjelpearbeiderne må ta spesielle forholdsregler.

De siste årene har det vært flere naturkatastrofer hvor omfanget har vært så stort at satellittbilder har bidratt til planleggingen av redningsarbeidet. Et eksempel er tsunamien i Thailand og Indonesia 26. desember 2004

(se Figur 3.21). Under slike redningsoperasjoner vil også kommunikasjonssatellitter bidra sterkt til effektiviteten av redningsarbeidet. Satellittbilder vil selvsagt også bidra som dokumentasjon over hendelser som f.eks tornadoen i Texas i mars 2000 (se Figur 3.22), eller terroraksjonen 11 sept 2001 i New York (se Figur 3.23).

### 3.9 Militære anvendelser

Det er USA og Russland som leder den militære utnyttelse av rommet, men stadig flere land engasjerer seg militært i rommet. Dette skjer direkte ved anskaffelse av egne satellitter eller indirekte ved bruk av kommersielle satellitter. Grunnene er bruken av mindre og billigere satellitter, og den stadig økende tilgjengeligheten av kommersielle satellitter.

Det fantes i 2006 over 270 operative militære satellitter, og ca 600 sivile, kommersielle satellitter. Stadig flere av de sivile satellittene har betegnelsen "dual use", fordi de både har en militær og en sivil anvendelse. Navigasjonssatellittene GPS og Glonass er begge eksempler på dette. Grunnen er at de militære anvendelsene ofte faller sammen med de sivile. En sivil fjernmålingssatellitt kan i mange tilfeller formidle den samme informasjon som en militær rekognoseringsatellitt. Innen områder som kommunikasjon, navigasjon, meteorologi og oseanografi er det klare militære behov som har mange likhetspunkter med de sivile anvendelsene. En vesentlig forskjell mellom sivil og militær bruk av satellitter kan være tidsaspektet, hvor nytteverdien for militære formål er knyttet til at informasjonen er raskt tilgjengelig. Det finnes også satellitter for rene militære anvendelser knyttet til innsamling av spesiell informasjon (etterretning).

Signaletterretning (SIGINT) er en ren militær anvendelse hvor satellittbårne sensorer





Figur 3.21 Tsunamien i Thailand og Indonesia 26 desember 2004 tok mange liv og gjorde store materielle skader. Bildene over viser før og etter tsunamien i byen Banda Aceh på kysten av Indonesia.

har vært i bruk i flere år. Intensjonen er å samle inn signaler brukt av en (potensiell) motpart. Disse signalene deles hovedsaklig inn i COMINT (Communications Intelligence) som består i innsamling og tolkning av alle former for meldinger og talekommunikasjon, og ELINT (Electronic Intelligence) for innsamling og analyse av signaler fra radar, radio og telefoni som ikke er kommu-

nikasjon. Forøvrig vil SIGINT favne alle typer elektromagnetiske signaler som kan gi informasjon og bidra i forståelsen av en motpart.

Militær etterretning er av naturlige årsaker godt beskyttet, og det er begrenset med informasjon om hva de forskjellige land foretar seg innen feltet. Allmennheten informere-





Figur 3.22 1 meter satellittbilde (IKONOS) fra Fort Worth, Texas etter tornadoen i mars 2000.

res i noen grad, og til tider frigjøres informasjon som er mer av historisk verdi, og som ikke kan skade aktiviteten nå eller i framtiden. Forøvrig vil media etter beste evne prøve å avdekke forhold de mener publikum bør være kjent med. Det kan være variabel kvalitet over kildematerialet, og en bør derfor ha kritisk sans ovenfor informasjon som ikke er bekreftet av institusjonen det gjelder.

Et unikt innblikk i amerikansk militær bruk av rekognoserings satellitter i perioden 1960–1972, ble frigitt i 1995. Flere prosjekter ble beskrevet, og 860.000 bilder tatt i perioden ble gjort tilgjengelige for allmennheten mot en administrasjonskostnad. Satellittene som ble brukt er den såkalte Keyhole serien (KH-1 til KH-6). Oppløsningen på bildene var til å begynne med 10-12 m, men kom i perioden ned til 2-3 m. Opptakene fra satellitten ble gjort på film som ble sendt tilbake til jorda i en kapsel. Før kapslene nådde bakken ble en fallskjerm utløst, og fly fanget kapselen i lufta (Figur 3.24).

Nyere rekognoserings satellitter, antagelig allerede fra 1976, benytter elektroniske sensorer og bildene overføres på radiolink tilbake til jorda. Bildene har rimeligvis blitt bedre med tiden, og det spekuleres i dag på en oppløsning på ca 10 cm. Ved å bruke fysikkens lover (Rayleighs kriterium) er det mulig å beregne hva som er den teoretiske grense for oppløsningen. For en optisk avbildning fra en satellitt i 500 km høyde (LEO), med en optikk på 4 m i diameter (hva det er plass til i bæreraketten) er mulig oppløsning 7.6 cm. I praksis kan atmosfæren påvirke strålebanene (pga temperaturvariasjoner) slik at bildet kan få tegn til utvisking.

### 3.9.1 Betydningen av oppløsning

Vurdering av en bildesensors ytelse gjelder først og fremst oppløsning, dvs. detaljnivået



*Figur 3.23 Terrorangrepet på World Trade Center 11 sept 2001 endret utseendet av Manhattan. Bildene over er tatt av IKONOS og viser Manhattan på datoene 30 juni 2001 (øverst), 15 sept 2001 (midten) og 6 august 2002 (nederst).*



## MILITÆR INFORMASJONSINNSAMLING, DEKNINGSOMRÅDE OG TIDSHORISONT

Militær aktivitet beskrives ofte som strategisk, operasjonell eller taktisk. Dette henspiller både på omfanget av aktiviteten (geografisk) og hvor raskt ting skjer (tidshorisonten). Militær informasjonsinnsamling (etterretningsunderlag), hvor bruk av sensorer fra satellitt vil være bidragsyter, har krav til dekning av geografisk område og tidsriktige leveranser gitt av typen aktivitet.

Strategisk etterretning er langsiktig og forberedende, og dekker alle steder og områder som kan ha betydning i en framtidig potensiell konflikt. Tidshorisonten er normalt uker og måneder. Informasjonen er omfattende og spenner over et vidt område fra politikk og sivil infrastruktur til militær kvalitet og kapasitet. Strategisk etterretning utføres i fredstid av alle nasjoner, først og fremst for å kontrollere sine nærområder og potensielle konfliktområder.

Taktisk etterretning er kortsiktig og lokal, og brukes av militære avdelinger i en konfliktsituasjon eller krig. Tidshorisonten er svært kort, og informasjon som er eldre enn noen timer gammel, er ofte ubrukelig. Informasjonsinnholdet er nesten utelukkende beskrivelse av motpartens avdelinger i form av posisjoner og identifikasjon av militært materiell. Det geografiske området som dekkes begrenser seg til avdelingens interesseområde.

Operasjonell etterretning dekker et militært hovedkvarters informasjonsbehov i eller i forberedelsene til en potensiell konflikt. Både dekningsomfanget og tidshorisonten vil ligge mellom taktisk og strategisk nivå.

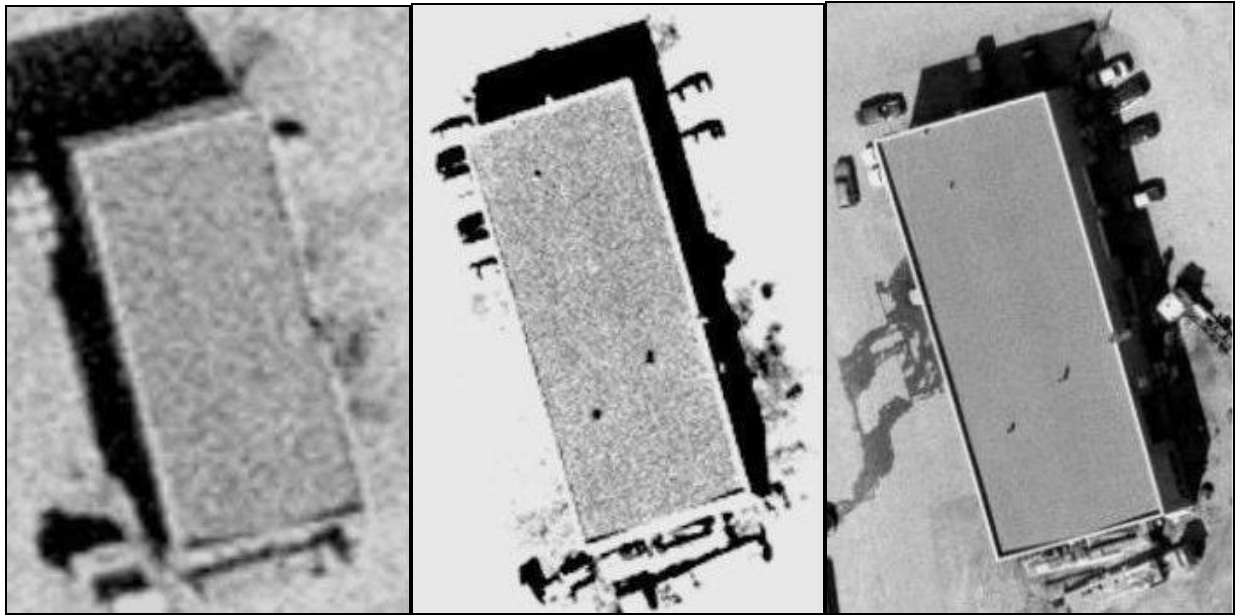


*Figur 3.24 Fotokapsel fanges av fly.*

som sensoren kan gi. Da de kommersielle aktørene kom på banen på 1990-tallet var det betydelig diskusjon om hvor detaljerte bilder en skulle tillate for de kommersielle satellittene.

Figur 3.25 - Figur 3.26 viser noen eksempler på flyfoto med oppløsning som er bedre enn

det som er tilgjengelig fra dagens kommersielle optiske satellitter. Vi ser at selv der kan det være vanskelig å avgjøre hva de enkelte objektene i bildene egentlig er, f.eks. i Figur 3.25. Bildet med 10 cm oppløsning gjør det mulig å bestemme med rimelig sikkerhet at vi ser biler, men selv her er det egentlig fordi vi ser sammenhengen med bygningen og parkeringsplassen.



Figur 3.25 Eksempler på flyfoto med 50cm, 25cm og 10cm oppløsning.



Figur 3.26 Eksempler på flyfoto med 1m oppløsning eller bedre.

Tidligere hadde satellittbildene en dynamikk på 8 bit, som tilsvarer 256 gråtonenivåer. I dag benyttes 11 bit (2048 gråtonenivåer). Dette er årsaken til at objekter i skygger nå blir synlig, som f eks kjøretøyene på skog-sveien i Figur 4.2.

## 4 Dagens aktører og systemer

### 4.1 Nasjonene

Romalderen startet i 1957 med Sovjetunionens vellykkede Sputnik ferde. Det påfølgende romkappløpet mellom Sov-

Required Resolution in Meters for:					Technical Analysis
Target Type	Detection	General ID	Precise ID	Description	
Bridges	6.00	4.50	1.50	1.00	0.0300
Radars	3.00	1.00	0.30	0.15	0.015
Radio Towers	3.00	1.50	0.30	0.15	0.015
Supply Dumps	1.5 to 3.0	0.60	0.30	0.03	0.030
Troop Units (bivouac/on road)	6.00	2.00	1.20	0.30	0.150
Airfield Facilities	6.00	2.00	3.00	0.30	0.150
Rockets and Artillery	1.00	0.60	0.15	0.05	0.045
Aircraft	4.50	1.50	1.00	0.15	0.045
Command and Control HQ	3.00	1.50	1.00	0.15	0.090
Missile Sites (SSM/SAM)	3.00	1.50	0.60	0.30	0.045
Surface Ships	7.5 to 15	4.50	0.60	0.30	0.045
Nuclear Weapons Components	2.50	1.50	0.30	0.03	0.015
Vehicles	1.50	0.60	0.30	0.06	0.045
Minefields	3.0 to 9.0	6.00	1.00	0.03	NA
Ports and Harbors	30.0	15.0	6.00	3.00	0.300
Coasts, Landing Beaches	15 to 30	4.50	3.00	1.50	0.150
Railroad Yards and Shops	15 to 30	15.0	6.00	1.50	0.400
Roads	6.0 to 9.0	6.00	1.80	0.60	0.400
Urban Areas	60.0	30.0	3.00	3.0	0.750
Terrain	90.0	4.50	1.50	0.75	NA
Surfaced Submarines	7.5 to 30.0	4.5 to 6	1.50	1.00	0.030

Figur 4.1 Krav til oppløsning for forskjellige gjenkjenningsnivåer av mål (fra Digital Globe)

jetunionen og USA ble raskt et kappløp om både prestisje og militære kapasiteter, spesielt innen overvåking. En viktig del av kappløpet var utviklingen av pålitelige bæreraketter med stadig større løftekapasitet. Dette var blant annet kritisk for å kunne løfte store satellitter til geostasjonære baner, 36.000 km over ekvator.

USA og Russland (tidligere Sovjet) har derfor vært de dominerende romfartsnasjonene siden begynnelsen. Etter Sovjetunionens fall ble også Kazakhstan en stor aktør innen oppskyting av satellitter. Den store oppskytingsbasen, Baikonur fra Sovjet-tiden ligger i Kazakhstan. Det meste av aktiviteten der styres fra Russland.

I USA er det primært NASA, NOAA og det amerikanske forsvaret som er de nasjonale satellitteierne. NASA har mest fokus på forskning og utvikling – inkludert klimaforskning, mens NOAAs mandat er innrettet mot å kjøre operative satellitter først og fremst for vær- og havvarsling. I det amerikanske forsvaret er det mange organisasjoner som utvikler og har satellitter. National Reconnaissance Office er den store aktøren på rekognoseringsatellitter, mens National Security Agency har ELINT satellitter. Videre har hver av våpengrenene både overvåkings- og kommunikasjonssatellitter. Den største innen romvirksomheten er nok det amerikanske luftforsvaret. De utvikler og opererer GPS, de mest avanserte kommunikasjonssatellittene som er under utvikling (Transformational Satellite program –





Figur 4.2 Quickbird bilde, 60 cm oppløsning, fra NATO-øvelsen Strong Resolve 2002.

TSAT) og har en rekke overvåkings satellitter, inkludert vær satellitter. Sistnevnte er Defence Meteorological Satellites (DMSP). Amerikanerne har nå slått sammen sivile og militære polarbanesatellittprogram for vær satellitter, og neste generasjon, NPOESS, vil være felles for militære og sivile værtjenester. Canada kom tidlig på banen i utvikling av nasjonale kommunikasjonssatellitter (ANIK-

A, 1972, var den første). På 1980-tallet økte den kanadiske romsatsingen betydelig. Canadian Space Agency ble etablert, utviklingen av radarsatellitter startet, og kanadierne inngikk et tett samarbeid med USA om utviklingen av robotutstyr til både romfergen og den internasjonale romstasjonen. På 1980-tallet begynte utviklingen av Radarsat-1, som ble skutt opp i 1995. Etterfølgeren, Radarsat-2, ble svært forsinket, men begynte

operasjoner i 2008. Radarsat ser ut til å kunne bli en serie av satellitter. Neste generasjon utvikles under navnet Radarsat Constellation.

European Space Agency (ESA) ble formelt opprettet i 1975, med utgangspunkt i to forgjengere, European Space Research Organization og European Launch Development Organization. Opprinnelig var det 10 land med, og Norge ble fullt medlem i 1987.

I tillegg har de fleste av de store europeiske landene (Frankrike, Tyskland og Italia) betydelig nasjonale romprogram. I utgangspunktet skal ESA stå for større romteknologiutviklingsprosjekter der medlemslandene ikke har tilstrekkelige egne ressurser. Nyere utvikling har nok ført til at kostnadene er redusert såpass at de nasjonale romsentrene nok oppleves å ha "spist seg inn" på ESAs domene. I tillegg er EUMETSAT blitt etablert for å operere felles europeiske værsatellitter.

Organisasjonene samarbeider ved at ESA står for det meste av teknologiutviklingen, mens EUMETSAT eier og opererer satellittene for operasjonelle værtjenester.

Japan var også tidlig ute med utvikling av både satellitter og bæreraketter. Første japanske satellitt, OSHUMI, ble skutt opp i 1970. Japan sendte opp sin første radarsatellitt, JERS-1 i 1992, og har siden fulgt opp med værsatellitter og miljøovervåkingssatellitter som ADEOS I & II.

Den mest interessante utviklingen framover er nok den som Kina og India står for. Begge har lansert store og ambisiøse romprogram. Kina ble den tredje nasjonen som sendte opp egne bemannede romfartøy. India har også svært konkrete planer i den ret-

ning nå, selv om det er usikkert når den første indiske bemannede romferden vil skje.

En rekke land både i Sør-Amerika, Asia og Afrika har utviklet eller kjøpt egne satellitter. Eksempler er Argentina, Brasil, Sør-Korea, Taiwan, Sør-Afrika og Nigeria. For flere av disse nasjonene er eierskap av satellitter blitt et mål for hvor langt de er kommet i utvikling og modernisering. Andre land er mer drevet av behov for overvåking av sine naboer. Dette gjelder spesielt Israel og Sør-Korea.

## 4.2 Kommersielle aktører

### 4.2.1 Fjernmåling

I USA var det tidlige forsøk på kommersialisering av fjernmåling med Landsat satellittene. Forsøket var ikke vellykket, og det ble etter hvert bestemt at Landsat data skulle gjøres tilgjengelig for reproduksjonskostnadene.

**SpotImage:** I Frankrike ble det gjort liknende etableringer med SPOT Image. SPOT Image eksisterer enda, men har kun lyktes med å drive forretning når satellittene betales av franske myndigheter.

### **DigitalGlobe, GeoEye og Orbimage**

På 1990-tallet var det flere amerikanske selskap (Space Imaging, Earthview, Orbimage) som utviklet konkurrerende optiske satellitter for opptak av bilder med ca 1 m oppløsning eller bedre.

I januar 2006 ble firmaet Space Imaging kjøpt opp av OrbImage, og et nytt firma; GeoEye, ble dannet. Space Imaging var den satellittoperatøren som kommersielt først kunne tilby 1 meter optiske satellittbilder da satellitten Ikonos ble skutt opp høsten 1999. OrbImage har siden sommeren 2003 hatt

OrbView-3 i bane. Også denne satellitten har en oppløsning på 1 meter. GeoEye sendte opp sin første satellitt, GeoEye 1, den 6. september 2008. Den har en oppløsning på 41 cm i pankromatisk modus (svart/hvitt), og 1,65 meter multispektral (farge). Banehøyden vil være 684 km, og gjenvistiden vil være 8 døgn (nadir bilder<sup>3</sup>) og 2-3 døgn (skrå bilder). Kongsberg Satellite Services (KSAT) vil bistå med nedlesing i Tromsø og Troll i Antarktis.

Satellittoperatøren DigitalGlobe kan pr i dag levere den beste oppløsningen på kommersielle optiske satellittbilder. Deres satellitt QuickBird, som ble skutt opp høsten 2001, har en oppløsning på 0,6 meter. DigitalGlobe planlegger 2 nye satellitter; WorldView-1 og WorldView-2. WorldView-1 ble skutt opp i september 2007. Denne vil kun levere pankromatiske bilder med en oppløsning på 45 cm. Banehøyden er 450 km, og gjenvistiden er 2 dager (skrå bilder). WorldView-2 skal skytes opp i løpet av 2009. Denne vil ha en oppløsning på 46 cm for sort/hvitt bilder, og 1,84 m for fargebilder. Banehøyden er økt til 770 km som gir en lavere gjenvistid ned mot 1 døgn.

Det må presiseres at de omtalte kommersielle satellittoperatørene kun har lisens for salg av bilder ned til 0,5 meter i oppløsning. Bilder med bedre oppløsning vil derfor bli digitalt endret til 0,5 meter. Unntaket er salg til amerikanske myndigheter eller utenlandske organisasjoner godkjent av amerikanske myndigheter.

### **MDA Geospatial.**

Da Radarsat-1 ble utviklet, etablerte kanadiske myndigheter og industri firmaet Radarsat International Inc (RSI). Formålet var

å kommersialisere det internasjonale salget av Radarsat-1 data. Firmaet fikk bruke satellitten gratis, men måtte drifte bakkestasjoner og salgsapparatet.

For Radarsat-2 var forventningene til kommersialisering høyere. Hovedleverandøren Macdonald Dettwiler, som også var største aksjonær i RSI, måtte finansiere store deler av satellitt- og radarbyggingen, mot at myndighetene forhåndskjøpte et svært stort antall radarbilder. Underveis har MDA kjøpt hele RSI og omdøpt firmaet til MDA Geospatial.

### **4.3 Omsetning av kommersielle satellittbilder**

Operatørene av de kommersielle fotosatellitene har normalt representanter i det enkelte land eller i regionen (verdensdel). Bestillingen foregår via e-post på spesielle skjema, hvor en rekke parametere som omhandler selve opptaket må bestemmes. Prisen vil avhenge av produkttype, leveringstid, minimums ordre, antall bånd osv.

Brukeren kjøper retten til å disponere satellittbildene til eget bruk, mens eierrettighetene forblir hos operatøren (unntak er bilder fra Landsat 7 hvor kjøper kan disponere bildene fritt dvs. også dele de med andre).

Salget av bildene foregår til en-brukere eller fler-brukere avhengig av omfanget av bruken. Som et minimum, vil begrepet en-bruker være et firma/institusjon lokalisert på et sted (f eks FFI på Kjeller). Noen aksepterer firma/institusjon lokalisert på flere steder (f eks FFI Kjeller og FFI Horten). I enkelte tilfeller (kampanjer) har det unntaksvis vært mulig å få Forsvaret omfattet som en-bruker. Neste trinn er fler-bruker som kan koste 50-100 % mer, og som normalt omfatter begrepet konsern (f eks Forsvaret).

<sup>3</sup> Bilder tatt rett ovenfra. Nadirpunktet er punktet på bakken rett under satellitten.

Kopi av bildene må ikke spres utenfor det avtalte brukeromfanget. Om bildene bearbejdes en viss grad av brukeren, kan de betraktes som brukerens eiendom, og kan disponeres fritt. Utsnitt og og sammenstillinger av bilder kan benyttes i brukerens rapporter, dokumenter og presentasjoner for fri distribusjon. Det vil imidlertid alltid være et krav at opprinnelsen til bildet markeres med navnet til satellittoperatøren f eks "Copyright Space Imaging"

#### **4.4 Militær nytte av kommersielle satellittbilder**

Det er militær bruk av alle typer kommersielle satellitter, og det synes som om bruken øker. Forklaringen kan være at teknologi som tidligere var utviklet for militær bruk, og som av sikkerhetsmessige årsaker var forbeholdt de militære, i dag i større grad er tilgjengelig på det kommersielle markedet. Myndighetene i USA, hvor satellitteknologien har kommet lengst, vurderer hele tiden grensen mellom sikkerhet og kommersialisme, som stadig flyttes mot større åpenhet og frigivelse av produkter. Militære kan da kjøpe produkter i stedet for å måtte drive en satellittbasert produksjon som jo er svært kostbart. I noen tilfeller har produkter, frigjort for kommersiell utnyttelse, enkelte restriksjoner knyttet til leveransene. F eks kan optiske satellittbilder med oppløsning under 50 cm ikke selges selv om f eks den kommersielle satellitten WorldView 1 tar bilder med oppløsning på 42 cm. Disse er forbeholdt den amerikanske stat. Bilder med oppløsning på 50 cm må dessuten "forsinkes" 24 timer til vanlige kunder for å hindre en sanntids utnyttelse av bildene.

## **5 Utviklingen framover**

### **5.1 Teknologi**

Generelt går den romteknologiske trenden i retning av mindre og mer spesialiserte satellitter. Selv om dette medfører flere oppskytninger for å dekke flere frekvensbånd eller sensortyper, gir det likevel billigere tilgang til rommet, og reduserer risiko for systemene som helhet. Større nasjoner og internasjonale organisasjoner bruker dette til å planlegge flere satellitter, noe som kan gi økt dekning i tid og rom. Vi ser dette allerede for radar-systemene SAR Lupe, COSMO/Skymed og RADARSAT-C. Frankrike utvikler Pleiades, en konstellasjon av optiske satellitter.

Ved siden av økt dekning, vil flere satellitter medføre økt seighet i systemene. Det blir færre "single points of failure". Konstellasjonene åpner også opp for mer avanserte avbildningsteknikker med radar. I første rekke gjelder dette interferometri for topografisk kartlegging, men også andre teknikker der flere satellitter samspiller for å få bilder med bedre kontrast og bedre muligheter til å avlese hastighet til fly, skip og kjøretøy.

Satellitter i konstellasjoner vil også føre til andre operasjonskonsept. Kommandoer vil kunne sendes opp til én satellitt for distribusjon til hele konstellasjonen via et eget nettverk mellom satellittene. Behandling av opptak på én satellitt vil gjøre det mulig å formidle informasjon direkte til andre satellitter for styring av detaljerte opptak med høy oppløsning over områder med aktivitet av spesiell interesse. Optiske linker mellom satellitter, og fra satellitter til høytgående fly og luftskip vil tas i bruk.

Antenneteknologiutviklingen vil på kortere sikt (3-5 år) medføre radarantenner med mer fleksibel strålekonfigurasjon. Dette vil gjøre spotlightteknikker mer tilgjengelig, dermed økt tilgang til radarbilder med bedre enn 1 m oppløsning. På noe lenger sikt vil det medføre økt bruk av Ground Moving Target Indicator (GMTI) observasjoner fra rommet. Amerikanske Space Radar vil ha en betydelig GMTI kapasitet, men dette er ventelig ikke operativt før år 2020.

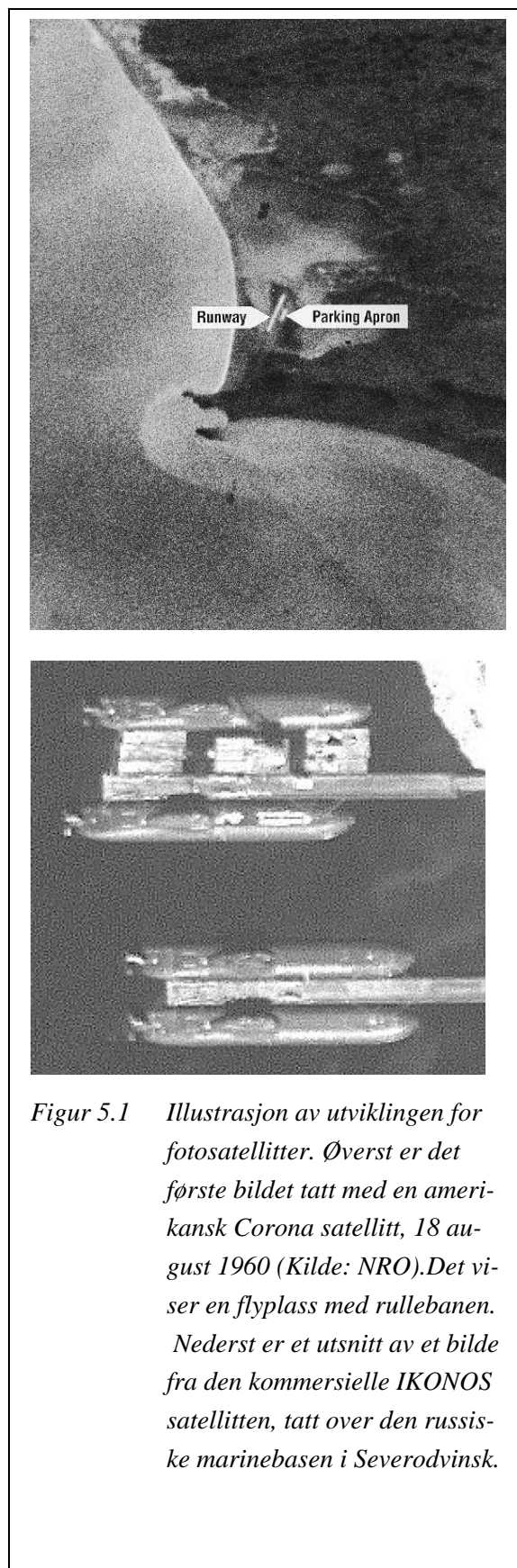
Dertil foregår det en miniatyrisering av SAR systemene, i første omgang for bruk på UAV og mindre fly. FGAN<sup>4</sup> i Tyskland ligger i forkant på dette. Det britiske firmaet Surrey Satellite Technologies Ltd, er allerede i gang med vurdering om mulighet for å montere systemet på en mikrosatellitt.

**Optisk/IR:** Sivilt har utviklingen i løpet av de siste par tiårene gått fra optiske bilder som løser opp detaljer på 30 m (farge) / 10 m (sorthvitt) til bilder med 250 cm (farge)/ 60 cm (sorthvitt). I 2007/2008 kommer sannsynligvis en betydelig forbedring. Lysfølsomhet har også økt, slik at det nå er betydelig lettere å avbilde kjøretøy o.l. i skyggeområder som tidligere var helt svart.

Forbedringen i sensorteknologien har ført til en utvidelse av anvendelsesområdene fra værvarsling og forskning til geografisk kartproduksjon, og videre til overvåking for militære og sikkerhetsformål, så vel som støtte til respons i forbindelse med naturkatastrofer.

Flere nasjoner har utviklingsprogrammer der ambisjonen er å utvikle sensorer som vil kunne gi bilder med oppløsningsevne på 1m fra geostasjonær bane ved hjelp av interfe-

rometri teknikker. Teknologien ventes å være modent for operativ bruk ca år 2020.



Figur 5.1 Illustrasjon av utviklingen for fotosatellitter. Øverst er det første bildet tatt med en amerikansk Corona satellitt, 18 august 1960 (Kilde: NRO). Det viser en flyplass med rullebanen. Nederst er et utsnitt av et bilde fra den kommersielle IKONOS satellitten, tatt over den russiske marinebasen i Severodvinsk.

<sup>4</sup> Forschungsgesellschaft für Naturwissenschaften e.V.



**Radarsatellitter:** Radarsatellitter i lav jordbane brukes både til militære og sivile formål. I løpet av 15 år har oppløsningen bedret seg noe, men framgangen har vært større innen utvikling av fleksible systemer som kan operere i en rekke forskjellige moder, samtidig som nye prosesserings- og analysemetode har resultert i nye anvendelser.

## 5.2 Policy

Det har tradisjonelt gått et klart skille mellom militære og sivile satellitter. Dette skillet utviskes nå til en viss grad, og en del satellittsystemer omtales som ”dual-use”, både fordi sensorytelsen er god nok for begge formål, og fordi de betjener både sivile og

militære brukere, vanligvis gjennom forskjellige bakkesegment.

Utviklingen medfører at det settes opp lover og regelverk i flere land for hvordan data fra de mest avanserte satellittene skal kunne brukes. USA, Canada og Tyskland har innført slik lovgivning, som blant annet setter krav til muligheter for begrenset distribusjon av satellittbilder enten i visse perioder, over utvalgte geografiske områder eller til bestemte land. For private/kommerielle aktører er detaljene i reguleringene nedfelt i lisensene som gis for hver satellitt. Dette gjøre det mulig for f.eks. amerikanske myndigheter å forholde seg til både den romteknologiske og den politiske utviklingen.

## Appendix A Galileo: EUs satellitnavigasjonssystem

Galileo vil være et sivilt europeisk satellitnavigasjonssystem. Utviklingen gjennomføres som et samarbeid mellom EU-kommisjonen og ESA. Finansiering på 3,4 milliarder euro ble endelig vedtatt på EUs transportministermøte i november 2007. Systemet vil i utgangspunktet bestå av 30 satellitter utplassert i verdensrommet i ca 23.222 km høyde, og 2 eller 3 kontrollstasjoner. Galileo skal være i drift i 2013, og er foreløpig planlagt å være i drift i 20 år.

Systemet implementeres under styring av European GNSS Supervisory Authority, etablert 12. juli 2004 som etterfølger til Galileo Joint Undertaking.

### A.1 Tjenester

Galileo vil bruke flere kanaler til å levere navigasjonssignaler innen 4 forskjellige tjenestekategorier:

<p><b>Open Service (OS):</b> Denne tjenesten vil gi åpne, fritt tilgjengelige signaler for allmenn bruk. Signalene kringkastes på to kanaler, og vil gi stedsbestemmelse med en gjennomsnittelig nøyaktighet på 4 m horisontalt og 8 m vertikalt når begge kanalene brukes samtidig. Brukes en enkelt kanal, vil nøyaktigheten være henholdsvis 15 m og 35 m, noe som tilsvarer dagens GPS nøyaktighet.</p>	<p><b>Commercial Service (CS):</b> En kommersiell tjeneste som kan abonneres på, som vil gi bedre enn 1 m posisjonsnøyaktighet ved bruk av tre kanaler. Signalene vil være krypterte for å beskytte den kommersielle verdien.</p>
<p><b>Public Regulated Service (PRS):</b> Vil være en kryptert og kontrollert tjeneste som vil gi posisjonsnøyaktighet på linje med OS. Signalene vil imidlertid være mer robuste mot jamming. Det vil være en integrert kontrollmekanisme som vil kunne kontrollere og signalisere feil med signalene. Signalene vil være tilgjengelige for sivile myndigheter (politi, redningstjenester osv) for å sikre pålitelige signaler i krisesituasjoner.</p> <p>Myndighetsorganer som vil ha tilgang til PRS er : European Police Office (Europol), European Anti-Fraud Office (OLAF), sivile beredskapsorganisasjoner, fredsbevarende styrker, humanitære hjelpeorganisasjoner, nasjonale og lokale politiavdelinger, kriminalpoliti (Norge: Kripos), sivile overvåkingsorganer (Norge: Politiets Sikkerhetstjeneste – PST), andre organisasjoner med ansvar for sikkerhet og beredskap (Norge: Kystverket, Kystvakten), tollmyndigheter.</p> <p>Adgang til PRS tjenesten vil styres gjennom tilgang til kryptonøkler og brukerterminaler som forvaltes av godkjente nasjonale myndighetsorganer. I følge informasjon fra Norsk Romsenter, er det sannsynligvis Nasjonal Sik-</p>	<p><b>Safety of Life Service (SoL):</b> Vil være tilgjengelige for brukere som krever spesielt pålitelige signaler for å tilfredsstille sikkerhetskrav, ilagt for eksempel av internasjonale luftfartsmyndigheter (ICAO). Signalene vil kunne brukes av skip, tog, fly, luftfartsmyndigheter (f.eks. AVI-NOR). Det vil innføres sertifiseringsprosedyrer for brukerstyr, og mekanismer for loggføring og etterkontroll i forbindelse med spesielle hendelser. Tjenesten vil dessuten inneholde autentiseringsmekanismer for å sikre at signalene som mottas av en sluttbruker er ekte og pålitelige. Kvaliteten på signalene vil dessuten overvåkes av dedikerte bakkestasjoner for å sikre at de holder tilstrekkelig kvalitet, og for å beregne korreksjoner relatert til atmosfæriske forhold (se nedenfor).</p> <p>I tillegg vil Galileo satellittene ustyes for å kunne motta nødsignaler fra transpondere som er laget for COSPAS-SARSAT systemet. Satellittene vil formidle signalene til en hovedredningssentral, og vil informere den nødstedte om at signalet er mottatt og videreførd. Galileo vil således inngå i Global Maritime Distress Safety System (GMDSS).</p>

kerhetsmyndighet NSM) som vil være nasjonal myndighet for dette i Norge.	
--	--

Tabell A.1 Oversikt over kategorier for Galileo posisjoneringstjenester.

	Open Service (OS)	Commercial Service (CS)		Public Regulated Service (PRS)		Safety of Life Service (SoL)
Coverage	Global	Global	Local	Global	Local	Global
	4m* / 8m** (dual freq.)	<1m	< 10cm	6.5m / 2m	1m	4-6m
Accuracy	15m / 35m (single freq.)	(dual freq.)	locally augmented signals		locally augmented signals	(dual freq.)
Availability	99.8 %	99.8 %		99-99.9%		99.8 %
Integrity	None	Value-added service		Yes		Yes

\*: Horizontal accuracy    \*\*: Vertical accuracy

Tabell A.2 Oversikt over tjenestekvalitet for ulike Galileo posisjoneringstjenester.

## A.2 Systemarkitektur

Galileo konstrueres for å kunne være et fleksibelt og adapterbart system, interoperabelt med GPS, men også uavhengig av GPS. Det vil si at Galileo mottakere også vil kunne bruke noen typer signaler fra GPS satellittene, og GPS mottakere vil kunne benytte noen av signalene fra Galileo.

Galileo vil ha 4 hovedkomponenter, omtales nedenfor:

### Global komponent

Den sentrale komponenten vil bestå av 30 satellitter i rommet, fordelt på 3 baneplan i Medium Earth Orbit (MEO). Hvert plan vil da ha en reservesatellitt. Konstellasjonen vil gi bedre posisjonsbestemmelse på høye breddegrader, sammenliknet med GPS, noe som blant annet er et resultat av norsk deltakelse i prosjektet.

Kontroll av satellittene, inkludert klokkesynkronisering, prosessering av integritetssignalene, og datahåndtering gjøres gjennom to Galileo kontrollsentre (GCC) i Tyskland og Italia. Et tredje senter i Spania vil være dedikert til å håndtere søk og redningstjenesten. Det vurderes om den spanske stasjonen også skal oppgraderes til en komplett GCC.

Kontrollsentrene vil inkludere funksjonelle enheter for:

- Orbit Synchronization and Processing Facilities (OSPF)
- Mission Control Facility (MCF)
- Satellite Control Facility (SCF)

- Precision Timing Facilities (PTF)
- Integrity Processing Facilities (IPF)
- Services Product Facility (SPF)

Disse funksjonene utgjør det essensielle i Galileo systemet. En kan derfor si at kontrollsentrene utgjør hjernen i systemet.

Dataoverføring til/fra satellittene oppnås gjennom et globalt nettverk av jordstasjoner av forskjellige typer:

- Tracking Telemetry and Control (TT&C, 5 stk)
- Opplink stasjoner (ULS, 9 stk eller flere)
- Sensor stasjoner (GSS, ca 20 stk eller flere)

TT&C stasjoner vil være utstyrt med en 13 m diameter stor antenne (av samme type som de andre store SVALSAT antennene). Stasjonen vil motta data om satellittenes tilstand, og sende opp kommandoer for justering av satellittbaner, operasjonsmodus o.l. og vil kunne foreta målinger for å bestemme satellittenes baner.

ULS stasjoner vil ha 3 m diameter antenne, og vil brukes til å sende opp navigasjonsparametere til hver satellitt. Parameterne inneholder informasjon om tid, satellittbane, tilbakemelding til nødstedte som har sendt ut nødsignal, data integritet og annen informasjon som støtter CS og PRS tjenestene.

Galileo Sensor Stasjoner (GSS) fordelt jorden rundt vil overvåke kvaliteten (integriteten) til signalene, og overføre denne informasjonen til kontrollsentrene gjennom et dedikert nettverk. Antennene er svært enkle faste antenner som "Lytter" likt i alle retninger. To slike stasjoner anlegges henholdsvis på Svalbard (SVALSAT) og i Antarktis (Troll-basen).

Integritetssignalene er unike for Galileo, og fins ikke i GPS systemet. Integritetssignalene gjør det mulig å kvalitetssikre og sertifisere Galileo for bruk i livskritiske operasjoner med Safety of Life tjenesten.

Alle TT&C stasjoner vil inkludere en ULS og en GSS.

### **Regionale komponenter**

Systemkonseptet tillater etablering av egne regionale integritetstjenester. En regional komponent vil dermed bestå av et regionalt sett med målestasjoner og et prosesseringssenter som behandler integritetssignalene.

### **Lokale komponenter**

Såkalte lokale komponenter kan utgjøre lokale stasjoner som bruker Galileo signalene enten til å forbedre presisjonen til de oppgitte posisjonene, eller til å gi dekning i områder som normalt ikke kan motta signalene fra satellittene, som f.eks. innendørs, i tunneler o.l. Signaler fra

lokale stasjoner vil bidra til at systemet er mindre utsatt for meteorologiske forstyrrelser. De lokale komponentene vil bruke andre kommunikasjonssignaler som mobiltelefoni eller trådløse nettverk. En kan forvente at flyplasser, f.eks. ved Longyearbyen, vil kunne ha nytte av slikt utstyr for å sikre at signaler til bruk under landing/avgang med fly og helikopter vil kunne navigere med større presisjon og sikkerhet.

### **Brukerterminaler og mottakere**

Det største antallet av enheter i denne kategorien vil være svært like med dagens GPS mottakere til bruk på båter, i biler, snøscootere og håndholdte enheter. Det vil utvikles en rekke forskjellige enheter for å møte behov i forskjellige markeder. Mottakere vil i mange tilfeller bygges inn i annet utstyr, fra mobiltelefoner til kartplottere og mer avanserte oppmålings- og navigasjonssystemer. Spesielle terminaler vil kunne bruke PRS signaler og/eller signaler fra de andre tjenestene. Det vil være betydelig kompatibilitet mellom GPS og Galileo. Brukerutstyr som benytter signaler fra begge satellittkonstellasjonene vil kunne foreta posisjonering med større pålitelighet og nøyaktighet, spesielt i større byer, trange daler og i tett skog.



## Forkortelser

BEGREP	FORKLARING
Apogeum	Punktet hvor den elliptiske banens har størst avstand til jorda
Bane <i>orbit</i>	Satellittens fortløpende posisjon rundt jorda
Bærerakett <i>launcher</i>	Rakett som bringer satellitter til sin bane
Dopplereffekt	Frekvensendring pga bevegelse mellom sender og mottaker
Fjernmåling <i>remote sensing</i>	Måling fra avstand (uten å være nær måleobjektet)
Geosentrisk	Med jorda som senter
Geostasjonær bane	Satellittbane over ekvator med samme omløpshastighet som jorda
Hyperspektral	Avbildning i mange bølgebånd, typisk mer enn 200
Inklinasjon	Vinkelen mellom ekvatorplanet og satellittens baneplan
Interferometri	Samspill mellom to eller flere bølger
Molniya bane	Sterkt elliptisk bane med hensikt å dekke polområdene
Multispektral	Avbildning i flere bølgebånd, typisk 3-10
Multistatisk radar	Forskjellige antenner sender og mottar radarsignalene
Nadir <i>nadir</i>	Rett ned, normalt på jorda
Perigeum	Punktet hvor den elliptiske banens har minst avstand til jorda
Piksel	Bildepunkt (av picture element)
Polar bane	Satellittbane som passerer over polene (nær polene)
Rekkeantenne <i>antenna array</i>	Antenne bestående av flere elementer på en rekke
Satellit buss <i>satellite bus</i>	Satellittens chassis eller hovedstruktur
Telemetri	Radiobasert utveksling av informasjon mellom satellitt og bakkestasjon

<b>FORKORTEELSE</b>	<b>NAVN</b>
AFSSS	Air Force Space Surveillance System
CDR	Critical Design Review
COMINT	Kommunikasjonsetterretning
DMSP	Defence Meteorological Satellites
ELINT	Elektronisk etterretning
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GPS	Global Positioning System
IR	Infrarød
ISS	International Space Station
LEO	Low Earth Orbit
LEOP	Launch and Early Orbit Phase
MEO	Medium Earth Orbit
NIR	Nær Infrarød
NORAD	North American Aerospace Defence Command
NOAA	National Oceanic Atmospheric Administration
NPOESS	National Polar-orbiting Operational Environmental atellite System
NRO	National Reconnaissance Office
NSA	National Security Agency
SAR	Syntetisk Aperture Radar
SIGINT	Signaletterretning (fellesord for COMINT og ELINT)
SSN	Space Sureillance Network
TT&C eller TTC	Tracking, Telemetry and Control
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

## Referanser

Et lite utdrag av den store mengden referanser om satellitter på Internett:

- [1] <http://www.satellitter.no>. Lettfattelig informasjon om satellitter og relaterte teknologier på norsk
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite>. Det mest kjente ”Internett leksikonet” med en rekke linker både innenfor og utenfor Wikipedia-domen
- [3] [http://ccrs.nrcan.gc.ca/index\\_e.php](http://ccrs.nrcan.gc.ca/index_e.php). En omfattende webside med mye grunnleggende beskrivelse fra Canada Centre for Remote Sensing
- [4] <http://www.palowireless.com/satellite/tutorials.asp>. En liste linker til firmaer og institusjoner med undervisningsmateriale om satellitter
- [5] <http://www.globalsecurity.org/space/systems/index.html>. En av de store websidene på forsvarsrelaterte ting. Denne linken omhandler de militære romprogrammene sortert på anvendelse.
- [6] <http://www.stortinget.no/SpmDetalj.aspx?id=19312>. Dokument nr 15 (1999-2000), Spørsmål nr 217, datert 22.02.2000.
- [7] <http://www.wpafb.af.mil/news/story.asp?id=123101570>. Engineers Demonstrate Pulsed Thermography Inspection for GLOBUS II.